

UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA
LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL

**"ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL CONCRETO POR EL MÉTODO DE MADUREZ PARA
LA HABILITACIÓN AL TRÁNSITO EN EL PROYECTO VÍA ALTERNA DEL SUR (VAS),
GUATEMALA"**
TESIS DE GRADO

MILDRED CAROLA CORTÉS BELCHES
CARNET 15342-10

GUATEMALA DE LA ASUNCIÓN, MARZO DE 2016
CAMPUS CENTRAL

UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA
LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL

**"ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL CONCRETO POR EL MÉTODO DE MADUREZ PARA
LA HABILITACIÓN AL TRÁNSITO EN EL PROYECTO VÍA ALTERNA DEL SUR (VAS),
GUATEMALA"**

TESIS DE GRADO

**TRABAJO PRESENTADO AL CONSEJO DE LA FACULTAD DE
INGENIERÍA**

POR

MILDRED CAROLA CORTÉS BELCHES

PREVIO A CONFERÍRSELE

EL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL EN EL GRADO ACADÉMICO DE LICENCIADA

GUATEMALA DE LA ASUNCIÓN, MARZO DE 2016

CAMPUS CENTRAL

AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR

RECTOR:	P. EDUARDO VALDES BARRIA, S. J.
VICERRECTORA ACADÉMICA:	DRA. MARTA LUCRECIA MÉNDEZ GONZÁLEZ DE PENEDO
VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN Y PROYECCIÓN:	ING. JOSÉ JUVENTINO GÁLVEZ RUANO
VICERRECTOR DE INTEGRACIÓN UNIVERSITARIA:	P. JULIO ENRIQUE MOREIRA CHAVARRÍA, S. J.
VICERRECTOR ADMINISTRATIVO:	LIC. ARIEL RIVERA IRÍAS
SECRETARIA GENERAL:	LIC. FABIOLA DE LA LUZ PADILLA BELTRANENA DE LORENZANA

AUTORIDADES DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

DECANO:	MGTR. JOSE CARLOS RICARDO VELA SCHIPPERS
VICEDECANO:	MGTR. JORGE ANTONIO GUILLEN GALVAN
SECRETARIA:	MGTR. KAREN GABRIELA MORALES HERRERA
DIRECTORA DE CARRERA:	MGTR. ELSA GUILLERMINA CABRERA ROMERO

NOMBRE DEL ASESOR DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

ING. PLINIO ESTUARDO HERRERA RODAS

TERNA QUE PRACTICÓ LA EVALUACIÓN

ING. JOSÉ ESTUARDO PALENCIA SAMAYOA

ING. WALTER NEFTALY MORALES PEÑATE

ING. YORIK ALEXANDER CAMPOS MORALES

Guatemala, 8 de enero de 2016

Ingeniera
Karen Morales
Secretaria de Facultad
Facultad de Ingeniería
Universidad Rafael Landívar

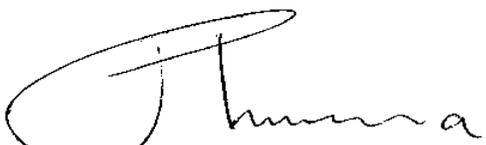
Estimada Inga. Morales:

Reciba un cordial saludo, deseándole muchos éxitos en sus labores cotidianas.

El motivo de la presente es para informarle que he revisado el informe final del Trabajo de Graduación titulado: **“ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL CONCRETO POR EL MÉTODO DE MADUREZ PARA LA HABILITACIÓN AL TRÁNSITO EN EL PROYECTO VÍA ALTERNA DEL SUR (VAS), GUATEMALA”**, de la estudiante **Mildred Carola Cortés Belches**, quien se identifica con número de carné **15342-10**. Después de haber revisado el informe final y de acuerdo con los requerimientos establecidos por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Rafael Landívar doy mi aprobación a dicho trabajo.

Sin otro particular.

Atentamente,



Ing. Plinio Estuardo Herrera Rodas
Asesor



Universidad
Rafael Landívar

Tradición Jesuita en Guatemala

FACULTAD DE INGENIERÍA
No. 0235-2016

Orden de Impresión

De acuerdo a la aprobación de la Evaluación del Trabajo de Graduación en la variante Tesis de Grado de la estudiante MILDRED CAROLA CORTÉS BELCHES, Carnet 15342-10 en la carrera LICENCIATURA EN INGENIERÍA CIVIL, del Campus Central, que consta en el Acta No. 0222-2016 de fecha 7 de marzo de 2016, se autoriza la impresión digital del trabajo titulado:

"ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA DEL CONCRETO POR EL MÉTODO DE MADUREZ PARA LA HABILITACIÓN AL TRÁNSITO EN EL PROYECTO VÍA ALTERNA DEL SUR (VAS), GUATEMALA"

Previo a conferírsele el título de INGENIERA CIVIL en el grado académico de LICENCIADA.

Dado en la ciudad de Guatemala de la Asunción, a los 7 días del mes de marzo del año 2016.



**MGTR. KAREN GABRIELA MORALES HERRERA, SECRETARIA
INGENIERÍA**

Universidad Rafael Landívar

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Rafael Landívar: Por ser la fuente de conocimiento de mi formación profesional y a cada uno de las personas que forman parte de esta casa de estudios. Especial agradecimiento a mis catedráticos por el esfuerzo y dedicación con la que transmiten sus conocimientos y compartirme la pasión por nuestra profesión, fueron parte importante en mi formación profesional y personal. Con especial agradecimiento a Mynor Pinto, Marco Barrios, Nivia Calderon, Rosa Santizo, Sucely Vela, Edy Lucas, Vilma Sajquim, Jonatán Tacam, Jorge Cifuentes, Juan Carlos Díaz, Gildardo Martínez, Giovanni Castillo y Elsa Calderon.

A mis compañeros: Por cada una de las experiencias compartidas a lo largo de estos años de formación, por estar a mi lado y crecer juntos en esta etapa de nuestra vida, por brindarme su apoyo y amistad. En especial a Maria René de León, Dulce Piedad, Belter Ramírez, Ernesto Vázquez, Maria de los Angeles Granados, Gustavo Flores, Manolo Calderon, Byron Arriaga, Juan Carlos Palacios, Alejandro Esteban, Andony Rodas, Maria José Penagos y Julio Castañeda.

A Cementos Progreso S.A.: A todas y cada una de las personas que forman parte del Centro de Investigación y Desarrollo, por abrirme las puertas para formar parte de su familia y por cada una de las oportunidades de aprendizaje. Este proyecto no hubiera sido posible sin su apoyo y ayuda. En especial a Luis Velásquez, Plinio Estuardo Herrera, Mariela Ramírez, Roberto Díaz, Marco Carballo, Hugo González, Hanz Ritz, Mario de León, Christian Chiriz, Marcia Salguero, Michelle Ozaeta, Lorena Flores, Leslie García y Maria José Bran.

Al Ing. Plinio Estuardo Herrera Rodas: Con un especial agradecimiento, por ser mi asesor y mentor. Su orientación, apoyo y guía hicieron de esta etapa algo único. Gracias por compartir su calidad profesional y humana, por transmitirme sus conocimientos y creer en mi.

Al Lic. Luis Velásquez: Por la oportunidad de formar de formar parte de su equipo de trabajo, por sus enseñanzas de vida y ejemplo.

Al Ing. Christian Basilio Chiriz Umaña: Por su apoyo para la realización de este proyecto, por contribuir a mi formación profesional y por su amistad.

Al personal del Proyecto VAS: Por su apoyo y permitirme la realización del presente proyecto de investigación. Con especial agradecimiento a los ingenieros Raul Alvarado y Raul Diaz, y al auxiliar de ingeniería Edgar de León.

DEDICATORIA

A Dios: Por ser mi fortaleza y sustento. Porque, para quien cree en ti Padre, todo le es posible. Tú eres quien guía cada uno de mis pasos, y vuelve realidad mis sueños y anhelos. Todo honor y toda honra son para ti Señor.

A mis padres, Dr. Octavio Cortés Mengual y Arq. Mildred Belches Aguilar de Cortés, por siempre estar a mi lado brindándome apoyo y consejo, por enseñarme cada día con amor y ejemplo de lucha, todo lo que soy es gracias a ustedes. Gracias por cada uno de los esfuerzos y sacrificios, para que mis sueños sean realidad. Esté triunfo es nuestro.

A mis hermanos: Octavio Alejandro, Jacqueline Beatríz y Jimena, mis compañeros de vida, por ponerle alegría a cada uno de mis días y llenar mi corazón, son el mayor regalo de Dios. Ustedes motivan mis luchas.

A mis abuelitos y abuelitas: Jacqueline Mengual de Cortés, Olga Elisa Valdéz de Cortés, Zoila Aguilar de Belches, Rafael Belches Gallardo, con eterno amor a su memoria. Con especial cariño a mi abuelito Ing. Juan Cortés Valdéz, agradeciendo a Dios por tenerte en mi vida y dedicarte este momento, eres un ejemplo.

A mi familia: Con amor especial, gracias por compartir mis logros.

A Klaus Hentze: Con amor, por ser parte de mi familia y compartir mis alegrías.

A mis amigos: Por compartir cada momento y vivencia en las diferentes etapas de mi vida, por su amor y apoyo incondicional. Por mostrarme con sus hechos lo que es la verdadera amistad. Con especial cariño a Maria Fernanda Camposeco, Ximena Herrera, Elvia Veliz, Maria José Andrade, Cristian López, José Antonio Bagur, José Guillermo Romero, Mónica Veliz, Lissa Andrade, Margarita Amezcuita, Mario de León, Guísela Godoy y Jackie Godoy.

RESUMEN EJECUTIVO

El presente trabajo de investigación ha sido elaborado con el fin principal de implementar el método alternativo de madurez para la estimación de la resistencia del concreto, en proyectos de pavimentación en Guatemala, siendo en este caso el proyecto de pavimentación de la Vía Alternativa del Sur (VAS). Para ello, se desarrollaron cada uno de los procedimientos determinados por la Normativa Técnica Guatemalteca: "Práctica para la Estimación de la Resistencia del Concreto por el Método de Madurez", siendo esta la COGUANOR NTG 41042, la cual es una equivalencia de la normativa internacional ASTM C1074-11.

Para la realización de esta práctica fueron requeridos procedimientos efectuados en laboratorios especializados en concreto y procedimientos experimentales en campo. En la fase de laboratorio de concreto, contando con el apoyo del laboratorio certificado del Centro de Investigación y Desarrollo, CETEC de la Empresa Cementos Progreso S.A., se siguieron los procedimientos de calibración de las curvas de madurez para la mezcla de concreto que es utilizada en el proyecto de pavimentación, tomando en cuenta que se utilizaron exactamente los mismos materiales, el mismo proporcionamiento de la mezcla y se realizó un análisis de cambios de temperatura a las que este concreto es sometido debido a las condiciones climáticas, con datos proporcionados por el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala.

Contando con la fase de laboratorio completa y las curvas de la madurez, que incluyen relaciones de tiempo-temperatura y relaciones de edad equivalente respectivamente, para especímenes cilíndricos y vigas de concreto, se procede utilizar el método en campo para estimar la resistencia a cualquier edad del concreto. Para la metodología en la fase de campo, fueron colocados dispositivos especiales en un punto estratégico de las extensiones del proyecto Vía Alternativa del Sur (VAS), en la estación 0+090 en los planos de diseño de dicha carretera, para lo cual se utilizaron dispositivos digitales especiales de recolección de datos llamados datalogger y termocuplas tipo K. Obteniendo así el registro de los cambios de temperatura en dicha ubicación, a través de un tiempo estimado, que en este caso fue de un mes.

Habiendo terminado la fase de laboratorio, se obtuvo la relación resistencia-madurez de la mezcla de concreto para el proyecto, utilizando el registro de la historia de temperaturas en campo del concreto colocado en cada una de las fechas estudiadas. Posteriormente se pudo realizar un análisis comparativo llegando a deducir la resistencia del concreto en cada periodo de tiempo, incluso en horas tempranas, sin ayuda de pruebas destructivas. Esta es una de las ventajas que este método nos presenta.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

MARCO I: INTRODUCCIÓN	15
1.1. INTRODUCCIÓN	16
1.2. LO ESCRITO SOBRE EL TEMA	18
1.2.1. Método de la Madurez del Concreto	18
Descripción General.....	18
Antecedentes	19
Fundamentos	22
Normativa Estándar.....	25
1.2.2. Vía Alternativa del Sur (VAS)	25
1.3. MARCO TEORICO	29
1.4.1. Fundamentos del Concreto	29
1.4.2. Concreto Endurecido.....	39
1.4.3. Pavimentos de Concreto.....	46
1.4.4. Proceso Constructivo de los Pavimentos de Concreto.....	49
1.4.5. Apertura al Tránsito y Resistencia de Concreto.....	60
MARCO II: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	62
2.1. DESCRIPCION DEL PROBLEMA	63
2.2. OBJETIVOS	65
2.2.1 Objetivo General.....	65
2.2.2 Objetivos Específicos	65
2.3. HIPÓTESIS	65
2.4. VARIABLES	66
2.5 DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES	66
2.6 ALCANCES Y LIMITACIONES	70
2.6.1 Alcances	70
2.6.2 Limitaciones	71
2.7 APORTE	73
MARCO III: MÉTODO	74
3.1 SUJETOS	75
3.2 INSTRUMENTOS	76
3.2.1. Equipo para Elaboración y Curado de Especímenes.....	76

a.	Especímenes Cúbicos de 50mm	76
b.	Especímenes de Ensayo de Concreto en el Laboratorio.....	76
c.	Especímenes de Ensayo de Concreto en la Obra	76
3.2.2.	Equipo para Determinación del Tiempo de Fraguado	76
3.2.3.	Equipo para la Medición de la Resistencia del Cemento y del Concreto	76
a.	Ensayo a Compresión de Especímenes Cúbicos de 50mm	76
b.	Ensayo a Compresión de Especímenes Cilíndricos.....	76
c.	Ensayo a Flexión en Vigas.....	76
3.2.4.	Equipo para la Medición de Temperatura	77
a.	Sensores de Temperatura (Termocuplas).....	77
b.	Sistemas Digital de Almacenamiento de Datos (Datalogger)	79
3.3	METODOLOGÍA.....	80
3.3.1	Procedimiento para la Determinación de la Temperatura de Referencia o de la Energía de Activación.....	80
Descripción del Procedimiento.....	80	
3.3.1.1	Determinación de la Temperatura de Referencia	83
3.3.1.2	Determinación de la Energía de Activación	84
3.3.2	Procedimiento para la Determinación de la Relación Resistencia-Madurez...84	
3.3.3	Procedimiento para la Estimar la Resistencia del Concreto en el Sitio de la Obra	88
MARCO IV: PRESENTACIÓN Y ANALISIS DE RESULTADOS	91	
4.1. CRONOGRAMA DE ESTUDIO	92	
4.2. RESULTADOS POR FASES.....	93	
4.2.1	Fase de Experimentación en Laboratorio	93
Caracterización de los Componentes del Concreto.....	93	
4.2.1.1	Caracterización del Agregado Fino	96
4.2.1.2	Dosificación de la Mezcla de Concreto.....	98
4.2.1.3	Estudio de la Temperaturas Extremas en el Sitio	99
Determinación de Tiempos de Fraguado para las Temperaturas Extremas y Determinación de Tiempos de Rotura de Cubos de 50mm (2 pulgadas)	103	
Determinación de la Temperatura de Referencia y Energía de Activación	117	
a)	Determinación de la Temperatura de Referencia (To).....	119
b)	Determinación de la Energía de Activación	120
Determinación de la Relación Resistencia-Madurez.....	122	

4.2.2	Fase de Experimentación en Campo.....	135
	Estimación de la Resistencia del Concreto en el Sitio de la Obra	135
4.2.3	Estimación de Costos para la Realización del Proyecto	156
4.3	DISCUSIÓN	157
MARCO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		161
5.1.	CONCLUSIONES	162
5.2.	RECOMENDACIONES.....	164
MARCO VI: REFERENCIAS.....		165
6.1.	REFERENCIAS	166

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Comportamiento de la madurez del concreto, sometido a condiciones de temperatura variadas.	19
Figura 2: Derrumbamiento de un fragmento de la edificación en el condado Fairfax, Virginia, Estados Unidos. Debido al retiro prematuro del encofrado.	20
Figura 3: Efecto cruzado en dos mezclas de concreto diferentes, en edades tempranas debido a las temperaturas del concreto, durante el desarrollo de la relación de la Resistencia-Madurez.	21
Figura 4: Colapso de la torre de enfriamiento debido a la aplicación de cargas de construcción aplicadas a edades tempranas.	22
Figura 5: Esquema de la historia de la temperatura y el factor de temperatura-tiempo, computado según la función de Nurse-Saul.	23
Figura 6: Plano de ubicación de la pavimentación Vía Alternativa del Sur (VAS).	26
Figura 7: Proyectos de infraestructura vial que existirán en Guatemala, en los que se incluye la descripción de la Vía Alternativa del Sur (VAS).	27
Figura 8: Detalle de la sección típica del pavimento.	28
Figura 9: Componentes fundamentales del concreto: Cemento, agua, agregado grueso y agregado fino.	29
Figura 10: Variación en proporciones usadas en concreto, según sea la necesidad.	30
Figura 11: Cilindros con diferentes relaciones de agua-cemento entre 0.25 a 0.70, pero con la misma cantidad de cemento. El aumento de agua, diluye el efecto de la pasta de cemento, aumentando volumen, reduciendo masa volumétrica y disminuyendo la resistencia.	31
Figura 12: Grafico del efecto de la temperatura de colocación de la mezcla de concreto (puesto en obra) en el revenimiento o asentamiento (medido con el cono de Abrams) y la trabajabilidad relativa de mezclas de concreto elaboradas con diferentes cementos.	35
Figura 13: Exudación del concreto en la superficie del concreto recién colocado en una losa de pavimentación.	36
Figura 14: Las fases que ocurren durante el fraguado y endurecimiento del concreto.	38
Figura 15: Tiempo de inicio y fin de fraguado de una mezcla sometida a diferentes temperaturas.	39
Figura 16: Se muestra el efecto de las temperaturas sobre la resistencia del concreto, tanto de la temperatura de colocación como de la temperatura de curado, pudiendo observar que a temperaturas más frías se tendrán resistencias tempranas menores y resistencias mayores a altas edades.	40
Figura 17: Realización de un ensayo de resistencia a la compresión de un espécimen cilíndrico de 150 x 300 mm (6 x 12 pulgadas).	43
Figura 18: Realización de un ensayo de resistencia a la flexión de una viga de concreto, pudiendo observarse la maquinaria requerida para este ensayo.	44
Figura 19: Composición de las capas de un pavimento rígido.	47
Figura 20: Esquema general de una Termocupla.	77
Figura 21: Sistema digital de recolección de datos de temperatura, modelo DT4947SD, de la compañía General Tools.	79

Figura 22: Inverso de la resistencia versus el inverso de la edad después del fraguado final.	82
Figura 23: Ejemplo de cómo graficar los valores de k, contra la temperatura de curado.	83
Figura 24: Ejemplo de graficar el logaritmo natural de los valores de k contra la temperatura absoluta para determinar el valor de Q usado en el cálculo de la edad equivalente.	84
Figura 25: Ejemplo de la relación entre la resistencia a compresión y el factor temperatura-tiempo.	86
Figura 26: Ejemplo de la relación entre la resistencia a compresión y la edad equivalente a 20°C.	87
Figura 27: Ejemplo de la resistencia a la compresión como una función del logaritmo de la edad equivalente.	87
Figura 28: Parámetros meteorológicos según la estación meteorológica INSIVUMEH.	99
Figura 29: Temperatura Máxima Absoluta según parámetros de meteorología, utilizada para estudios en el laboratorio.	100
Figura 30: Temperatura Mínima Absoluta según parámetros de meteorología, utilizada para estudios en el laboratorio.	101
Figura 31: Ensayos de determinación de tiempos de fraguado iniciales y tiempos de fraguado finales, se muestra la viga sometida a la temperatura máxima de 32°C (a), temperatura media de 23°C (b) y temperatura mínima de 8°C (c).	103
Figura 32: Realización de la mezcla de concreto en la bachadora, según el proporcionamiento utilizado en el proyecto (a), transporte de la mezcla en la carretilla y realización de las pruebas al concreto fresco (b) y cribado en húmedo de la mezcla de concreto con el fin de la obtención del mortero para la realización de los cubos de 50mm (2 pulgadas) (c).	107
Figura 33: Momento de elaboración de las series de cubos de 50mm (2 pulgadas) por técnicos especializados en morteros (a), y en la siguiente imagen se muestra al frente el procedimiento de tamizado para la obtención del mortero y en el fondo la realización de los cubos (b).	108
Figura 34: Se muestra fraguado inicial de los cubos en la cámara de viento sometidos a una temperatura de 32°C (a), en la siguiente imagen se muestran los cubos recientemente desencofrados sumergidos a el baño de curado previamente adecuado a la temperatura respectiva (b).	109
Figura 35: Se muestra fraguado inicial de los cubos en el laboratorio físico del CETEC, el cual cuenta con una temperatura controlada de 23 ° C (a) y en la siguiente imagen se muestra el baño de curado en donde fueron sumergidos (b).	110
Figura 36: Se muestra la incubadora adecuada a una temperatura de 8°C (a), en la siguiente muestra fraguado inicial de los cubos aun en los moldes espaciales de cubos (b), y en la última imagen se muestran los cubos recientemente desencofrados previo a ser sumergidos en el baño de curado previamente adecuado a la temperatura respectiva (c).	111
Figura 37: Se muestran los cubos en los moldes normados (a), en la siguiente imagen se muestran los cubos después de haber sido desencofrados (b).	112

Figura 38: Se muestran el equipo normado para las pruebas de compresión de cubos de 50mm (2 pulgadas) (a), en la siguiente imagen se muestran el ensayo de un cubo (b) y en la última imagen se muestra un cubo posterior al ensayo de compresión (c).....	113
Figura 39: Se muestran lo materiales utilizados para la elaboración del concreto (a), en la siguiente imagen se muestran los aditivos para dicha elaboración (b), y por último se muestra el dispositivo registrador digital de datos (datalogger) y las termocuplas tipos k, utilizados durante las pruebas (c).....	122
Figura 40: Se muestran la realización de la mezcla de concreto, el depósito del concreto en una carretilla para su posterior uso (b) y la realización de las pruebas al concreto fresco (c).....	122
Figura 41: Realización de los especímenes cilíndricos (a), y en la siguiente figura se muestran la inserción de los sensores de temperatura en los especímenes (b).....	123
Figura 42: Realización de las vigas (a) y (b), y en la siguiente figura se muestran la inserción de los sensores de temperatura en los especímenes (b).....	123
Figura 43: Desencofrado de especímenes cilíndricos (a), marcado de especímenes (b), y en la siguiente figura se muestran el desencofrado de las vigas de concreto (c).	124
Figura 44: Transporte de los especímenes (a), introducción de los especímenes en los tanques (b), se muestran los especímenes en los tanques de curado (c) y en la siguiente figura se muestra el datalogger introducido en un locker a fin de protección (d).	124
Figura 45: Preparación de especímenes cilíndricos previo a ser ensayados (a), realización del ensayo a compresión de los cilindros (b) y en la última figura realización del ensayo a flexión de las vigas de concreto (c).	125
Figura 46: Colocación de los sensores de temperatura a diferentes alturas, en esta ocasión solo se colocó un dispositivo.	136
Figura 47: Preparación del equipo previo a la colocación (a), conexión de las termocuplas a los dataloggers (b) y colocación del concreto por encima de los sensores de temperatura (c).	136
Figura 48: Colocación de los diferentes sensores a las alturas: alta a 10cm de la base (a), media a 7cm (b) y baja a 4cm (c).	137
Figura 49: Dispositivo de recolección de datos (datalogger) (a), colocación del locker y datalogger (b) y miembros del equipo de proyecto en la instalación de los sensores (c).	137
Figura 50: Pruebas al concreto fresco y especímenes (a) y especímenes cilíndricos y de vigas recién terminados (b).	139

MARCO I:
INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

Se observa como el incremento de la población mundial ha ido en aumento, es por ello que existe la necesidad de buscar nuevas formas de crecer, proyectos de vivienda, en edificios, en áreas comerciales y otras. Surge también la necesidad de la creación de medios de desplazamiento como los son las vías de comunicación, específicamente las obras de pavimentación.

El mismo entorno de innovación y tecnificación ha propiciado que exista un aumento en la velocidad con la que se realizan los procesos constructivos, para la rápida puesta en servicio las estructuras. Para ello es necesario el conocimiento del comportamiento de la resistencia del concreto, con el fin de cumplir con normativas disponibles, fundamentalmente en las edades tempranas del concreto, para poder asegurar que una edificación ofrece las características requeridas.

Como cada diseño de mezcla de concreto se comportara de manera diferente y en ella intervendrán varios factores, surge la necesidad de la búsqueda de nuevos modelos de predicción, para poder conocer dichos valores de resistencia del concreto a las edades requeridas, encontrando valores representativos de las condiciones reales a las que se encuentra el concreto. Entre los factores a tomar en cuenta para el conocimiento de una mezcla está el adecuado proporcionamiento del concreto para su uso específico, las condiciones ambientales a las que esté sometido, su proceso de colocación, el seguimiento del curado hasta su endurecimiento o cualquier otra situación a la que este esté expuesto.

En la actualidad existen métodos de predicción de resistencia en laboratorio, y si bien pueden ser registradas las resistencias a edades tempranas, con ensayos de probetas sometidas a condiciones ideales, por ejemplo, no son tan representativos de las condiciones reales, además de requerir una cantidad considerable de especímenes que tendrían que ensayarse para poder conocer la resistencia en un periodo específico. También están los métodos de determinación de resistencia por extracción de testigos, siendo este un ensayo que si bien muestra las condiciones reales del concreto, es un procedimiento destructivo, no pudiéndose realizar a edades tempranas. En conclusión estos son procedimientos menos confiables, como los necesarios para tomar una decisión crítica, como es la habilitación de cualquier tipo de estructura, además de mencionar que requieren de una cantidad de tiempo e inversión elevada. Es por esta razón que se analizó la utilización de un método predictivo para la resistencia del concreto a edades tempranas representativo de las condiciones reales. El Método de Madurez el método predictivo más eficiente para obtener la resistencia.

El procedimiento de este método está basado en la Normativa Técnica Guatemalteca COGUANOR NTG 41042, adaptado para uso de proyectos en Guatemala de la Normativa Internacional ASTM C1071-11, el cual dicta la Practica para la Estimación de la Resistencia del Concreto por el Método de Madurez. Este procedimiento es utilizado para conocer la resistencia de un determinado concreto en el periodo específico en el que se quiera conocer, no importando si esto es a edades

tempranas o tardías, apoyado en calibraciones realizadas con ensayos en laboratorio. Fundamentalmente utilizado en construcciones críticas como las remoción de formaletas o encofrados, post-tensionamiento de tendones, finalización del periodo de protección en tiempo frío o la puesta en servicio de un proyecto, como lo es una pavimentación. El fundamento de este procedimiento es que las muestras de un mismo concreto tendrán igual resistencia si es que tienen el mismo valor de madurez, aunque el historial de temperaturas varié en el transcurso del tiempo.

Para el presente caso se realizaron estudios de las condiciones climáticas a las que estará sometido el concreto utilizado en el proyecto, previos a seguir los procedimientos de calibración de las curvas de madurez, de la fase de laboratorio. Los estudios de las condiciones climatológicas fueron en base a tablas y análisis históricos de registro de temperaturas que proporciona el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala (INSIVUMEH). En el caso del presente estudio, las temperaturas oscilan entre los 8° y 32° C según la estación denominada INSIVUMEH, elegida por su proximidad a una sección del tramo carretero del proyecto de pavimentación Vía Alternativa del Sur (VAS).

Finalmente se realizó el análisis del comportamiento del concreto, llegándose a determinar las curvas de madurez, con los factores de temperatura-tiempo y edad equivalente. Habiendo obtenido los anteriores se pudo relacionar la resistencia del concreto, tanto a compresión como a flexión, -con los cambios en el historial de temperaturas-, y con ello poder estimar la edad adecuada del concreto para la apertura al tránsito, así como también, estimar rango de edad aproximada para el corte de las juntas de contracción.

En resumen, el presente trabajo de investigación y utilización de dicho método, incluyeron los procedimientos específicos, los resultados obtenidos y su discusión, con el fin de proporcionar un método innovador para implementación en nuestro país, compartiendo, con la industria de la construcción de Guatemala, los conocimientos y herramientas obtenidos para la realización del presente trabajo.

1.2. LO ESCRITO SOBRE EL TEMA

1.2.1. Método de la Madurez del Concreto

Descripción General

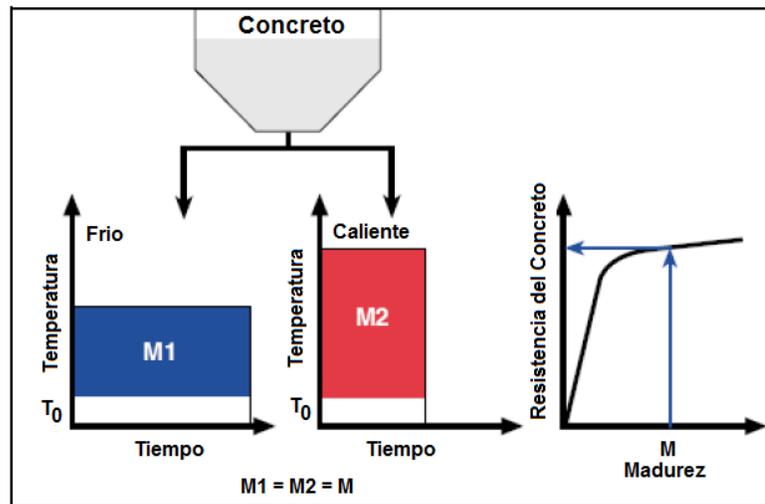
El método de madurez se refiere a los procedimientos para la estimación de la resistencia del concreto, considerando los efectos del tiempo y la temperatura en el transcurso de su ganancia de resistencia. Siendo posible determinar la resistencia del concreto en edades tempranas y tardías, incluyendo también periodos que abarcan el proceso de curado. Esto se logra mediante factores temperatura- tiempo o en términos de la edad equivalente (COGUANOR NTG 41042).

Conociendo que el cemento reaccionara químicamente al momento de entrar en contacto con el agua, fenómeno conocido hidratación de cemento, que dependerá del procedimiento de curado y las condiciones de temperatura a las que el concreto estuvo sometido. Un concreto ganará resistencia más rápidamente a edades tempranas cuando las temperaturas son elevadas, y por el contrario, bajo esas condiciones, su ganancia de resistencia a edades tardías será más lenta. La resistencia del concreto continuara aumentando con la edad siempre y cuando este se mantenga húmedo, la humedad relativa del aire este arriba del aproximadamente 80%, la temperatura sea favorable y haya suficiente espacio para la formación de nuevos productos de la hidratación. Con una humedad relativa dentro del concreto por debajo de 80% o cuando la temperatura este baja a menos de cero grados, la hidratación y la ganancia de resistencia se interrumpen. La madurez del concreto es una medida del progreso de hidratación.

Es importante mencionar que la temperatura exacta a la cual la ganancia de resistencia se suspende, dependerá específicamente de cada mezcla, de su dosificación y de las propiedades químicas de cada tipo de cemento utilizado.

Al referirse a madurez del concreto se refiere no solo al grado del desarrollo de una propiedad de una mezcla cementicia, como lo es el desarrollo de la resistencia, sino también, puede ser utilizada para describir la evolución de otras reacciones químicas que ocurren en las mezclas cementicias. Se debe tener en cuenta que la madurez a cualquier edad, temprana o tardía, dependerá de la historia de curado (COGUANOR NTG 41042). Sin embargo, en el caso de este estudio en particular, se enfoca en la aplicación al desarrollo de la resistencia en los concretos.

Figura 1: Comportamiento de la madurez del concreto, sometido a condiciones de temperatura variadas.



Fuente: Aguilar, Rodríguez y Sermeño (2013).

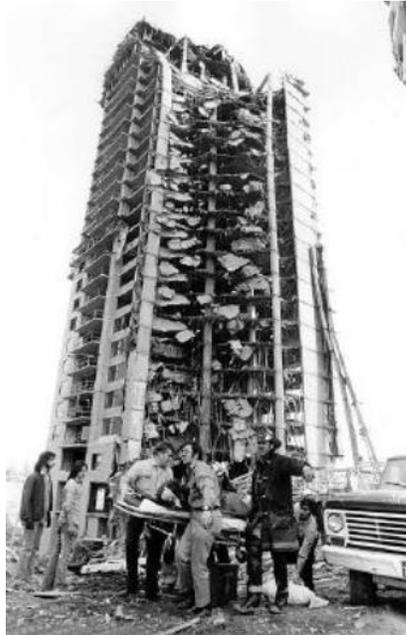
Antecedentes

Según los autores Carino y Lew (2001), el origen de esta metodología data del estudio de concretos sometidos a curados en vapor, elaborados en Inglaterra, a finales de los años 40 y principios de los años 50. Como un esfuerzo de transferencia de tecnologías por parte de la Administración Federal de Autopistas (Federal Highway Administration, FHA), existió en Estados Unidos un mayor interés por el método, que derivó en estudios e investigaciones realizados por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (National Institute of Standards and Technology, NITS) o bien conocido como el Departamento Nacional de Estándares (National Bureau of Standards, NBS).

El 2 de Marzo de 1973, una parte de un edificio de varios niveles, sufrió un derrumbamiento progresivo, en el condado de Fairfax, Virginia, Estados Unidos. En este suceso fallecieron 14 obreros y 34 resultaron heridos. Fue entonces cuando el Departamento Nacional de Estándares (NBS) solicitó a la Administración Ocupacional de la Seguridad y Sanidad (Occupational Safety and Health Administration, OSHA) asistencia para determinar la causa técnica del colapso de la estructura. El reporte de NBS concluyó que la causa más probable del colapso fue el retiro prematuro de la formaleta, presentando esfuerzos de corte que excedían la capacidad que soportaba el concreto relativamente joven. En el periodo en que ocurrió el colapso, el concreto en la losa de piso se cree que tenía una edad de cuatro días. Durante este periodo, la temperatura promedio, tomada de la base de datos de un aeropuerto cercano, era de aproximadamente 7 grados centígrados. Los investigadores del NBS se encontraron con dificultades al utilizar los datos disponibles respecto al desarrollo de la resistencia, y obtenidos bajo condiciones de temperatura constante para realizar una estimación confiable de la resistencia del concreto en obra, a la hora de la falla. Esto incrementó el interés sobre el concepto, en ese entonces innovador, de determinación de la

resistencia del concreto colocado en obra, por medio del método del madurez, sometido a condiciones de temperaturas variables.

Figura 2: Derrumbamiento de un fragmento de la edificación en el condado Fairfax, Virginia, Estados Unidos. Debido al retiro prematuro del encofrado.



Fuente: Aguilar, Rodríguez y Sermeño (2013).

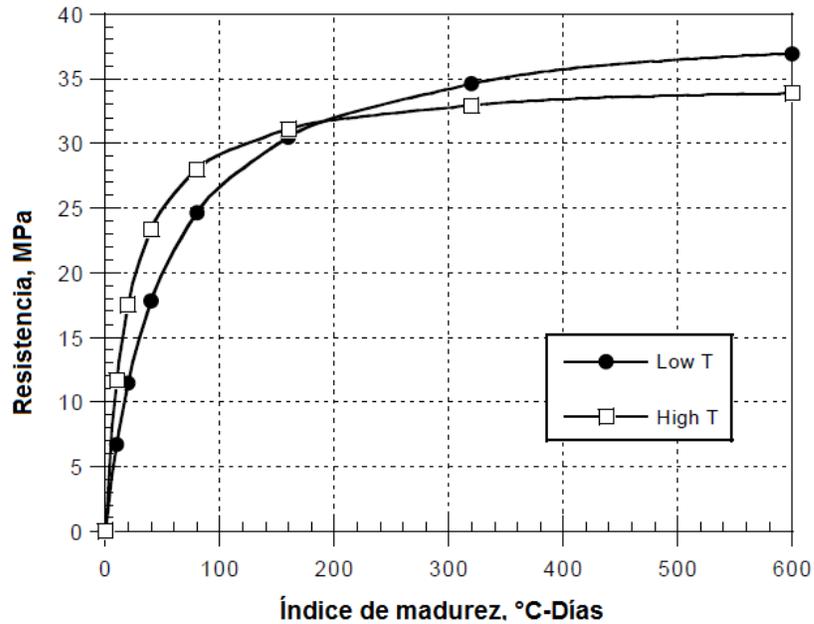
El método de madurez se basa en el estudio de la historia de las temperaturas del concreto para estimar el desarrollo de la resistencia durante el periodo de curado, cuando se cuenta con una humedad adecuada que permita la hidratación del cemento. La historia de la temperatura es usada para calcular el índice de madurez. Para cada mezcla de concreto, su relación con la resistencia (o la propiedad que se desee) y el índice de madurez será calculada con calibraciones en laboratorio. Utilizándose luego en campo para estimar la resistencia del concreto en sitio en base a la madurez que presenta.

La investigación inicial por parte del NBS confirmó que el método de la madurez podía ser utilizado para estimar el desarrollo de la resistencia a compresión, y otras propiedades mecánicas del concreto, sometido a diferentes temperaturas de curado. En el primer estudio, la temperatura inicial del concreto fue la misma para todos los especímenes, y estos fueron trasladados a diferentes cámaras de curado, posteriormente al desencofrado.

En estudios posteriores que realizó el NBS, se investigó la aplicación del método de madurez sometido a condiciones simuladas de campo. Fueron utilizadas tres diferentes mezclas de concreto para fabricar losas que contenían moldes cilíndricos extraíbles, como lo dicta la normativa ASTM C873. Como complemento, especímenes cilíndricos fueron también elaborados con la misma mezcla de concreto y colocados en cuartos húmedos de curado. Las losas fueron curadas a la intemperie durante la primavera. El objetivo era determinar si la relación Resistencia-Madurez para el

concreto de los especímenes sometidos a condiciones de campo, era la misma para los especímenes curados bajo condiciones de laboratorio. Los resultados de las investigaciones fueron relevantes, donde una de las mezclas tenía concordancia para la misma madurez entre las resistencias de especímenes curados en campo y los curados en laboratorio. Las otras dos mezclas tuvieron diferencias significativas. Examinando la historia de las temperaturas de los especímenes, revelo que para las otras dos mezclas, los especímenes curados a condiciones de intemperie experimentaron diferentes temperaturas a una edad temprana que los especímenes curados bajo condiciones de laboratorio. Para valores iguales de índice de madurez, los especímenes con temperaturas más elevadas a edades tempranas tendrán valores de resistencia inicial mayores y más bajas a largo plazo. Conociendo dicho comportamiento, como efecto cruzado (Crossover Effect).

Figura 3: Efecto cruzado en dos mezclas de concreto diferentes, en edades tempranas debido a las temperaturas del concreto, durante el desarrollo de la relación de la Resistencia-Madurez.



Fuente: Carino y Lew (2001).

El 27 de Abril de 1978, ocurrió un desplome mayor en la construcción de una torre de enfriamiento en la Isla de Willow, West Virginia. En el incidente murieron 51 trabajadores, que se ubicaban en el sistema de andamio anclado al cascaron parcialmente terminado. El NBS nuevamente solicita asistencia a OSHA para determinar la causa técnica de la falla. Los investigadores concluyeron que una de las causas más probables era la resistencia insuficiente resistencia en el concreto para soportar las cargas de construcción aplicadas. En el momento de la falla, el concreto en el interior del cascaron tan solo tenía un día de edad y fue expuesto a una temperatura media menor a los 10 grados centígrados. Esta falla convenció los investigadores del NBS que era urgente la necesidad de estándares para estimar la resistencia del

concreto en sitio durante las construcciones. Fue entonces que el equipo de NBS comenzó con el estudio profundo del método de madurez. El objetivo era obtener el conocimiento del efecto cruzado (Crossover Effect) y desarrollar métodos alternativos para eliminar el problema. Las investigaciones de NBS propusieron las bases para el desarrollo del primer estándar en el mundo en la aplicación del método de madurez (ASTM C1074).

Figura 4: Colapso de la torre de enfriamiento debido a la aplicación de cargas de construcción aplicadas a edades tempranas.



Fuente: Aguilar, Rodríguez y Sermeño (2013).

Más tarde, a mediados de los años 1990, la Administración Federal de Autopistas (FHA), se une a los esfuerzos de publicar productos obtenidos con el Programa de Investigación Estratégica de Autopistas (Strategic Highway Research Program, SHRP). Aunque no existieron nuevas investigaciones sobre el método de madurez, el proyecto SHRP C-204 (SHRP Project C-204) recomendaba el método como una tecnología existente para estimar el desarrollo de la resistencia del concreto en sitio para estructuras de autopistas. La Oficina de Tecnologías Aplicadas FHWA's utilizó un tráiler que se conducía por los Estados Unidos para demostrar la nueva tecnología a los ingenieros de autopistas. Como resultado a este esfuerzo, muchos departamentos de tránsito estatales, en Estados Unidos, mostraron interés en incorporar el método en las prácticas estándar que realizaban.

Fundamentos

Los orígenes del método de madurez hacen referencia a documentos en Inglaterra, que tratan de métodos acelerados de curado, de los autores McIntosh (1949), Nurse (1949) y Saul (1951). Pero existía la necesidad de un procedimiento para recabar los efectos combinados del tiempo y la temperatura en el desarrollo de la resistencia para diferentes métodos de curado a temperaturas elevadas. Se propuso

que los resultados del tiempo y la temperatura podrían ser utilizados para este propósito. Estas ideas dieron lugar a la famosa función de madurez de Nurse-Saul:

$$M(t) = \sum (T_a - T_o)\Delta t$$

Ecuación (1)

Dónde:

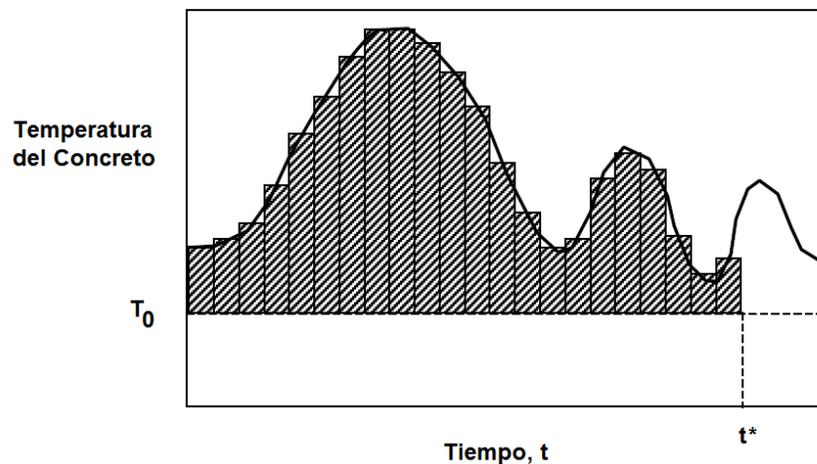
M = Índice de madurez, factor temperatura-tiempo a una edad t, en grados-días o en grados-horas.

Δt = Intervalo de tiempo, en días u horas.

T_a = Temperatura promedio del concreto durante el intervalo de tiempo, Δt en °C.

T_o = Temperatura de referencia (datum), en °C.

Figura 5: Esquema de la historia de la temperatura y el factor de temperatura-tiempo, computado según la función de Nurse-Saul.



Fuente: Carino y Lew (2001).

El índice computado era conocido como madurez, pero actualmente la terminología lo conoce como factor de temperatura-tiempo (ASTM C1074). La figura 5 muestra un esquema del historial de temperatura y el factor temperatura-tiempo, computado según la ecuación (1). El factor temperatura-tiempo a cualquier edad t es igual al área bajo la curva entre la temperatura del concreto y la temperatura de referencia. Definiendo esta última como la temperatura bajo la cual el concreto cesa su ganancia de resistencia, un valor tradicional utilizado es de -10°C.

En 1915 Saul presento el siguiente principio, que posteriormente paso a ser el principio de la madurez: *“El concreto de la misma mezcla con la misma madurez (estudiado con el factor temperatura-tiempo) tendrá aproximadamente la misma resistencia, con cualquier combinación de temperatura y tiempo, dará como resultado dicha madurez”.*

La ecuación (1) se basa en la suposición de que la ganancia inicial de resistencia (durante el periodo acceleratory²) es una función lineal de la temperatura. Después de la introducción de la ecuación se Nurse-Saul, se dieron cuenta que esta aproximación lineal no pudo ser válida cuando las temperaturas de curado varían sobre una amplia gama de valores. Como resultado, otros investigadores propusieron una serie de alternativas para la función. Sin embargo ninguna de ellas tuvo aceptación, y fue utilizada mundialmente así hasta los años 1970, donde se propuso una mejora, dando como resultado la ecuación actualmente utilizada.

En 1977, Freiesleben Hansen y Pedersen propusieron una nueva función para computar el índice de madurez según la historia de la temperatura del concreto. Esta función está basada en la ecuación de Arrhenius, utilizada para describir el efecto de la temperatura en el índice de una reacción química. La nueva ecuación permitió el cálculo de la edad equivalente del concreto.

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

Ecuación (2)

Dónde:

t_e = Edad equivalente a la temperatura especificada T_s , en días u horas.

Q = Energía de activación dividida por la constante de gas, en K.

T_a = Temperatura absoluta promedio del concreto durante el intervalo de tiempo Δt , en K.

T_s = Temperatura especificada, en K.

Δt = Intervalo de tiempo, en días u horas.

Utilizando la ecuación (2), la edad real del concreto se convierte en su edad equivalente, en términos de ganancia de resistencia a una temperatura especificada. En prácticas Europeas esta temperatura especificada se toma como 20°C, mientras que en Norte América se toma una temperatura de 23°C.

² Después que el cemento y agua son mezclados, existe un retraso de tiempo, poco antes que el desarrollo de la resistencia inicie. A este periodo se le conoce como inducción. Posterior a ello hay un desarrollo rápido de la resistencia, conocido como periodo acceleratory

La introducción de esta función supero una de las limitaciones de la función de Nurse-Saul, ya que permitió una relación no-lineal entre el índice inicial del desarrollo de la resistencia y la temperatura de curado del concreto. Esta dependencia de la temperatura es descrita por el valor de la energía de activación aparente, E.

Estudios comparativos demostraron que esta nueva función de madurez es superior a la función de Nurse-Saul. El uso de la ecuación (2) eliminó gran parte de las discrepancias entre las relaciones de resistencia-madurez desarrollada con diferentes temperaturas de curado inicial, es decir, se elimina la discrepancia en la madurez temprana que fue mostrada en la figura 2. Esta nueva función, sin embargo no puede explicar los efectos de las temperaturas iniciales sobre la resistencia a edades tardías del concreto. Lo cual es una limitación inherente en el método de madurez.

Normativa Estándar

Como fue mencionada con anterioridad el estudio del método tiene antecedentes desde mediados de los años cincuenta, aunque con el paso del tiempo fueron surgiendo estudios con el fin de un mejor conocimiento del comportamiento del concreto.

No fue hasta 1987 que gracias a los estudios de NBS se aprobó la normativa internacional ASTM C1074, que estandariza el procedimiento para la realización del método de madurez en mezclas de concreto. Posteriormente a ello la Comisión Guatemalteca de Normas (COGUANOR), en el año 2014, realiza una traducción de la norma ASTM, la cual está basada e incluye la designación propia de las normas técnicas guatemaltecas. Esta norma COGUANOR fue utilizada para cada uno de los procedimientos en este proyecto, que serán descritos a detalle posteriormente.

1.2.2. Vía Alternativa del Sur (VAS)

Se muestra a continuación imágenes oficiales según publicaciones periódicas anteriores, en donde puede observarse las ubicaciones de la Vía Alternativa del Sur (VAS) y su extensión en el plano.

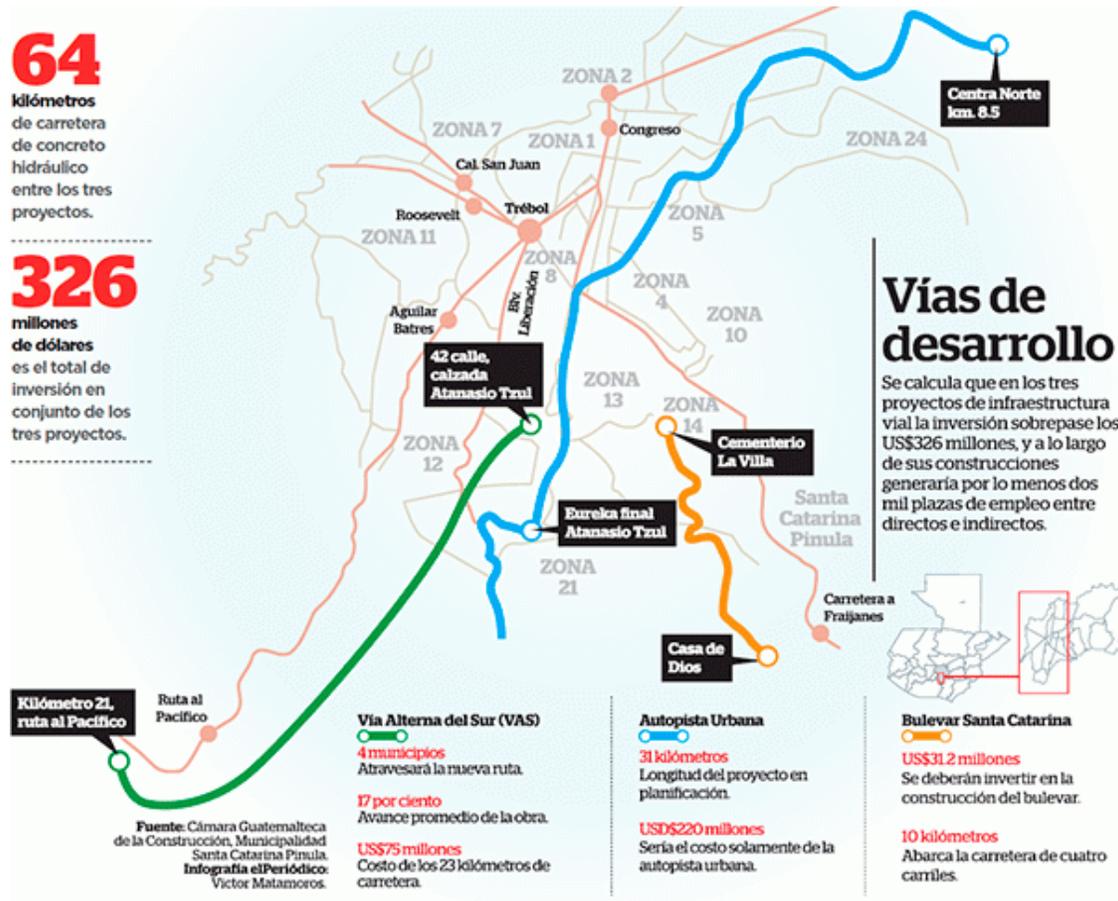
Figura 6: Plano de ubicación de la pavimentación Vía Alternativa del Sur (VAS).



Fuente: Prensa Libre (2015).

Con el nombre de Vía Alternativa del Sur es conocido el proyecto privado de construcción y pavimentación de tramo carretero que Inicia en 42 calle de la Calzada Atanasio Tzul zona 12 y finaliza en el Km. 20.5 de la ruta CA-09 Sur. Dicha Vía estará dividida en dos tramos, siendo el primero el tramo SB-1, el cual ira desde la Ciudad de Guatemala hacia Villa Canales y el segundo tramo SB-2, partirá de Villa Canales hacia San Miguel Petapa y Villa Nueva. Tendrá una extensión de aproximadamente 23 kilómetros, aunque todavía se tiene pendiente la definición de la parte del tramo inicial hacia la Ciudad Capital.

Figura 7: Proyectos de infraestructura vial que existirán en Guatemala, en los que se incluye la descripción de la Vía Alternativa del Sur (VAS).



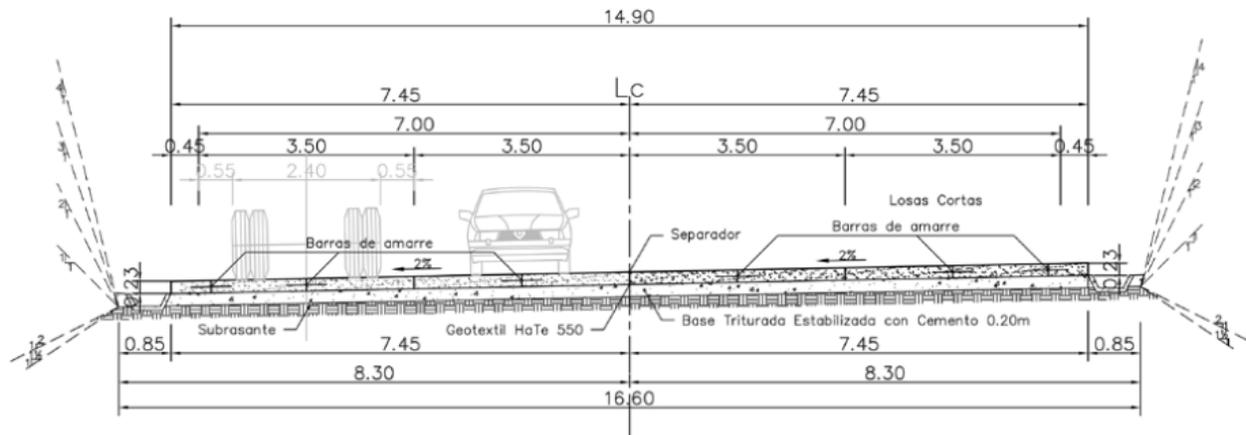
Fuente: El Periódico (2014).

El diseño fue realizado con las descripciones generales para la construcción de carreteras y puentes de la Dirección General de Caminos de Guatemala, utilizando la metodología de diseño de la American Association of State Highway and Transportations Officials (AASHTO) 1998, revisado según su desempeño con el software AASHTO ME. Los valores de diseño son para un periodo de 20 años, Trafico Promedio Diario de Camiones (ADTT) de 2,794 y una cantidad de Ejes Equivalentes (ESAL's) de 35 Millones durante ese período de diseño.

El pavimento está construido con concreto hidráulico con un módulo de rotura de diseño de 650 Psi a los 28 días, aunque cabe mencionar que dicho concreto alcanzando esa resistencia a los 7 días. El tamaño máximo del agregado es de 1 ½". Cuenta con una base triturada estabilizada con cemento, al 3%, para lograr un módulo de elasticidad de más de 900,000 Psi. Se está colocando una tela geotextil, en la interfase de losa-base, debido al alto módulo de la elasticidad de la base, lo que provoca que estas dos capas muy rígidas estén en contacto, lo que no es tan deseable.

Respetando la conveniencia del contratista, se decidió cortar las losas del pavimento, con una modulación cuadrada de 1.75 x 1.80 metros, aunque el diseño utilizado es bajo la metodología AASHTO. Las juntas longitudinales tienen barras de sujeción de acero y juntas de construcción o de final del día, con dovelas de sección circular. Además cuenta con barras de sujeción entre las losas del pavimento y el hombro de la vía.

Figura 8: Detalle de la sección típica del pavimento.



Fuente: González (2015).

Esta obra privada de pavimentación es construida por Constructora Nacional, Sociedad Anónima S.A. (CONASA), Supervisada por Grupo Tekton Consultores S.A. y asesoría técnica del Centro de Investigación y Desarrollo (CID-CETEC) de la empresa Cementos Progreso S.A.

Dicho tramo carretero contará con cuatro carriles de concreto hidráulico, dos por cada sentido. Siendo un proyecto privado, tendrá con garitas de peaje como parte del beneficio a la inversión de USD 75 millones, alrededor de 573 millones de quetzales, en donde los conductores podrán decidir si transitar por vías libres existentes, o efectuar el pago para transitar por este proyecto, que representa un ahorro en tiempo y combustible.

Desde junio del año pasado a la fecha de realización de este trabajo de tesis, la construcción del tramo carretero se ubica entre San Miguel Petapa y Villa Nueva, el que se tiene previsto abrir al tránsito al tránsito en el mes de noviembre del año 2015. El segundo tramo, el SB-2, se prevé esté concluido a mediados del 2016. A la fecha el proyecto tiene un avance del 40%.

1.3. MARCO TEORICO

Con el fin de comprender el análisis y los procedimientos realizados en el presente proyecto, se presentaran algunos conceptos básicos:

1.4.1. Fundamentos del Concreto

Según documentos de la Asociación de Cemento Portland (Portland Cement Association, PCA), el concreto es el material más utilizado en la industria de la construcción. Es también conocido como hormigón, compuesto fundamentalmente de una mezcla de agregados y pasta. La pasta es elaborada de cemento portland, cemento hidráulico u otro tipo de cementante y agua. La pasta actúa como aglomerante de los agregados, comúnmente arena y grava (o piedra triturada), cubriendo aquella cada una de las partículas de grava y las partículas de arena, llenando los vacíos que existen entre ellos. La pasta comienza a endurecer por la reacción química entre el cemento y el agua, conocida como hidratación, tomando gradualmente una consistencia de dureza y resistencia, uniendo los agregados en una masa muy parecida a la de una roca. Otros materiales cementantes y adiciones minerales pueden incluirse en la pasta, esto dependerá de las características que se requieran para una aplicación particular.

Figura 9: Componentes fundamentales del concreto: Cemento, agua, agregado grueso y agregado fino.



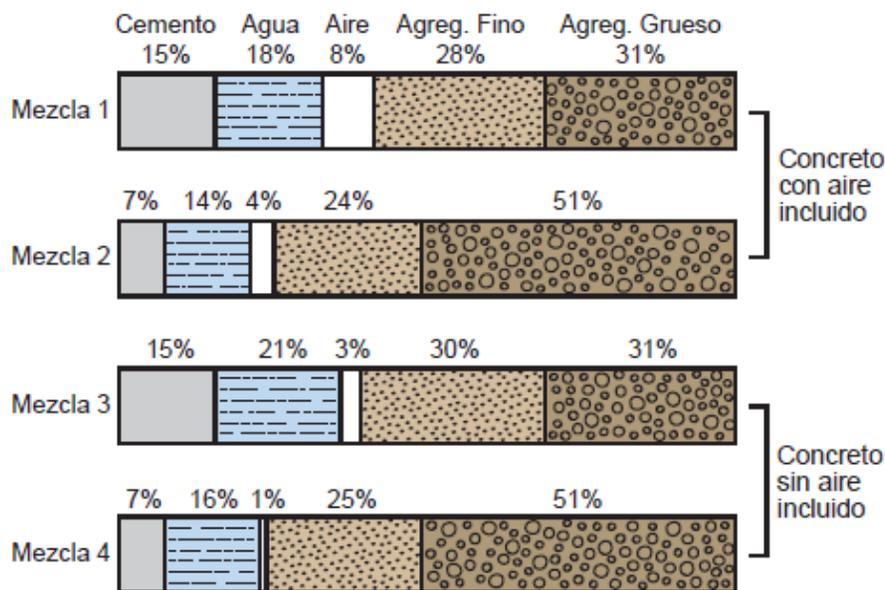
Fuente: Kosmatka, Kerkhott, Panarese y Tanesi (2004).

Los agregados proveen la estructura y dureza al concreto, es por ello que es fundamental su selección. Estos pueden dividirse en dos grupos: finos y gruesos. Los finos de arena natural o artificial (trituración) generalmente pasan por el tamiz de 3/8 pulgada (9.5 mm), y los agregados gruesos son las partículas retenidas en el tamiz no. 16 (malla de 1.18 mm) hasta llegar a un tamaño de 6 pulgada (150 mm). El tamaño de 3/4 pulgada o 1 pulgada (19 mm o 25 mm) es el que usualmente se utiliza como tamaño

máximo para el agregado grueso de la mayoría de construcciones. Para mejorar la granulometría combinada del agregado en una mezcla de concreto, es común utilizar agregado medio de tamaño máximo de 3/8 pulgada (9.5 mm).

Los componentes de la pasta son el material cementante, agua y aire atrapado o aire incluido (agregado intencionalmente). En relación de volumen, la pasta, constituye de un 25% a un 40% del volumen total del concreto. El volumen del cemento es ente 7% y 15%, mientras el del agua está entre 14% y 21%. El contenido de aire puede ser entre el 1% y 3% para mezclas sin aire incluido y entre el 4% y el 8% del volumen total para mezclas con aire incluido. El mayor volumen lo ocupan los agregados, representando del 60% al 75% del volumen total del concreto. La composición de las mezclas de concreto puede variar según la aplicación utilización que el concreto tendrá durante su vida útil.

Figura 10: Variación en proporciones usadas en concreto, según sea la necesidad.



Fuente: Kosmatka, Kerkhott, Panarese y Tanesi (2004).

Ya que el agregado representa la mayor proporción del volumen de una mezcla, en la mayoría de los diseños de mezclas de concreto, la composición de una mezcla se basará en las características de los agregados. Características como la composición de las partículas, su resistencia mecánica y resistencia a condiciones de exposición, así como también, el contenido o ausencia de materiales nocivos que puedan interferir con el comportamiento adecuado del concreto son de vital importancia al seleccionar el tipo de agregado adecuado. También es importante el uso eficaz de la pasta, por lo que se hace necesaria una adecuada granulometría continua de tamaños de partículas. Sin duda de la calidad de la pasta y del agregado, dependerá la calidad del concreto. La pasta al ser elaborada de manera correcta, cubrirá toda y cada una de las partículas del agregado, pudiendo tener características de dureza y resistencia óptimas.

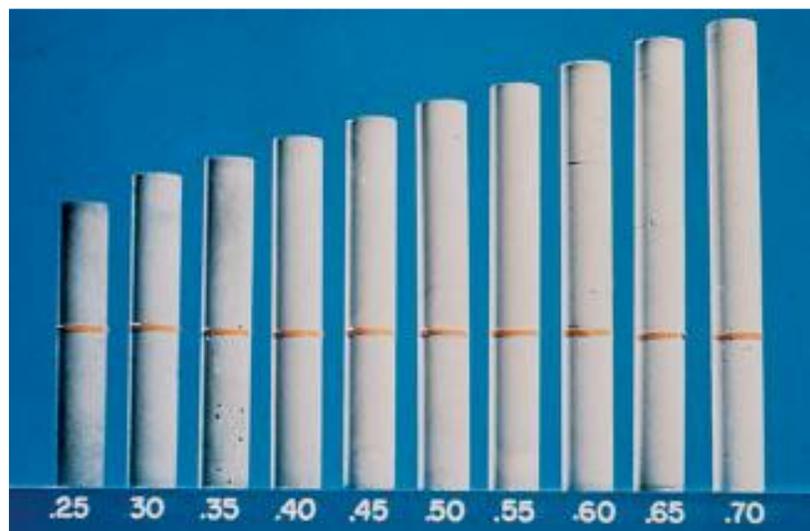
No importando el material o las condiciones de curado que tendrá el concreto, la calidad estará directamente influenciada por la cantidad de agua utilizada con relación a la cantidad de cemento.

A mayor cantidad de agua utilizada, disminuye la densidad de la pasta y se reduce la función cementante de la misma. Es por ello que es importante considerar la disminución en la relación de agua/cemento, porque se tienen algunas ventajas como:

- Aumento de la resistencia a compresión y a flexión del concreto.
- Disminución de la permeabilidad, y la absorción y aumento de la estanquidad.
- Aumento de la resistencia a la intemperie.
- Mejor agarre entre la armadura de acero y el concreto.
- Reducción de la contracción (retracción, encogimiento) y la fisuración (agrietamiento).
- Menores cambios de volumen causados por el mojado y el secado.

Esto quiere decir, que a menor cantidad de agua utilizada en la elaboración del concreto, mejor es la calidad de este, si la mezcla se consolida adecuadamente. A medida que la mezcla contiene menor cantidad de agua, las mezclas son más secas, pero con ayuda de vibradores internos o externos pueden ser colocadas de manera más sencilla, mejorando la calidad del concreto.

Figura 11: Cilindros con diferentes relaciones de agua-cemento entre 0.25 a 0.70, pero con la misma cantidad de cemento. El aumento de agua, diluye el efecto de la pasta de cemento, aumentando volumen, reduciendo masa volumétrica y disminuyendo la resistencia.



Fuente: Kosmatka, Kerkhott, Panarese y Tanesi (2004).

Las propiedades del concreto fresco y del concreto endurecido pueden modificarse por medio de la adición de aditivos químicos, usualmente incorporados a la mezcla en forma líquida, durante el proceso de dosificación. Comúnmente utilizados para:

- 1) Ajustar el tiempo de fraguado o de endurecimiento.
- 2) Reducir de la demanda de agua.
- 3) Aumentar de la trabajabilidad.
- 4) Incluir aire intencionalmente .
- 5) Ajustar otras propiedades del concreto fresco o del concreto endurecido.

Al finalizar el proceso de proporcionamiento, dosificación, mezclado, colocación, consolidación, acabado y curado adecuados, el concreto se endurece y, se convierte en un material no-combustible, duradero, tenaz a la abrasión y razonablemente impermeable que requiere de poco mantenimiento. Sin duda el concreto es un gran material para la construcción, puede adoptar formas, colores y texturas distintas para la aplicación según sea la necesidad.

a. Concreto recién mezclado

Lo que se busca del concreto recién mezclado es que sea plástico o semi-fluido y habitualmente apto de ser moldeado a mano. Cuando la mezcla de concreto es muy húmeda puede ser colocada en el molde o encofrado, pero no necesariamente se encuentra en el parámetro de ser “plástica”, que quiere decir que es flexible y capaz de ser moldeada de igual forma que un terrón de arcilla.

Cuando todos los granos de arena y las partículas de grava, son envueltos y sostenidos en suspensión, estamos hablando de una mezcla de concreto plástica. En este caso los componentes del concreto no son expuestos durante el transporte; y este se transforma en una mezcla homogénea de todos los elementos del concreto al endurecerse. Al estar colocando el concreto en estado plástico, este no se desmorona, sino que fluye sin segregarse.

Cuando se habla de elementos muy delgados y fuertemente reforzados con armadura de acero, se necesita que el concreto tenga una consistencia trabajable para facilitar la colocación, pero no llegando al punto de que su consistencia este muy fluida. Para la resistencia y el mantenimiento de la homogeneidad del concreto durante el transporte y la colocación, es preciso que la mezcla se encuentre en un estado plástico. Esta condición se puede lograr incorporando aditivos plastificantes (fluidificantes), y con ellos lograr que la distribución y la fluidez del concreto sean mejores.

b. Dosificación, Mezclado, Transporte y Manejo del Concreto

Al hablar de dosificación nos referimos al proceso de pesar y medir volumétricamente los materiales e introducirlos a la mezcladora, para elaborar una mezcla de concreto, respetando las mediciones con precisión para obtener concretos de calidad. Se debe tomar en cuenta que actualmente la mayoría de las especificaciones requieren de dosificaciones en peso, en lugar de volumen, por las imprecisiones que las dosificaciones en volumen generan. En resumen,

con una dosificación en peso, se logra una mayor exactitud. El agua y los aditivos en líquido pueden ser medidos por cualquiera de los métodos.

Todo concreto debe mezclarse completamente hasta que sea uniforme en apariencia, con todos los materiales distribuidos de manera homogénea. Para asegurarnos de la homogeneidad de todos los elementos que componen el concreto, es necesario el esfuerzo y cuidado en el momento de la elaboración de la mezcla. Para asegurar la uniformidad del concreto, es trascendental aplicar los componentes en la mezcladora siguiendo una secuencia de carga apropiada. Aunque esta secuencia puede variar y aun así producir un concreto de buena calidad. Estas secuencias distintas necesitarán variaciones en la manera en que se incorpora el agua, o en la cantidad de revoluciones del tambor de la mezcladora y la velocidad de rotación de este. Otros factores que necesitan ser tomados en cuenta son el volumen del concreto mezclado relacionado con las dimensiones del tambor de la mezcladora, la cantidad de tiempo entre el proporcionamiento y el mezclado, y el diseño, configuración y condiciones del tambor y de las paletas de la mezcladora.

Para certificar un intercambio de materiales un extremo a otro durante el momento del mezclado del volumen de concreto, es necesario contar con mezcladoras aprobadas, y operadas correctamente.

Si el concreto has sido mezclado adecuadamente, el muestreo realizado en diferentes porciones de la mezcla tendrán las mismas características en masa unitaria, contenido de aire, asentamiento y contenido de agregado grueso. Existen diferentes formas de mezclar el concreto, entre las más comunes encontramos:

- Mezclado estacionario.
- Concreto premezclado.
- Concreto mezclado en dosificadora móvil.
- En mezcladora de alta energía.

Aunque no exista una manera perfecta para transportar y manejar el concreto, contar con una planificación anticipada puede ayudar a la elección del método adecuado para evitar contratiempos. Dicha planeación deberá considerar los retrasos, endurecimiento y secado temprano, y segregación de la mezcla de concreto, ya que cualquiera de las anteriores podría afectar seriamente la calidad del proyecto terminado.

Con el paso de los años han mejorado las especificaciones y el desempeño de los equipos de transporte y manejo del concreto. Pero ninguna tecnología nos llevara a obtener mejores resultados, si no se contamos con una adecuada planificación.

c. Colocación y Trabajabilidad

El concreto deberá ser vertido sin interrupciones en un lugar cercano a su posición final. Por lo general colocado en capas horizontales con un espesor uniforme, consolidando adecuadamente cada capa, teniendo en cuenta que la velocidad de colocación será la adecuada para que la capa inferior del concreto no haya fraguado cuando ya se coloque la siguiente. De esta manera se evitan filtraciones, fisuras y juntas frías, producidas al colocar un concreto fresco sobre un concreto endurecido.

Cuando se habla de trabajabilidad se refiere a la facilidad de colocación, consolidación y acabado del concreto fresco y el nivel de resistencia a la segregación. Además, durante el transporte y el manejo no deben segregarse ninguno de sus componentes.

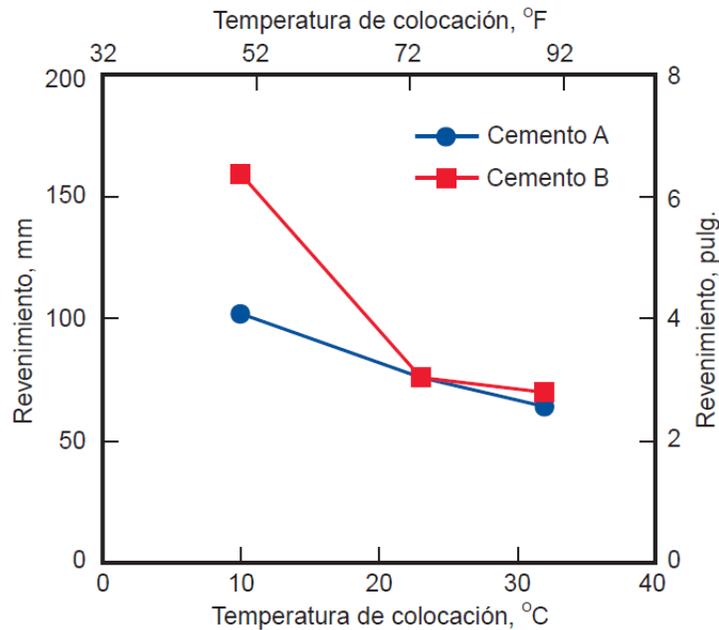
Por medio de los métodos de colocación, tipo de consolidación y el tipo de concreto, se logra controlar el grado de trabajabilidad que se requiere para lograr una adecuada colocación. Se requerirán diferentes niveles de trabajabilidad según el tipo de colocación que se utilice.

La trabajabilidad del concreto está influida por los siguientes factores:

- 1) Método y duración del transporte.
- 2) Cantidad y características de los materiales cementantes.
- 3) Consistencia del concreto (Asentamiento medido con el cono de Abrams).
- 4) Tamaño, forma y textura superficial de los agregados finos y gruesos.
- 5) Aire incluido (Incorporado).
- 6) Cantidad de agua.
- 7) Temperatura del concreto y del ambiente.
- 8) Aditivos químicos.

La uniformidad en la distribución de las partículas del agregado y la presencia del aire incorporado ayudan considerablemente a la mejoría de la trabajabilidad y el control de la segregación de los componentes del concreto.

Figura 12: Grafico del efecto de la temperatura de colocación de la mezcla de concreto (puesto en obra) en el revenimiento o asentamiento (medido con el cono de Abrams) y la trabajabilidad relativa de mezclas de concreto elaboradas con diferentes cementos.



Fuente: Kosmatka, Kerkhott, Panarese y Tanesi (2004).

Al hablar de consistencia, segregación, movilidad, bombeabilidad, exudación (sangrado) y facilidad de acabado, nos referimos a propiedades relacionadas con la trabajabilidad del concreto. Para medir el asentamiento se utiliza el cono de Abrams, el cual es usado como medida de la consistencia o fluidez del concreto. Cuando se dice que un concreto tiene consistencia seca o rígida es porque presenta un bajo asentamiento, lo cual dificulta la colocación y la compactación y las partículas de agregados de mayor tamaño pueden llegar a separarse de la mezcla de concreto. No con decir esto se puede llegar a suponer que una mezcla más húmeda y fluida es más trabajable, ya que puede ocurrir segregación o formación de vacíos también en una mezcla fluida. Lo óptimo es que la consistencia de la mezcla sea lo más seca posible para permitir la colocación adecuada utilizando equipos de consolidación mecánica.

Algunos de los requerimientos básicos para la colocación del concreto son:

- 1) Preservar la calidad del concreto
 - Relación agua/cemento
 - Asentamiento
 - Contenido de aire
 - Homogeneidad

- 2) Evitar la segregación de los agregados
 - El manejo o la vibración no corrigen la segregación.
 - El concreto debe caer libremente.
- 3) Evitar el movimiento horizontal excesivo
- 4) Consolidar adecuadamente
- 5) Mantener suficiente capacidad de colocación de concreto
- 6) Selección el equipo adecuado para el tipo de concreto a utilizar

d. Exudación y Asentamiento

Se conoce como exudación a la aparición de una pequeña capa de agua en la superficie del concreto recién colocado. Esto ocurre por el asentamiento de las partículas sólidas (especialmente agregados y también puede ser cemento) y la migración del agua a la superficie.

Figura 13: Exudación del concreto en la superficie del concreto recién colocado en una losa de pavimentación.



Fuente: Propia (2015).

La exudación en las mezclas de concreto es normal y no debería de disminuir la calidad del concreto con una apropiada colocación, acabado y curado. Para el control de la fisuración por contracción plástica, una cantidad de exudación es ventajosa. Al contrario, exudación excesiva aumenta la relación agua-cemento en la parte superior; lo que puede provocar una capa superficial débil y poco durable, sobre todo cuando se da el acabado cuando el agua de exudación aún se encuentra en la superficie. Cuando ocurre un acabado anticipado en la superficie, pueden presentarse vacíos y bolsas de agua.

En el momento en que el agua de exudación se evapora, la parte superior del área endurecida quedara a un nivel más bajo que la superficie cuando fue

recién colocada. Esta disminución de alturas desde el momento de su colocación hasta el inicio del fraguado es conocida como contracción por sedimentación.

La tasa de exudación, la sedimentación total por unidad de peso del concreto original, se acrecienta con la cantidad inicial de agua utilizada, la altura del elemento de concreto y la presión. Para reducir la exudación es necesaria la utilización de una granulometría adecuada en los agregados, uso de aditivos químicos, aire incorporado, materiales cementantes suplementarios y cementos más finos. Es necesario elaborar un concreto con baja exudación para evitar la formación de bolsas de agua sobre todo en aplicaciones especiales que requieran cierto grado de impermeabilidad.

e. Consolidación

Cuando un concreto se encuentra recién mezclado, la vibración, interna o externa, hace que las partículas se muevan, reduciendo la fricción que existe entre ellas y permite la movilidad de un fluido denso. Debido a esta vibración es posible utilizar mezclas de concreto con un contenido mayor de agregados gruesos y menor contenido de agregados finos. Con una adecuada graduación de los agregados, cuanto mayor es su tamaño máximo, es menor el volumen que debe llenar la pasta y menor el área superficial para ser cubierta por esta, de manera será menor la cantidad de cemento y agua requeridos. Cuando se tiene un agregado con una granulometría bien controlada, su colocación es más sencilla y el concreto se consolida fácilmente. Si la consolidación es mala se obtiene un concreto poroso y débil, con durabilidad reducida.

La vibración mecánica, interna o externa según los requerimientos de la aplicación, ofrece muchas ventajas, haciendo económicamente viable la colocación de mezclas que no podrían consolidarse manualmente.

f. Hidratación, Fraguado y Endurecimiento

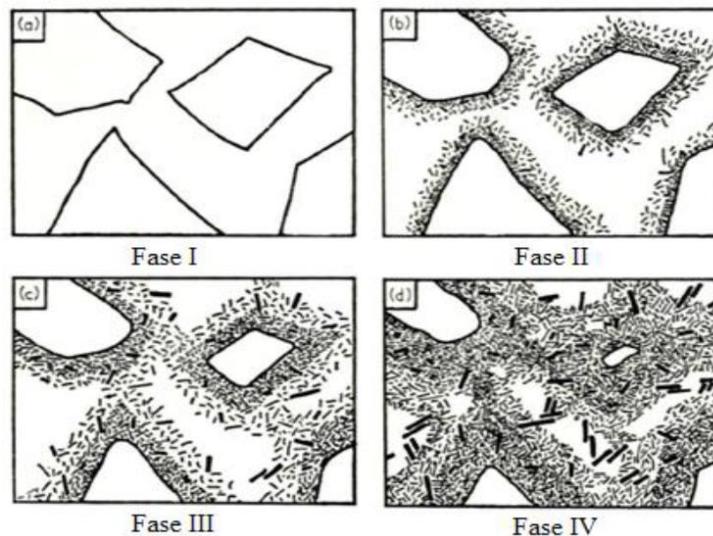
La adherencia de la pasta de cemento se debe a la reacción química entre el cemento y agua, también conocida como hidratación. Por cierto, es una reacción exotérmica, en la que se apoya el método de madurez, que es el corazón de este trabajo. El cemento es una mezcla de muchos compuestos químicos, siendo cuatro de ellos los que componen cerca del 90% de la composición del mismo. Estos representan un papel importante en el proceso de hidratación, y cada tipo de cemento los tiene en diferentes proporciones.

La hidratación del cemento puede ser analizada como una suma de las reacciones de cada uno de los compuestos individuales que contiene el cemento, que interactúan de manera conjunta.

Se presentan varias fases, durante el proceso de fraguado y endurecimiento, siendo estas:

- 1) Fase I: Se observan las partículas de clinker dispersas sin reaccionar en el agua.
- 2) Fase II: Pasada cierta cantidad de minutos, los productos de hidratación, crecen hacia dentro y hacia afuera de la superficie de cada partícula.
- 3) Fase III: Luego de unas horas interactúan las capas que recubren las diferentes partículas de clinker, convirtiéndose el conjunto en un gel continuo.
- 4) Fase IV: Al pasar los días surge la masificación de dicho gel.

Figura 14: Las fases que ocurren durante el fraguado y endurecimiento del concreto.



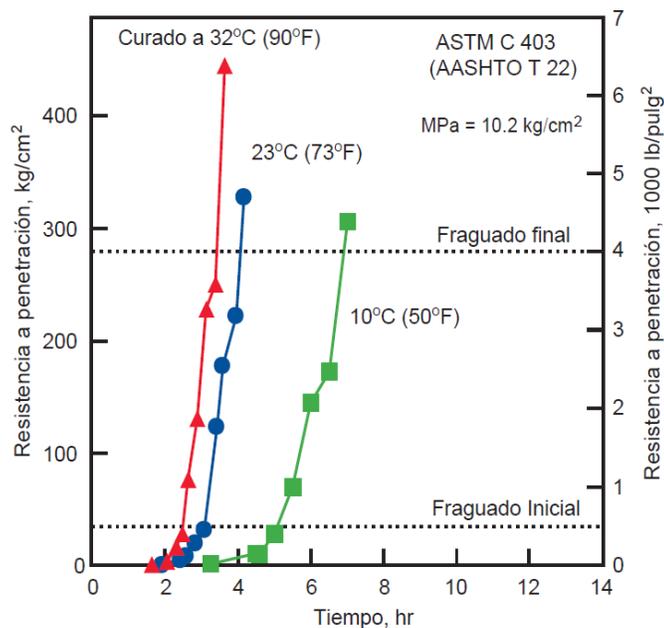
Fuente: Aguilar, Rodríguez y Sermeño (2013).

El concreto tendrá mayor resistencia, mientras menos porosa sea la pasta de cemento. Es por ello que al mezclar no debe utilizarse más agua de la necesaria para obtener un concreto plástico y trabajable. Inclusive, la cantidad de agua utilizada es mayor a la necesaria para la hidratación completa del cemento. En realidad es raro que ocurra una hidratación completa en concretos colocados en obras, debido a falta de humedad y por la cantidad de tiempo requerida para lograr una hidratación total.

Para una planificación adecuada de una construcción, suele ser ventajosa la comprensión de la cantidad de calor liberado por la hidratación del cemento. En época de invierno, el calor de hidratación protegerá el concreto contra daños ocasionados por temperaturas bajas. Por el contrario, las altas temperaturas pueden ser perjudiciales, para las estructuras de concreto.

Tener la noción de la velocidad de reacción entre el cemento y el agua es fundamental porque determina el tiempo de fraguado y el endurecimiento. La reacción inicial debe ser lo suficientemente lenta para que el concreto pueda colocarse y transportarse. Una vez el concreto ha sido colocado y debidamente acabado, se requiere un endurecimiento relativamente rápido. Con el fin de proporcionar un regulador de fraguado inicial del cemento, en el proceso de molienda de clinker, usualmente se le adiciona yeso. Otros factores que influyen en la velocidad de hidratación, son la finura del cemento, los aditivos y adiciones, la cantidad de agua y la temperatura de los materiales al momento de la mezcla.

Figura 15: Tiempo de inicio y fin de fraguado de una mezcla sometida a diferentes temperaturas.



Fuente: Kosmatka, Kerkhott, Panarese y Tanesi, Portland Cement Association (PCA), 2004.

1.4.2. Concreto Endurecido

a. Curado

El curado consiste en el mantenimiento adecuado de humedad y temperaturas satisfactorias en el concreto durante un periodo definido inmediatamente después de la colocación y el acabado, con el fin de que el concreto adquiera y desarrolle las propiedades deseadas. Es necesario enfatizar en la necesidad de un curado adecuado.

Los objetivos principales del curado son:

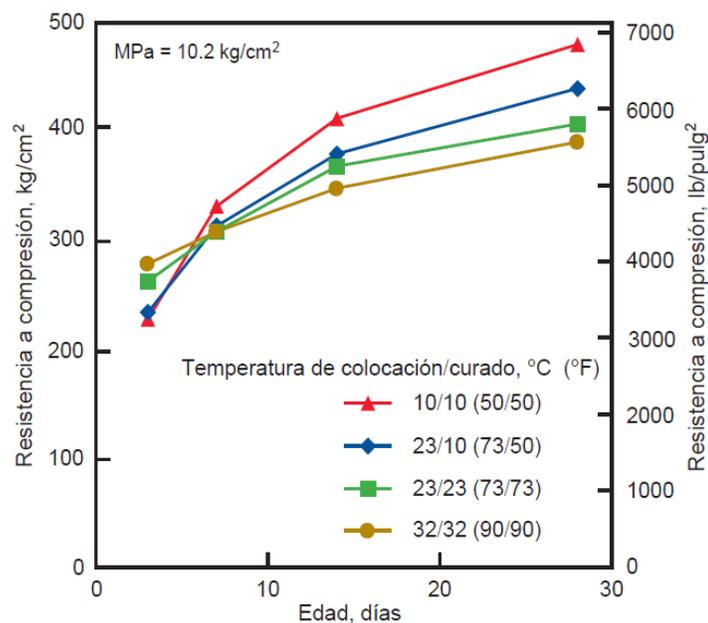
- 1) Prevenir la pérdida de humedad del concreto.

- 2) Mantener una temperatura favorable en el concreto durante un período definido.

Normalmente la resistencia del concreto aumenta con la edad, en tanto este permanezca húmedo o la humedad relativa del ambiente se encuentre por encima de 80%, que la temperatura del concreto sea favorable por encima de los 10°C y haya suficiente espacio para la formación de los productos de la hidratación. Las temperaturas menores a ese rango de temperaturas son desfavorables para el desarrollo de resistencia temprana. A temperaturas inferiores a los 5°C el desarrollo de la resistencia se retarda enormemente y a 0°C se desarrolla muy poca o ninguna resistencia.

De ocurrir una baja en la temperatura por debajo de los cero grados o si la humedad relativa disminuye por debajo de 80%, la hidratación y la ganancia de resistencia se retardan o interrumpen. Si después del periodo de secado se satura nuevamente el concreto, la hidratación comienza nuevamente, y la resistencia continúa aumentando. Sin embargo, lo óptimo es un curado húmedo constante, ya que una vez el concreto se seca completamente, es complicado lograr el saturarlo nuevamente.

Figura 16: Se muestra el efecto de las temperaturas sobre la resistencia del concreto, tanto de la temperatura de colocación como de la temperatura de curado, pudiendo observar que a temperaturas más frías se tendrán resistencias tempranas menores y resistencias mayores a altas edades.



Fuente: Kosmatka, Kerkhott, Panarese y Tanesi (2004).

Con un curado adecuado, el concreto se volverá más durable y resistente, tanto a los esfuerzos, como a la abrasión y otras acciones como el congelamiento y el deshielo.

Algunos de los métodos para un curado efectivo son:

- Inmersión.
- Inundación con agua.
- Rociado de niebla o aspersión.
- Cubiertas mojadas (costales, mantas de algodón, sacos de papel o alfombras).
- Cubiertas con tierra.
- Cubiertas con arena o aserrín.
- Cubiertas con paja o heno.
- Curado con vapor.
- Curado por métodos eléctricos, con aceite y con rayos infrarrojos.

Algunos materiales selladores que pueden ser utilizados son:

- Películas o láminas de plástico.
- Papel impermeable.
- Compuestos químicos que forman membranas de curado.

b. Velocidad de Secado del Concreto

El concreto no gana resistencia con el secado, para lograr esto el concreto necesita de humedad para hidratarse y continuar ganando resistencia. A medida que el concreto se va secando, la ganancia de resistencia cesa. El simple hecho tener un concreto seco no necesariamente quiere decir que este haya obtenido las propiedades físicas deseables.

Para conocer de una mejor manera las condiciones o propiedades físicas del concreto será de gran utilidad conocer la tasa de secado. Se sabe que cuando un concreto está recién colocado tendrá suficiente agua, secando del exterior hacia el interior, la ganancia de resistencia continuará siempre que la humedad relativa en el interior del concreto se encuentre por encima del 80%.

La superficie del elemento de concreto se seca de manera más rápida que su parte interna. Cabe mencionar que los elementos en campo tendrán diferentes tasas de secado que los elementos en ambientes de laboratorio, debiéndose a efectos del tamaño y las condiciones ambientales.

La humedad con la que cuente el concreto dependerá de sus componentes, cantidad de agua, condiciones de exposición y tamaño del elemento. El tamaño y forma del elemento representan un papel importante en la tasa de secado del concreto. Un elemento con área superficial grande con relación a su volumen, como el concreto colocado en pisos, secará de manera

más rápida que un concreto colocado con volumen masivo, como la fundición de un elemento de cimentación.

Existen diversas propiedades del concreto que son afectadas por la cantidad de humedad, como es su elasticidad (o rigidez), su condición aislante, su resistencia al fuego, su resistencia a la abrasión, su conductividad eléctrica, su resistencia al congelamiento, su resistencia a los destornillamientos y su resistencia a la reactividad álcali-agregado.

c. Resistencia a Compresión

Al referirnos a la resistencia a la compresión hablamos de la medida máxima de la resistencia a la carga axial de especímenes de concreto. Esta medida usualmente se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm^2), megapascuales (MPa) o libras por pulgada cuadrada (lb/pulg^2). Para las pruebas normalmente se utiliza la edad de 28 días, aunque se pueden usar otras edades según sea su requerimiento. Por lo regular la resistencia a los 7 días se estima como un 75% de la resistencia a 28 días, y las resistencias a los 56 y 90 días serían normalmente de 10% y 15% mayores respectivamente que la resistencia a 28 días. Un megapascal equivale a la fuerza de un newton por cada milímetro cuadrado (N/mm^2) o 10.2 kilogramo-fuerza por centímetro cuadrado (kg/cm^2).

La resistencia a compresión real del concreto f'_{cr} idealmente debiera exceder la resistencia a compresión especificada f'_c . La resistencia a compresión que el concreto alcanza está influenciada por la relación agua-cemento, por su nivel de hidratación, por las condiciones de curado, por las condiciones ambientales y por la edad de ensayo del espécimen. La resistencia de un concreto aumentaría con la disminución de la relación agua-cemento. Estos factores también afectan a la resistencia a la flexión, a la tensión y a la adherencia entre concreto y el acero de refuerzo.

Con el fin de proporcionar cierta trabajabilidad se puede incorporar aire en los concretos. Sin embargo, los concretos con aire incorporado requieren una relación agua-cemento menor que un concreto sin aire con el fin de equiparar la resistencia con estos últimos, ya que la incorporación de aire en mezclas de concreto normalmente reduce la resistencia mecánica.

Para la determinación de la resistencia a compresión se realizan ensayos en probetas cilíndricas de 150 mm (6 pulgadas) de diámetro y 300 mm (12 pulgadas) de altura o también en cilindros de menor tamaño como lo son los de 100 x 200 mm (4 x 8 pulgadas), según la normativa NTG 41060 (ASTM C192/C192M). La resistencia es una propiedad esencialmente física y usualmente es utilizada para el diseño de miembros estructurales como son edificios y puentes, entre otros.

Figura 17: Realización de un ensayo de resistencia a la compresión de un espécimen cilíndrico de 150 x 300 mm (6 x 12 pulgadas).



Fuente: Propia (2015).

La resistencia a la flexión o módulo de rotura según la normativa NTG 41017 h2 (ASTM C78), es utilizada normalmente para el diseño y aceptación de pavimentos y losas sobre una superficie. Como la resistencia a compresión resulta más sencilla de obtener, esta puede ser utilizada como índice de la resistencia a flexión, una vez que una relación empírica haya sido establecida para los materiales y elementos involucrados en una mezcla de concreto.

Figura 18: Realización de un ensayo de resistencia a la flexión de una viga de concreto, pudiendo observarse la maquinaria requerida para este ensayo.



Fuente: Propia (2015).

La resistencia a flexión de concretos de peso normal es usualmente 0.7 a 0.8 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión en megapascales o de 1.99 a 2.65 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión en kg/cm^2 .

d. Otros Tipos de Resistencia del Concreto

La resistencia a la tensión del concreto es aproximadamente de 8% a 12% la resistencia a la compresión. Usualmente es estimada siendo de 0.4 a 0.7 veces la raíz cuadrada de la resistencia a compresión en megapascales y de 1.3 a 2.2 veces la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión en kg/cm^2 .

La resistencia a esfuerzos por cortante o corte es de 8% al 14% de la resistencia a la compresión.

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

Existen algunas correlaciones discutidas en normativas internacionales de construcción como la ACI 318. Dichas correlaciones entre resistencia a la compresión y resistencia a flexión, tensión, torsión y corte variaran según la

configuración particular del concreto y las condiciones ambientales a las que se encuentre.

e. Masa Unitaria

La masa unitaria de un concreto está relacionada con la cantidad y densidad de los agregados utilizados, con la cantidad de aire atrapado o incorporado y la relación agua-cemento de la mezcla. Se debe considerar que el tamaño máximo del agregado influye en la relación agua-cemento, porque al aumentar la cantidad de agregado, se reduce la pasta, por lo que se incrementa la masa unitaria.

El peso del concreto seco es igual al peso del concreto fresco menos la cantidad de agua que se evapora durante el proceso de curado y secado del concreto. Una porción del agua de la mezcla del concreto reaccionará con el cemento en el proceso de hidratación, otra parte es retenida en los poros del concreto y no se evapora en condiciones normales. La cantidad de la evaporación del agua de mezcla dependerá de las características de absorción de los agregados y del tamaño y la forma de los elementos de concreto.

Según las necesidades, se podrán elaborar concretos especiales de masa unitarias muy variadas. Estos pueden ser desde concretos aislantes livianos con masa unitarias de 240 kg/m^3 hasta concretos pesados con masas unitarias tan bajas como 6000 kg/m^3 .

f. Estabilidad de Volumen y Control de Fisuración

El comportamiento del volumen de un concreto es variable según las condiciones de temperatura, humedad y esfuerzos de tensión a los que esté sometido.

Al encontrarse un concreto en continua hidratación este tenderá a dilatarse, y por el contrario, al permitir el secado tenderá a contraerse. El contenido de agua en el concreto fresco o recién mezclado influye de manera significativa en la magnitud de la contracción.

Aunque también estará relacionada con:

- 1) Proporciones de los agregados.
- 2) Propiedades de los agregados.
- 3) Tamaño y forma del elemento fundido.
- 4) Humedad relativa y temperatura del ambiente.
- 5) Método de curado.
- 6) Grado de hidratación.
- 7) Tiempo de curado.

Las fisuras en el concreto pueden estar relacionadas con:

- 1) Los esfuerzos de tensión por la aplicación de carga.
- 2) Los esfuerzos de tensión ocasionados por la contracción en el secado o cambios de temperatura cuando el concreto tiene alguna restricción.

La contracción en el concreto no puede ser evitada, es por ellos que se utiliza armadura de acero de refuerzo en sitios específicos de la estructura o se hacen cortes de juntas para inducir las fisuras en el lugar deseado para que estas no salgan aleatoriamente.

Las tensiones ocasionadas por cambios en las temperaturas ambientales también pueden causar fisuras, principalmente a edades tempranas. Una fisura normalmente se presentara en la superficie del elemento.

g. Durabilidad del Concreto

La durabilidad en el concreto es la capacidad que este tiene de resistir las acciones del ambiente, ataques químicos y la abrasión, conservando sus propiedades y características. Cada tipo de concreto se comporta de manera diferente. Su durabilidad y la vida útil del concreto está relacionada con:

- 1) Los componentes del concreto.
- 2) El proporcionamiento de la mezcla.
- 3) El método de colocación del concreto.
- 4) El método de curado del concreto.

1.4.3. Pavimentos de Concreto

Según el documentos para construcciones de pavimentos del Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto, IMCYC 2014, usualmente al referirnos a pavimento, estamos hablando de una estructura compleja de obra vial, la cual está compuesta de una serie de capas de diferente materiales que distribuyen y transfieren las cargas de transito al terreno natural sobre la cuales fueron colocadas. Su función es proporcionar una superficie adecuada y firme sobre la cual puedan transitar los vehículos, logrando un desplazamiento en menor cantidad de tiempo, con seguridad y con comodidad en comparación con una superficie que no tenga pavimento.

Estos suelen clasificarse en dos tipos según la manera en como distribuyen sus cargas y los materiales que componen su carpeta de rodadura. Suelen ser:

- Pavimentos Flexibles (Asfálticos).
- Pavimentos Rígidos (de Concreto Hidráulico).

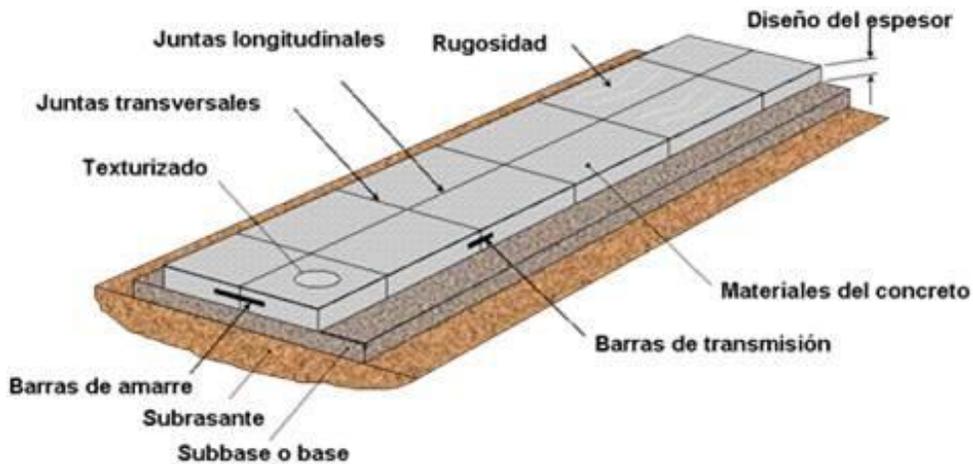
La determinación del tipo de pavimento que se utilice, intervendrán factores como las características del tránsito, la cantidad de vehículos, el periodo de vida útil, el presupuesto con que se cuente y las comodidades que se quieran brindar a los usuarios.

El presente proyecto, en el que se basó el presente estudio, se trabajó en pavimento rígido de concreto hidráulico, es por ello que el enfoque será sobre dicho tipo de pavimento.

Un pavimento de concreto hidráulico consiste en losas de concreto colocadas sobre una base granular, la cual puede o no ser estabilizada. La base a su vez es apoyada sobre una sub-rasante o sobre el suelo natural, que debe estar convenientemente preparado según los cálculos del diseñador.

El pavimento rígido es una estructura que tiene una alta resistencia a la flexión. Las losas de concreto transmiten las cargas de manera uniforme sobre una superficie mayor al área de contacto del neumático de los vehículos con el pavimento, reduciendo así los esfuerzos, de manera que se puede asimismo reducir el espesor de las capas inferiores. En general, un pavimento rígido está compuesto por las siguientes capas:

Figura 19: Composición de las capas de un pavimento rígido.



Fuente: Herrera (2015).

a. Capa Sub-rasante

Constituye el terreno que da soporte al pavimento. Cumple con la función de ser un apoyo para las capas superiores del pavimento, pudiendo resistir los esfuerzos transmitidos por dichas capas bajo cualquier condición de humedad. La sub-rasante puede ser del terreno natural, debidamente delimitado y compactado, o bien, si el terreno natural no cumple con las especificaciones o requerimientos del diseño, este es sustituido por un material de relleno que proporcione las características adecuadas. Dichos requerimiento a cumplir son

proporcionados por las Especificaciones Generales para la Construcción de Carreteras y Puentes de la Dirección General de Caminos de Guatemala, mejor conocidas como “Libro Azul”.

b. Capa Base

Es una capa de materiales pétreos de buena graduación construida sobre la sub-rasante. Esta capa, al igual que la anterior, deberá cumplir con los requisitos de calidad y compactación a que se hace referencia para la capa sub-rasante. En el caso de pavimentos de concreto, en muchos casos resulta conveniente colocar una capa de base cuando las especificaciones para pavimentos son más exigentes.

c. Capa de Rodadura

En un pavimento rígido, esta capa de la estructura está constituida por las losas de concreto hidráulico, que es el área superficial en donde transitan los vehículos que hacen uso de la vía.

Esta capa se caracteriza por aportar la mayor capacidad de carga de toda la estructura, debido a su resistencia a flexión elevada y, a su módulo de elasticidad que es significativamente mayor al de los otros materiales que conforman las capas inferiores del pavimento.

Aparte de las características estructurales que un pavimento rígido pueda proveer, debe proporcionar, además, seguridad y comodidad a los usuarios de la vía y que estas permanezcan durante el periodo de vida para el que se diseñó.

d. Hombro

Un hombro en un pavimento rígido se ubica en la parte externa de la vía y no forma parte de los carriles principales de circulación. En pavimentos rígidos, generalmente se diseñan para fungir como soporte lateral para el pavimento y usualmente tendrán el mismo espesor que las losas. Los hombros también permiten que un vehículo tenga espacio para detenerse en la orilla de la carretera por alguna emergencia o desperfecto mecánico.

1.4.4. Proceso Constructivo de los Pavimentos de Concreto

El proceso de construcción de un pavimento de concreto, sigue la secuencia a continuación:

- o Capa Sub-rasante

- a. Remoción y despeje del área de trabajo

En este paso será necesario retirar fragmentos de rocas, raíces de árboles de gran tamaño, o cualquier objeto que intervenga en el paso de la vía del futuro proyecto. En algunos casos puede ser necesaria la utilización de maquinaria pesada para la remoción de grandes objetos.

- b. Escarificación

El procedimiento consiste en disgregar la superficie a una profundidad especificada, permitiendo que el suelo adquiera una condición suelta. Para esta actividad se utilizan motoniveladoras para suelos con barras escarificadoras. Si es necesaria la remoción de roca, se sugiere la utilización de rippers.

- c. Extracción

En esta etapa se utilizan cargadores frontales, bulldozers o motoniveladoras, para mover grandes volúmenes de material. Por el contrario cuando estos volúmenes son pequeños, se puede hacer uso de tractores agrícolas con un cargador frontal incorporado.

- d. Transporte

El proceso consiste en mover los suelos que han sido recortados o trasladar los volúmenes de material necesario hacia el sitio de trabajo, lo que generalmente se realiza por medio de camiones de volteo.

- e. Mezclado, homogenización y distribución

En esta etapa usualmente se utilizan motoniveladoras para realizar el mezclado y la homogenización, así como también el extendido de los materiales.

- Capa Base Estabilizada con Cemento

Esta capa del pavimento es un material pulverizado mezclado con cantidades medidas de cemento y agua, compactado a un peso volumétrico seco máximo. Conforme el cemento se hidrata, la mezcla de materiales endurece.

Según las características de cada proyecto se determina la cantidad necesaria de cemento para una mezcla, aunque en zonas urbanas por lo general se emplea entre 2% y 3% de cemento.

La base se comporta como un material estructural, con propiedades que dependerán del tipo de suelo, la cantidad de cemento, las condiciones de curado y su edad. Es común encontrar en ellos resistencias a compresión a 28 días, en especímenes saturados, entre 21 kg/cm² y 56 kg/cm² y un módulo de elasticidad para la misma edad del orden de 1×10^4 . Las resistencias pueden ir aumentando con la edad y con la condición de curado.

Entre la resistencia a compresión y la resistencia a flexión siempre existirá una correlación, que deberá calcularse por cada proyecto y por cada conjunto de materiales.

En la secuencia constructiva general se trabajaron tramos de 110 metros de longitud por 4 a 7 metros de ancho, para poder terminar en un mismo día. Se procede a escarificar el material a ser estabilizado, tomando en cuenta que si este se encuentra muy seco se debe aplicar un primer riego de agua. Se mezcla la cantidad de cemento requerida, según el porcentaje de cemento calculado, pudiendo hacerse de forma manual o maquinaria. Se aplica una cantidad de riego agua recomendada por las pruebas de laboratorio, a fin de obtener los pesos volumétricos secos máximos que representan la densidad máxima del material.

Posterior a ello se riega agua en dos o tres pasadas, seguida del arado de disco para uniformizar la mezcla de la base. Aplicando el primer acomodo del material con ayuda de maquinaria. Luego de ello se realiza el perfilamiento y bombeo con ayuda de un tractor equipado con cuchillas en la parte trasera, inclinadas un 2%, aplicando agua durante el proceso para la compensación de la pérdida de humedad.

Para finalizar la compactación, a manera general, se darán pasadas con rodillos vibratorios metálicos de 4.50 toneladas de peso de la siguiente manera:

- 1) 2 pasadas en modalidad estática.
- 2) 2 pasada a media vibración.
- 3) 2 pasadas a vibración completa.
- 4) 1 pasada en modalidad estática, a fin de dar el acabado de la superficie.

Durante el proceso de compactación se irá verificando que la capa tenga un espesor uniforme, y el número requerido de pasadas para lograrlo. Se deberá ser igual o menor que 15 centímetros si se pretende extender la mezcla en una sola capa.

Para finalizar el proceso de esta capa se debe proteger la mezcla se pérdida de humedad, ya que requiere de una cantidad de humedad mínima para facilitar la hidratación del cemento. Se proporciona un riego de material bituminoso, en este caso, emulsión asfáltica. Se puede utilizar también papel impermeable, tira de plástico, paja o arena humedecida por lo menos dos veces al día.

En el caso de utilizar materiales bituminosos como las emulsiones asfálticas, se utilizara una proporción típica de 0.70 l/m² a 1.4 l/m², procurando que la superficie no tenga partículas secas sueltas y extrañas. Previo a la colocación de este material, se deberá humedecer un poco la superficie a curar.

Posterior a la colocación del material bituminoso, cuando este en un punto adecuado, se verterá, en la superficie una capa delgada de arena (aproximadamente de 1 centímetro de espesor) la que será el medio de absorción de la emulsión asfáltica que no fue absorbida por la base.

- Capa de Rodadura (Losa de Concreto Hidráulico)

Los requisitos básicos para la construcción de las losas e concreto de un pavimento dependerán de las características generales, disponibilidad de materiales y condiciones del proyecto en particular. Sin embargo se cuenta con ciertos lineamientos básicos que se detallan a continuación para el proceso de colocación de concreto con formaleta deslizante que se utilizó en el proyecto VAS.

- a. Tendido de Línea Guía

Contando con los estudios previos de topografía y el diseño específico del pavimento de concreto, se procede a colocar cada una de las barras o pines correspondiente. Normalmente se colocan a una distancia de 1.50 metros entre sí, y a una distancia de 25 centímetros del borde de la losa, siendo clavadas a lo largo del tramo carretero que se colocara ese día. Posterior a la colocación de las barras se procede a la colocación de los brazos que sostendrán la línea guía, esta mantendrá los sensores en la altura y en la dirección de la pavimentadora, por ello será importante su adecuada nivelación. La línea guía que se coloque la cual puede ser de alambre, nylon tejido, cable, cuerda de polietileno o cualquier otro material similar.

b. Colocación del Geotextil.

Una vez terminada la construcción y nivelación de la capa de base, se procede a la limpieza del área de colocación, por medio de barredoras, sobre todo de la arena colocada con el fin de absorber la emulsión que la base no fue capaz de absorber.

Posterior a ello se coloca una tela geotextil no tejida entre la capa de la base triturada estabilizada con cemento y la capa de rodadura de concreto hidráulico. Esta tela geotextil se coloca como parte del diseño del pavimento en este proyecto en particular. Este paso no es generalizado para todos los proyectos de pavimentación, sino depende del diseño y de las condiciones particulares del proyecto.

Según estudios la colocación de este material en la interface de las capas, proporciona las siguientes características y propiedades:

- 1) Separación ente capas, previniendo la aparición de fisuras debidas a alabeos, ya que por medio de esta separación entre ellas existe un acomodamiento de los movimientos normales de cada capa.
- 2) Propiedades drenantes, permitiendo la recolección del agua entre las capas dirigiéndola hacia las cunetas laterales.
- 3) Provee una adecuada amortiguación, proporcionando un soporte adecuado que ayudara a la reducción de los esfuerzos en todo el sistema.
- 4) Ayuda a evitar la pérdida de finos que pueda presentarse debido a los esfuerzos que provocan las cargas de tránsito en el pavimento.

En este proyecto se utiliza el geotextil HaTe 550, marca Huesker, el cual cumple con los requisitos y características necesarias.

c. Colocación del Refuerzo Longitudinal

Habiendo colocado el geotextil sujetado a la base por medio de grapas, se procede a colocar las de barras de sujeción en sentido transversal entre losas, colocadas sobre canastillas de acero. En los tramos de ancho completo, es decir 7.20 metros de ancho, como caben 4 losas es ese ancho, se colocan 3 series de barras transversales, una serie sobre la línea central se la vía, que sujeta las dos losas centrales y las otras dos series para sujetar las losas centrales con las losas de cada extremo. En tramos más cortos, de 3.50 metros de ancho, en que caben solamente 2 losas en ese ancho, se coloca una serie de barras de sujeción justamente en la línea central sujetando las dos losas entre sí.

d. Fabricación del Concreto

Las plantas de producción de concreto premezclado deben tener la capacidad adecuada según la velocidad de colocación del concreto que tenga el equipo de formaleta deslizante utilizado en el proyecto. Para el diseño del concreto y su producción se deberán respetar normativas internacionales para poder garantizar la calidad del trabajo final.

e. Transporte de la Mezcla

El transporte de la mezcla hacia el sitio de colocación para una pavimentación de alto rendimiento, debe ser mediante camiones de volteo. Se podrían utilizar camiones mezcladores para proyectos urbanos de menor rendimiento.

Para camiones de volteo, en general, se tiene una restricción de distancia de acarreo entre 10 y 20 kilómetros, siempre que los tiempos no superen los 30 minutos.

Cuando se utilizan camiones mezcladores, en proyectos más pequeños, la distancia de acarreo se incrementa con la condición que siempre se verifique la mezcla a su llegada al área de colocación. Para ello pueden incluirse aditivos superplastificantes diseñados con el fin de mejorar la trabajabilidad de la mezcla a la hora de ser colocada.

f. Colocación y Compactación

Para esta etapa se debe tomar en cuenta que se depositara el material directamente sobre la base preparada. La mezcla debe ser distribuida con ayuda de palas en obras pequeñas, pero en el caso de obras masivas se hará mediante el tornillo sin fin que poseen todas las pavimentadoras de formaleta deslizante de alto rendimiento.

Para esta etapa, existen varias maneras de compactar el concreto, entre los más utilizados en pavimentaciones son:

- Métodos tradicionales (Formaletas metálicas, vibradores de contacto o superficiales).
- Reglas Vibratorias.
- Vibradores de contacto o de placas.
- Vibrador de rodillos.
- Vibradores de inmersión.
- Vibración externa (Pavimentadoras mecanizadas por medio de formaletas deslizantes).

En el caso de este proyectos de gran envergadura, como es el proyecto VAS, solo pueden lograrse altos rendimientos si se utiliza, de

forma exclusiva, una pavimentadora mecanizada formaleta deslizante, que realiza el trabajo por medio de extendedoras de concreto equipadas con: tornillo sin fin, barra enrasadora, vibradores, apisonadores, placa niveladora, allanadora de terminado, entre otros equipos.

. Este tipo de maquinarias de alto rendimiento, cuenta con marcos que sostienen baterías de vibradores de inmersión montados de manera oblicua o en forma de L. Los marcos pueden moverse de manera vertical para controlar la profundidad de vibrado.

Los equipos básicos cuentan con grupos de 5 a 6 vibradores para anchos de 3.5 metros. La frecuencia de vibración se ajusta de 8,000 a 12,000 R.P.M y debe ser uniforme para cada uno de los vibradores. El vibrado sigue una distribución determinada por el tornillo sin fin.

Para anchos mayores, de alrededor de 7 metros como en el proyecto Vas, los marcos donde son montados los vibradores deben tener una anchura y geometría suficiente, de maneras que puedan colocarse 14 vibradores convenientemente espaciados.

Actualmente existen equipos de pavimentación más modernos, de 7.3 metros de ancho nominal, con 15 vibradores hidráulicos internos, trabajando a 10,000 R.P.M. Cuentan con hasta 20 circuitos para los vibradores con válvulas de control de flujo individuales, permitiendo un control más exacto del proceso de vibrado. También cuentan con sistemas automatizados de control vertical.

El tipo de trabajo que ejecuta el equipo de pavimentación, es el siguiente:

- 1) El concreto es vaciado en la parte frontal de la máquina, por medio de camiones de volteo, luego el tornillo sin fin, en la parte inferior y frontal de la pavimentadora distribuye la mezcla de concreto en todo el ancho del equipo y a lo largo del tramo.
- 2) Al avanzar la pavimentadora, se acciona una compuerta de paso, la cual deja ingresar la cantidad de mezcla requerida para el espesor del pavimento.
- 3) Los vibradores ubicados en la maquina se accionan a fin de hacer fluir el concreto e ir compactándolo.
- 4) Al mismo tiempo, la acción de la cuchilla apisonadora, trabaja en parte como un elemento segregante, en el sentido que parte del mortero sube a la superficie, para lograr un mejor acabado de la superficie, evitando que el agregado grueso pueda subir a la

superficie, provocando que sean arrastrados y dejen una textura superficial no deseada.

- 5) Para terminar, la placa terminadora y las formaletas deslizantes, ubicadas a cada lado de la máquina, dejan una sección pavimentada casi concluida.
- 6) Ubicada en la parte posterior de la pavimentadora se encuentra la llana o plancha, que mecánicamente, deja una sección prácticamente acabada. Trabaja con un movimiento oscilatorio, desplazándose en dirección transversal a la dirección de la vía.

El control de dirección y rasante es por medio de un sistema automático que la pavimentadora tiene en los extremos de la máquina. Este emite una señal para que la maquina pavimentadora se desplace proporcionando los espesores de losa especificados.

Posterior al trabajo de la pavimentadora mecanizada, son necesarios los acabados finales de la losa. Ya que la llana o plancha deja pequeñas irregularidades, que requerirán de pequeños ajustes.

En esta fase el personal marca las posiciones de cortes transversales y de la colocación de barras de sujeción entre la losa de pavimento y el hombro del tramo.

g. Acabado Superficial y Texturizado

La etapa determinación superficial, posterior al paso de la pavimentadora mecanizada, se realiza de manera manual, y los pasos requeridos en dicho proceso son:

- 1) Llana para Acabado Lateral: en este paso se proporciona el acabado lateral del tramo, corrigiendo los filos de la losa.
- 2) Súper Flat Pavers (Bump Cutter): es utilizada para quitar las irregularidades dejadas por la pavimentadora, proporciona una superficie uniforme de la losa.
- 3) Llana Big Blue (Planchón azul): se utiliza para dar el acabado final a la superficie de la losa.
- 4) Cepillo de Cerdas (Cepillo metálico): este cepillo cuenta con cerdas metálicas de geometría especificada, las cuales por medio de la inserción en el concreto fresco producen la macrotextura del pavimento.

En ciertos casos son adicionados compuestos diseñados para reducir la evaporación de la superficie del concreto. Se aplica al mismo tiempo que se hace el acabado superficial y antes de proceder al texturizado.

Todos los procedimientos realizados durante el proceso del acabado superficial y texturizado deben realizarse de manera que no se retrase la fase de curado, ya que de lo contrario aumenta la posibilidad del apareamiento de fisuras.

h. Curado

El curado se debe hacer para facilitar el desarrollo de la hidratación del cemento y disminuir los efectos de las contracciones debidas a las condiciones a las que se encuentra expuesto el concreto, que es lo que finalmente causa las fisuras indeseables. Esta etapa se ejecuta justo después del texturizado del pavimento de concreto.

Para un pavimento de concreto existen dos formas de curado, que son:

- 1) Método húmedo: consiste en el rociado o aspersión de agua, cubiertas mojadas, arena húmeda, entre otras.
- 2) Método de membranas: consiste en la aplicación o aspersión de compuestos químicos especiales que forman una membrana proteja sobre la superficie del concreto que contribuye al proceso de curado del mismo, evitando que la humedad se pierda rápidamente.

Este proceso debe iniciar lo más pronto posible, con el fin de proteger la superficie de nuestra estructura. En el caso de hacer el curado con ayuda de compuestos químicos, debe considerarse el uso adecuado de aspersores y aplicarlo cuando el concreto todavía tenga cierta humedad superficial.

Durante el periodo de curado debiera evitar el tránsito vehicular, si es posible durante los primeros 7 días.

i. Juntas de Control

La hechura de juntas de control en estructuras de concreto es uno de los procedimientos indispensables, sobre todo en proyectos de pavimentación con concreto. Conociendo que el concreto sufre cambios de volumen, relacionado con cambios de temperatura, puede necesitar de juntas que le ayude a disminuir los esfuerzos de tensión que ocurren en el

pavimento cuando estos movimientos están restringidos por el suelo y otros elementos que rodean este.

La junta es un corte realizado en el concreto con un espaciamiento y ubicación especificados. Las juntas son en realidad grietas artificiales o medios para reducir y controlar el agrietamiento en las estructuras de concreto.

Dichos cambios volumétricos debidos a condiciones de temperatura y humedad, hacen que las losas que constituyen el pavimento tiendan a sufrir esfuerzos de tensión, que se incrementan por la fricción que existe en la interface entre la capa de rodadura y la capa de la base. Cuando estos esfuerzos no son tomados en cuenta, pueden aparecer grietas sin control. La mejor manera de evitar estos agrietamientos es inducir la fisura en el lugar diseñado para aliviar los esfuerzos mencionados. Estas juntas normalmente se abren y cierran con los cambios de temperatura.

Las juntas, según el momento en que se realicen se pueden dividir en dos tipos:

1) Juntas en Estado Fresco

Esta puede realizarse por medio de la inserción de un dispositivo (PVC, metal, entre otros) o por medio de una guillotina especial. Siendo estos cortes utilizados en proyectos de menor magnitud y en los que no se cuenta con una alta exigencia en cuanto a la calidad de las juntas.

2) Juntas en Concreto Endurecido

Este corte debe realizarse previo a que exista una contracción natural del concreto. Se hacen con equipos provistos con discos abrasivos. Respetando las siguientes consideraciones:

- Disponer del suficiente equipo requerido, conforme al ritmo de colocación de la pavimentación.
- Cuando existan condiciones de temperatura elevada, se recomienda cortar una junta por cada tres juntas disponibles para disminuir la probabilidad de que se formen fisuras por contracción aleatoriamente. Luego habrá que cortar las juntas que quedaron pendientes.
- Una vez hecho el corte de las juntas, se deberá colocar la membrana de curado, pues esta pudo lavarse con el agua utilizada durante la operación de corte.

Las juntas de un pavimento de concreto se pueden dividir en tres grupos principales: de construcción, de expansión o aislamiento, y de construcción, las que se describen a continuación:

1) Juntas de Contracción

El propósito de estas juntas es aliviar los esfuerzos de tensión debidos a la contracción y alabeo que sufren las losas de concreto.

Los cortes de juntas se deben hacer a $1/4$ el espesor de la losa, o cuando se coloque una base estabilizada, el corte deberá ser de $1/3$ el espesor.

El corte debe ser hecho en el momento en que el concreto ya no se desportille y tenga una consistencia adecuada. El encargado de esta tarea debe evaluar la superficie del concreto y determina si es tiempo de cortar o no, siendo un método empírico. Depende de cada proyecto en particular, pero normalmente se cortan primero las juntas en sentido transversal.

Posteriormente se hacen los cortes longitudinales, los que permiten un movimiento tipo bisagra en el pavimento y controlan así los efectos de la deformación del pavimento. En las carreteras los cortes longitudinales se hacen a lo largo del eje central de la misma.

A pesar de haber cortado la junta, lo que induce una grieta que normalmente atraviesa el espesor total de la losa, la transferencia de cargas entre losas se mantiene debido a la trabazón de agregados en la parte inferior del concreto que no ha sido cortado. La distribución de este tipo de juntas dependerá principalmente del método de colocación de las losas. Según el diseño, también se pueden incluir barras de transferencia o dovelas para asegurar una transferencia de cargas adecuada entre losas.

En este proyecto no se utilizan barras de transferencia o dovelas para incrementar la transferencia de carga entre las losas. Las que se colocan son barras de sujeción en el sentido transversal, pero su función, más que de transferencia de carga, son para sujetar las losas entre si y evitar que se separen. La dimensión de las losas en este proyecto es de 1.80 metros en sentido longitudinal y 1.75 metros en sentido transversal.

2) Juntas de Expansión o de Aislamiento

Este tipo de juntas usualmente se construyen para proveer un espacio libre entre las losas y algunas estructuras para permitir movimientos al pavimento. Aunque no son utilizadas en los carriles principales de una pavimentación, suelen utilizarse cuando la losa tendrá contacto con un puente o una estructura fija distinta a lo que son las losas del pavimento. Este tipo de juntas se utilizan alrededor de estructuras fijas, como registros de pozos y tragantes de drenaje, en intersecciones T o en intersecciones no simétricas. Este tipo de junta no se corta con sierra y es colocada en todo el espesor de la losa, por lo tanto no provee transferencia de carga por trabazón de agregados como en las juntas de contracción, porque no es esa su función. Además, son mucho más anchas que las juntas de contracción que se han cortado con sierra en el concreto endurecido. Normalmente este tipo de juntas se protegen en la superficie con un sellador elastomérico adecuado para evitar entrada de agua y materiales extraños.

No es muy común hoy en día encontrar juntas de aislamiento en proyectos recientes de pavimentación, a menos que sea por razones expuestas anteriormente. Aunque cabe mencionar que este tipo de juntas suelen colocarse en aeropuertos para separar concretos nuevos de concretos viejos. Así como también entre rampas o vías de taxeo y la pista.

3) Juntas de Construcción

Este tipo de juntas se utilizan en interrupciones planeadas o no planeadas durante la colocación de concreto en una pavimentación, tal es el caso cuando se finaliza la jornada de trabajo.

Usualmente se colocan barras de transferencia de carga o dovelas, que es el caso del proyecto VAS, que utiliza dovelas en las juntas de construcción. No se utilizaron dovelas en las juntas de contracción.

No existe un periodo exacto para el corte de las juntas de control de una pavimentación de concreto hidráulico, y como se mencionó, depende mucho de la destreza del operador de corte. Sin embargo, es necesario que las juntas sean cortadas de manera correcta y mantenerlas en condiciones adecuadas. Un corte de juntas ejecutado incorrectamente, puede causar agrietamientos aleatorios, tanto en el sentido longitudinal como en el sentido transversal del pavimento. Es por ello que es buena idea programar los cortes tomando en cuenta las condiciones ambientales como la humedad, las variaciones en temperatura, y los tiempos de

fraguado de la mezcla; esto será de gran ayuda para entender mejor el periodo aproximado para la ejecución del corte ideal.

Según recomendaciones generales es necesario hacer los cortes dentro de las 6 a 20 horas posteriores a la terminación de la superficie, para así evitar el desportillamiento en los bordes de los cortes. Eso sí, entre 6 y 20 horas parece ser una cantidad de tiempo muy amplia, pero depende de muchos factores que influyen en este tiempo, en todo caso los cortes se deben ejecutar de la mejor manera posible, ni muy temprano, ni muy tarde. Contar con operadores de corte de mucha experiencia en un proyecto está muy bien; pero ¿Por qué no apoyarse también de métodos como el de estimación de resistencia por madurez para entender mejor este periodo ideal de tiempo de corte, que resistencia tiene el concreto al momento de corte y otros aspectos?

j. Sellado de Juntas

Este proceso requiere de una limpieza profunda y del secado adecuado de las ranuras que quedaron después del corte. La tarea anteriormente mencionada es vital para poder colocar luego el material de sello que protegerá la junta de materiales extraños y el ingreso de agua. Las características del sello dependen del tipo de aplicación que se hará, porque estos pueden aplicarse tanto en frío como en caliente, o incluso también pueden ser preformados.

Importante mencionar que el diseño del pavimento en el proyecto VAS, no considero el sello de juntas.

1.4.5. Apertura al Tránsito y Resistencia de Concreto

Según documentos la apertura al tránsito, antes de 1930, no era permitida hasta 21 días después de la colocación de las pavimentaciones, y comprendida entre el 1 de Junio y 1 de Septiembre, siendo el tiempo adicional determinado por el ingeniero del proyecto.

Esto cambio en el periodo entre 1930 y 1937 en donde la apertura al tránsito no se permitía hasta los 7 días después de su colocación. A partir de 1937, se determinó que la apertura se basaba en la resistencia a esfuerzos de flexión con un módulo de rotura de 500 Psi, permitiendo la apertura de los después de una edad mínima de 7 días para concretos estándar tipo C. Posterior a ello en 1972, se reduce a un periodo de 5 días para pavimentos de 9 pulgadas o mayores (aproximadamente 22 cm o más).

Fue en 1997 cuando el “Método de Madurez” para la determinación la resistencia surge como una opción para determinar la apertura optima al tránsito. Realizándose únicamente en países con un alto nivel de desarrollo en procesos constructivos. Es mediante la utilización de este método que el constructor tiene la posibilidad de abrir al tránsito un proyecto de pavimentación, en el punto exacto que este haya alcanzado una resistencia adecuada.

Según requisitos del método en países como Estados Unidos, cada estado contara con sus normativas propias por el comportamiento de los concretos según las condiciones específicas. Pero existen estándares para pavimentos de concreto elaborados con cementos portland, que determinan que para la apertura al tránsito de los mismos, utilizando pruebas destructivas de extracción de testigos, deben presentar una resistencia a la compresión de 3,000 Psi y una resistencia a la flexión de 500 Psi.

En muchos proyectos en países como Estados Unidos, en el estado de Iowa, en periodos de verano, la madurez del concreto es alcanza de 24 a 48 horas.

De utilizar el método de madurez, el tiempo de apertura estará determinado únicamente en el periodo exacto en que se alcancen las mismas resistencias listadas con anterioridad, tomando en cuenta que para esta prueba se requiere personal capacitado en la metodología, ya tomar una decisión errada para la apertura podría ser un atraso y representar perdidas económicas.

La apertura al tránsito puede será autorizada por el constructor para vehículos livianos y trabajos de las maquinaria de pavimentación, cuando se cuente con la resistencia de 3,000 Psi y mínimo una edad de 3 días después de la colocación, siempre y cuando se tomen las medidas de control necesarias.

MARCO II:
PLANTEAMIENTO DEL
PROBLEMA

2.1. DESCRIPCION DEL PROBLEMA

Debido a la creciente demanda en velocidad y exactitud que requieren hoy en día los proyectos de construcción en Guatemala, se han buscado metodologías diferentes a las existentes que solo nos proporcionan resistencia de condiciones ideales de laboratorio, sin tomar en cuenta que el concreto está sometido a la intemperie, afectado por factores climáticos que repercuten en el curado y por ende en la resistencia final del mismo.

Sabemos que las resistencias que un concreto puede alcanzar, si es sometido a condiciones de curado y temperatura controlada en laboratorio, serán indicativas pero no exactas de los valores reales que presente el concreto colocado en campo, así también sabemos que dicho método proporcionara información a edades específicas, por ejemplo 1, 3, 7, 14 y 28 días, no específicas para edades tempranas ni el comportamiento que tiene al incrementar su edad. De la misma manera, de ser necesarias más edades de ensayo, requerirá una alta cantidad de especímenes, lo cual genera costos elevados, así como el tiempo adicional que esto requiere.

Es por ello que surge la necesidad de la utilización de métodos alternativos, no destructivos, con resultados de resistencia representativos, y en tiempo real. Este es el caso de la Determinación de la Resistencia por el Método de Madurez del Concreto, utilizado en varios países gracias a su exactitud y simplicidad. Surge la idea de la validación de dicho método en Guatemala y, que mejor que desarrollarlo en un proyecto de gran impacto como lo es Vía Alternativa del Sur (VAS). Proporcionando así, a la industria de la construcción en general, una metodología de las etapas de laboratorio y campo requeridas, con el fin de utilizar el mismo método en otros proyectos de similar magnitud.

En general, se piensa que un proyecto de esta envergadura debiera requerir una cantidad extensa de días, para la habilitación de la estructura, de 7 hasta 21 días, incluso no es extraño que se proponga esperar hasta los 28 días para este efecto. Sin embargo, esto evita que puedan ejecutarse trabajos secundarios posteriores a la colocación del pavimento, genera molestias en los conductores por el bloqueo del paso hacia zonas comerciales o sectores de vivienda. ¿Qué tal si podemos habilitar la vía al tránsito días antes de lo previsto, debido a que el concreto ya está apto para recibir el tránsito de vehículos? Esto es lo que este método hace, ahorrar tiempo y dinero. Así que, nos enfocaremos en la determinación del tiempo óptimo de apertura al tránsito y, al mismo tiempo, estableceremos la ventana de corte de las juntas de contracción en el pavimento. Tomando como referencia especificaciones existentes, el periodo de apertura al tránsito de un pavimento debiera hacerse cuando el concreto tenga, como mínimo, una resistencia a compresión de 3,000 Psi o una resistencia a la flexión de 500 Psi.

De la misma manera, el método tiene un impacto al realizar los cortes de las juntas de contracción en un periodo adecuado de tiempo, ya que actualmente estas se ejecutan a través de métodos empíricos, no basados en una resistencia o temperatura

específica. Siendo ambas actividades procesos fundamentales en la construcción de un pavimento de concreto hidráulico. La determinación de los periodos adecuados reducirá contratiempos, imprevistos y a su vez pérdidas económicas que puedan generarse por diversas causas, incluyendo daño de la estructura en grandes tramos. Además, la reducción en tiempo de entrega de los proyectos carreteros representa una ventaja competitiva para los que construyen.

2.2. OBJETIVOS

2.2.1 Objetivo General

Implementar el método alternativo de madurez para la estimación de la resistencia del concreto en la estación 0+090, en el proyecto de pavimentación Vía Alterna del Sur, Guatemala.

2.2.2 Objetivos Específicos

- Establecer la relación resistencia-madurez de la mezcla de concreto en el laboratorio y del registro de la historia de temperaturas para el concreto utilizado en el Proyecto Vía Alterna del Sur (VAS), Guatemala.
- Aplicar la estimación de la resistencia del concreto a compresión y flexión por medio del método de la madurez a la apertura rápida al tránsito en proyecto de pavimentación.
- Establecer si por medio de la madurez del concreto, se puede determinar la resistencia óptima en el cual el concreto está apto para el corte de las juntas de contracción en pavimentos.

2.3. HIPÓTESIS

- ¿Es posible implementar una nueva metodología para la determinación de la resistencia del concreto para proyectos de construcción con concreto hidráulico en Guatemala?
- ¿Se puede conocer el periodo en el cual el concreto alcanza la resistencia especificada para la apertura rápida al tránsito de una pavimentación?
- ¿De llegar a conocer el comportamiento de la madurez del concreto en este proyecto, será posible determinar un rango de resistencia óptima para el corte de juntas de contracción en una pavimentación?

2.4. VARIABLES

- 2.4.1. Resistencia a Compresión
- 2.4.2. Resistencia a Flexión
- 2.4.3. Temperatura de Referencia
- 2.4.4. Edad Equivalente
- 2.4.5. Madurez
- 2.4.6. Función de Madurez
- 2.4.7. Índice de Madurez
- 2.4.8. Método de Madurez
- 2.4.9. Relación Resistencia-Madurez

2.5 DEFINICIÓN DE LAS VARIABLES

2.5.1. Resistencia a Compresión

Conceptual: este método de ensayo cubre la determinación de la resistencia a compresión de especímenes cilíndricos de concreto, tales como cilindros moldeados y núcleos perforados. Se encuentra limitado al concreto que tiene una masa unitaria mayor que 800 kg/m^3 (50 lb/pie^3). Este método de ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión a los cilindros moldeados o núcleos a una velocidad que se encuentra dentro de un rango prescrito hasta que ocurra la falla. La resistencia a la compresión de un espécimen se calcula dividiendo la carga máxima alcanzada durante el ensayo por el área de la sección transversal del espécimen. Esta medida usualmente se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm^2), megapascuales (MPa) o en libras por pulgada cuadrada (lb/pulg^2). Para las pruebas normalmente se utiliza la edad de 28 días, aunque se pueden usar otras edades según sea su requerimiento (COGUANOR NTG 41017 h1).

Operacional: utilizada para los procedimientos realizados en la calibración de la curva de madurez y posteriormente para la validación del método en campo. Se utilizara el ensayo de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos como lo dicta la normativa utilizada para este ensayo y se comparará con las especificaciones mínimas para la apertura al tránsito y establecimiento de la ventana de corte de juntas.

2.5.2. Resistencia a Flexión

Conceptual: este método de ensayo cubre la determinación del esfuerzo de flexión del concreto utilizando una viga simplemente soportada con cargas en los tercios de la luz. Los resultados se calculan e informan como el módulo de ruptura (COGUANOR NTG 41017 h2).

Operacional: es utilizada para el diseño de concreto de pavimentos, así como para la calibración de la curva de madurez y posterior validación del método en campo, también se compara con las especificaciones mínimas para la apertura al tránsito y establecimiento de la ventana de corte de juntas.

2.5.3. Temperatura de Referencia

Conceptual: es la temperatura que se resta de la temperatura medida en el concreto para el cálculo del factor temperatura-tiempo de acuerdo con la ecuación:

$$M(t) = \sum (T_a - T_o)\Delta t$$

La cual es una función de la madurez del concreto [COGUANOR NTG 41042].

Operacional: temperatura utilizada en los cálculos para el modelado de las curvas de calibración de la madurez del concreto, para el cálculo del factor tiempo-temperatura, la cual es obtenida gracias a los procedimientos realizados en la fase de laboratorio.

2.5.4. Edad Equivalente

Conceptual: es el número de días u horas a una temperatura especificada, requeridos para producir un valor de madurez igual al valor obtenido durante un periodo de curado a temperaturas diferentes de la temperatura especificada [COGUANOR NTG 41042].

Operacional: es la edad requerida por la ecuación de Arrhenius, ecuación (2), requerida para obtener el valor de madurez del concreto.

2.5.5. Madurez

Conceptual: es el grado o medida del desarrollo de una propiedad de una mezcla cementicia. Aunque se acostumbre a usar el término para describir el desarrollo de una resistencia relativa, también puede ser aplicada para describir la evolución de otras propiedades que son función de las reacciones químicas que ocurren en las mezclas cementicias. La madurez a cualquier edad depende de la historia del curado [COGUANOR NTG 41042].

Operacional: es el parámetro de medida utilizado en el método, el cual será utilizado con el fin de conocer el desarrollo de la resistencia de la mezcla de concreto estudiada.

2.5.6. Función de Madurez

Conceptual: es la expresión matemática que usa la medida de la historia de temperaturas de una mezcla cementicia durante el periodo de curado para calcular un índice que es el indicativo de la madurez al final de este periodo (COGUANOR NTG 41042).

Operacional: luego efectuados cada uno de los procedimientos en la fase de laboratorio, descritos en la metodología, se realizan los cálculos pudiendo obtener esta función matemática, que describe el comportamiento de desarrollo de la mezcla de concreto.

2.5.7. Índice de Madurez

Conceptual: es un indicador de la madurez que se calcula usando la función de madurez con la historia de temperaturas de una mezcla cementicia. El índice computado es indicativo de la madurez provista que ha tenido suficientes suministros de agua para la hidratación o para la reacción puzolanica de los materiales cementantes durante el tiempo usado en el cálculo. El factor de temperatura-tiempo y el equivalente de edad son dos índices ampliamente utilizados [COGUANOR NTG 41042].

Operacional: en este método existen dos índice de madurez: el factor temperatura-tiempo para la ecuación de Nurse-Saul y el de edad equivalente para la ecuación de Arrhenius respectivamente. Los cuales son los índices utilizados para la estimación del desarrollo de la resistencia del concreto, utilizando la función de madurez.

2.5.8. Método de Madurez

Conceptual: es una técnica para la estimación de la resistencia del concreto que se basa en la suposición de que las muestras de una mezcla de concreto dada alcanzan resistencias iguales así alcanzan a su vez iguales valores del índice de madurez [COGUANOR NTG 41042].

Operacional: esta es la metodología sobre la cual se basara el presente estudio, el cual se desarrolla gracias al conocimiento de las historias de temperatura del concreto, y el conocimiento de la relación resistencia-madurez. El cual obedece a la normativa internacional existente.

2.5.9. Relación Resistencia-Madurez

Conceptual: es la relación empírica entre la resistencia a la compresión de cilindros y el índice de madurez, que es obtenida del ensayo de muestras cilíndricas, a las cuales se les ha llevado un registro de su historial de temperaturas en el tiempo, hasta su ensayo (COGUANOR NTG 41042).

Operacional: esta relación se utilizó para estudiar el comportamiento del concreto en el laboratorio, basándose en resultados de especímenes cilíndricos y vigas, relacionando estos con los cambios de temperatura obtenidos.

2.6 ALCANCES Y LIMITACIONES

2.6.1 Alcances

La metodología de este procedimiento se utiliza para la determinación de resistencias en campo de colocaciones de concreto que permiten el inicio de actividades de construcción críticas, tal como lo es la apertura al tránsito de una pavimentación de concreto, siendo esto algo que beneficiaría a la mayoría de proyectos que utilizan concreto. Aunque cabe mencionar que en este caso en particular será aplicado únicamente para el proyecto Vía Alterna del Sur (VAS).

Es un método de determinación de resistencia, que puede proporcionar información del comportamiento del concreto a edades tempranas, resaltando también que representa las condiciones reales del concreto en campo, no como las de laboratorio, que no replican exactamente lo que sucede en campo. Además, no es un método destructivo, como son otros ensayos realizados al concreto.

Este método posee varias ventajas respecto al tiempo de realización, ya que con una calibración correcta, se puede conocer la resistencia en el tiempo exacto en el que se desee, contando únicamente con el registro de la evolución de las temperaturas del concreto, sin tener que realizar un ensayo, como por ejemplo, la prueba a compresión de cilindros para determinar su resistencia.

Entre los alcances más importantes de este trabajo de investigación, se contempla el cumplimiento de los objetivos planteados para el proyecto. Presentando un método alternativo para el control de la calidad en los procesos de constructivos de construcción de pavimentaciones de concreto hidráulico.

Entre los puntos más relevantes que busca alcanzar este proyecto de investigación se encuentran los siguientes:

- 1) Implementar un método alternativo para la determinación de la resistencia del concreto a compresión y flexión por medio de la madurez del mismo, en proyectos de construcción en Guatemala, generando así un antecedente que pueda ser utilizado como parámetro de comparación para futuras investigaciones o aplicaciones.
- 2) Por medio de los resultados obtenidos en esta investigación, demostrar la importancia de aplicar el método de madurez como una medida de control de calidad en proyectos de construcción con concreto
- 3) Determinar la calibración de las curvas de madurez, conocer el índice de la madurez, el del factor tiempo-temperatura y el factor temperatura de referencia por medio de pruebas de laboratorio, según los procedimientos descritos en la normativa. Esto específicamente para la mezcla de concreto utilizada en el proyecto de pavimentación Vía Alterna del sur (VAS).

- 4) Aplicar la investigación en un proyecto de campo, en este caso una pavimentación de concreto hidráulico, evaluando las condiciones ambientales a las que se encuentra expuesto, las variaciones en su historial de temperaturas y su comportamiento hasta llegar al endurecimiento.
- 5) Establecer un periodo de tiempo en el cual el concreto alcanza la resistencia especificada en documentos disponibles y con ello poder autorizar la apertura al tránsito en dicha pavimentación sin que existan consecuencias nocivas.
- 6) Determinar si es posible conocer un rango resistencias óptimas en el cual es concreto es apto para el corte de juntas de contracción en el proyecto Via Alternativa del Sur (VAS), según lo especificado por el diseñador.
- 7) Presentar un documento con los lineamientos y metodologías para la aplicación del método de la madurez en el concreto, detallando las fases requeridas de laboratorio y campo, con la cual se pueda mejorar los controles de calidad en los procesos constructivos con concreto, así como también, conocer el comportamiento a detalle del proyecto, para ser utilizada también como referencia para futuras aplicaciones del mismo método.

2.6.2 Limitaciones

Como cualquier proyecto de investigación se busca el cumplimiento de los objetivos y establecer si la hipótesis planteada puede o no ser cumplida, considerando que existen limitaciones propias de la metodología. Entre las limitantes más importantes cabe mencionar:

- 1) El método de madurez requiere un estudio por cada mezcla de concreto utilizada, no se pueden generalizar los resultados de un solo diseño de mezcla de concreto para diseños de mezclas distintos a la mezcla estudiada. Los resultados presentados en este estudio, por ejemplo, únicamente podrán ser aplicados para una mezcla de las mismas características, dosificación, con el mismo índice de madurez, y sometido a las mismas condiciones ambientales. Se entiende que estas últimas serán propias de la ubicación de cada proyecto.
- 2) El concreto debe mantenerse en una condición adecuada que permita la hidratación del cemento.
- 3) El método no puede explicar los efectos de las temperaturas iniciales sobre la resistencia a edades tardías del concreto.
- 4) Este método requiere complementar con datos de la resistencia potencial de la mezcla de concreto analizada, sobre todo en la fase inicial de laboratorio, en donde se realizan pruebas con cubos, cilindros y vigas respectivamente.

- 5) La exactitud y precisión de la resistencia estimada dependerá de contar con una apropiada determinación de la función de la madurez de la mezcla de concreto estudiada.
- 6) Para realizar las pruebas en la fase de laboratorio, se requiere de laboratorios equipados con instrumentación adecuada para cada uno de los ensayos, así como también contar con personal certificado para cada uno de los ensayos, de lo contrario no serán representativos los resultados obtenidos.
- 7) El método requiere de calibraciones en laboratorio, que conllevan la realización de pruebas de duración prolongada, por lo tanto se requiere de una especial atención a los detalles, de lo contrario se contara con datos y resultados no representativos de los reales. Se requiere también de una colocación adecuada de los sensores en la fase de campo.
- 8) Como es necesaria la utilización de equipo especial para la realización de los ensayos en la fase de campo, se debe tomar en cuenta que la preparación de los cables de las termocuplas (en nuestro caso tipo K) debe hacerse por medio de expertos en el tema, y también se debe verificar que los recolectores de datos (datalogger) sean compatibles.
- 9) Los antecedentes del uso de esta metodología en el país son prácticamente inexistentes, por lo que se referencio la mayoría de la investigación a la normativa y documentación internacional existente.
- 10) En el proyecto no se cuenta con una estación meteorológica para obtener los registros históricos del comportamiento de las temperaturas. Se hizo el presente estudio tomando datos históricos de la estación INSIVUMEH localizada a proximidades del aeropuerto la Aurora, en Ciudad de Guatemala, ya que fue la más próxima al proyecto, la construcción de la carretera contara con una fase de pavimentación que comunicara la carretera con esta área.
- 11) No existe una colocación estandarizada de los dispositivos que registran las historias de las temperaturas en el proyecto, ni una descripción de la altura a las que deben estar colocadas las termocuplas o su distribución a lo largo de la extensión de la losa de pavimentación.
- 12) Debido al modelo de los dispositivos utilizados para la recolección de datos (datalogger), fue necesario el control continuo para descarga de la información, ya que de contar con equipo inalámbricos más sofisticados se puede conocer los datos en tiempo real sin necesidad de tener presencia en el proyecto.

2.7 APORTE

Al sector de la Construcción General en Guatemala:

El método de determinación de la resistencia por medio del estudio de su madurez propone metodologías innovadoras de control de calidad del concreto, sin ser un procedimiento destructivo o interferir con el comportamiento del mismo. Permite estimar la resistencia a compresión y a flexión, a cualquier edad que se requiera, esto incluye desde minutos posteriores a la colocación del concreto, hasta varios días después.

Existen otras metodologías o ensayos para la determinación de la resistencia, pero para edades tempranas, sobre todo en las primeras horas de vida, no pueden utilizarse métodos destructivos, entonces la aplicación del método por medio de la madurez del concreto es una de las opciones más convenientes.

Investigando sobre la utilización de la metodología, se encontró que es un método estudiado y utilizado a nivel internacional, pero hasta el momento en Guatemala no ha sido implementado para un control más preciso del comportamiento del concreto colocado en proyectos, únicamente ha sido estudiado en condiciones de laboratorio.

Se incluyen en este trabajo, estudios para la apertura rápida al tránsito y corte de juntas de construcción en pavimentos de concreto hidráulico, basados en estudios del comportamiento de concreto en condiciones de laboratorio, validando por medio de la colocación de dispositivos en campo, obteniendo resultados representativos de la realidad, comparándolos con parámetros internacionales de resistencias mínimas recomendadas.

Siendo una investigación completa, se buscara proporcionar información adecuada en donde se describan cada uno de los procedimientos realizados, desde el planteamiento del proyecto, hasta el análisis de los resultados finales obtenidos, de una manera explicativa, para que el mismo documento pueda ser utilizado como guía para futuras investigaciones sobre el tema.

A la Universidad Rafael Landívar:

Proporcionar una guía o material de apoyo para futuros profesionales, personas individuales, empresas u organizaciones para que puedan estudiar o investigar proyectos en los que intervenga el uso del método de la estimación de la resistencia por medio de la madurez del concreto.

MARCO III: MÉTODO

3.1 SUJETOS

3.1.1 Ingeniero Plinio Estuardo Herrera Rodas

De la Universidad San Carlos de Guatemala graduado de Ingeniero Civil, cuenta con Maestría en Administración de Negocios (MBA) de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Actual Gerente de Investigación y Desarrollo de Concreto en el Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso S.A., siendo el director general del proyecto de estimación de la resistencia del concreto por el método de madurez. Encargado de la delimitación del tema, objetivos y alcances, así como también, a cargo de proveer recursos para el desarrollo del proyecto y de establecer contactos dentro y fuera de la empresa para la realización del mismo.

3.1.2 Ingeniero Christian Basilio Chiriz Umaña

De la Universidad Rafael Landívar Guatemala graduado en Ingeniería Civil. Coordinador de Concreto Fresco y Servicios Externos del Laboratorio CETEC en el Centro de Investigación y Desarrollo de Cementos Progreso S.A., siendo el encargado de la planificación y logística de los procesos requeridos para llevar a cabo la metodología. A cargo de la transferencia de conocimientos sobre la metodología, en base a experiencias anteriores, así como también, a cargo del equipo y recurso humano que apoyo en la ejecución del proyecto.

3.1.3 Ingeniero Raúl Alvarado

De la Universidad San Carlos de Guatemala graduado de Ingeniero Civil. Director general de Grupo Tekton Consultores S.A. Nexo principal con el proyecto Vía Alternativa del Sur (VAS), para la ejecución de la validación del método en campo.

3.1.4 Ingeniero Raúl Díaz

De la Universidad San Carlos de Guatemala graduado de Ingeniero Civil. Director general de campo de la Constructora Nacional, Sociedad Anónima S.A. (CONASA). Apoyo logístico en campo durante la instalación de los sensores de temperatura, visitas y reuniones en obra.

3.2 INSTRUMENTOS

A continuación se describirán las normativas en donde se especifica el equipo estandarizado requerido para la realización de los procedimientos para la determinación de la madurez del concreto.

3.2.1. Equipo para Elaboración y Curado de Especímenes

a. Especímenes Cúbicos de 50mm

Normativa NTG 41003 h4 (ASTM C109/C109M), método de ensayo para la determinación de la resistencia a la compresión del mortero de cemento hidráulico usando especímenes cúbicos de 50 milímetros (2 pulgadas) de lado.

b. Especímenes de Ensayo de Concreto en el Laboratorio

Normativa NTG 41060 (ASTM C192/C192M), practica para la elaboración y curado de especímenes de ensayo de concreto en el laboratorio.

c. Especímenes de Ensayo de Concreto en la Obra

Normativa NTG 41061 (ASTM C31/C31M), practica para la elaboración y curado de especímenes de ensayo de concreto en la obra.

3.2.2. Equipo para Determinación del Tiempo de Fraguado

Normativa NTG 41017 h12 (ASTM C403/C403M), método de ensayo para la determinación del tiempo de fraguado de mezclas de concreto por su resistencia a la penetración.

3.2.3. Equipo para la Medición de la Resistencia del Cemento y del Concreto

a. Ensayo a Compresión de Especímenes Cúbicos de 50mm

Normativa NTG 41003 h4 (ASTM C109/C109M), método de ensayo para la determinación de la resistencia a la compresión del mortero de cemento hidráulico usando especímenes cúbicos de 50 milímetros (2 pulgadas) de lado.

b. Ensayo a Compresión de Especímenes Cilíndricos

Normativa NTG 41017 h1 (ASTM C39/C39M), método de ensayo para la determinación de la resistencia a la compresión para especímenes cilíndricos de concreto. En la cual hace referencia al equipo requerido para dicho ensayo.

c. Ensayo a Flexión en Vigas

Normativa NTG 41017 h2 (ASTM C78), método de ensayo para la determinación del esfuerzo de flexión del concreto (utilizando una viga simplemente apoyada en los tercios de la luz), así como también la metodología de ensayo.

3.2.4. Equipo para la Medición de Temperatura

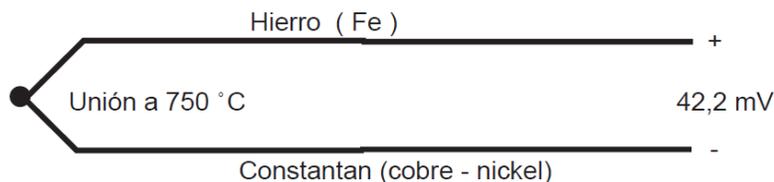
Según la metodología utilizada para el presente proyecto, los equipos utilizados serán los delimitados en la normativa COGUANOR NTG 41042 (ASTM C1074), entre los cuales se incluyen equipos comerciales para monitorear la temperatura, pudiendo encontrar entre ellos equipos con cálculo de datos del factor temperatura-tiempo o la edad equivalente, según las ecuaciones en los que están regidos. Aunque lo más común será la utilización de dispositivos alternativos, como sensores de temperatura conectados a dispositivos digitales de registro de datos, los cuales son embebidos en el concreto para medir, registrar y guardar los cambios de temperatura que posteriormente serán utilizados para calcular el índice de madurez de una mezcla específica de concreto.

A continuación serán descritos los dispositivos alternativos utilizados generalmente en la realización de este tipo de proyectos, que fueron los utilizados en el presente estudio:

a. Sensores de Temperatura (Termocuplas)

Estos son los sensores de temperatura más utilizados a nivel industrial. Se encuentra conformada por dos alambres unidos en su extremo, habitualmente soldados. Cuando en esta unión se aplica temperatura se genera un voltaje pequeño, del orden de milivolts el cual se acrecienta con la temperatura.

Figura 20: Esquema general de una Termocupla.



Fuente: Electroindustria (2010).

Generalmente las termocuplas industriales son comercializadas encapsuladas en un tubo de acero inoxidable u otro material, encontrándose en un extremo la unión de los cables y en el otro el terminal eléctrico de los cables, protegido en el interior de una caja de redonda de aluminio llamada cabezal.

Teniendo una clasificación según la temperatura requerida para cada uso en particular que vaya a dársele, siendo proporcionada por la siguiente tabla:

Código de Color ANSI	Combinación de Aleación		Comentarios Entorno Cable Pelado	Rango de Temperatura Máximo Grado Termocupla	FEM (mV) en todo el Rango de Temperatura Máximo
	Positivo (+)	Negativo (-)			
J	HIERRO Fe (magnético)	CONSTANTÁN CUPRONÍQUEL Cu-Ni	Reductor, vacío, inerte. Uso limitado en entornos oxidantes a altas temperaturas. No se recomienda para temperaturas bajas.	-210 a 1200 °C -346 a 2193 °F	-8.095 a 69.553
K	NICROMO Ni-Cr	NÍQUEL- ALUMINIO Ni-Al (magnético)	Oxidante limpio e inerte. Uso limitado en vacío o atmósfera reductora. Amplio rango de temperatura, la calibración más popular.	-270 a 1372 °C -454 a 2501 °F	-6.458 a 54.886
T	COBRE Cu	CONSTANTÁN CUPRONÍQUEL Cu-Ni	Ligeramente oxidante, reductor, vacío o inerte. Bueno en condiciones de humedad presente. Aplicaciones a temperaturas bajas y criogénicas.	-270 a 400 °C -454 a 752 °F	-6.258 a 20.872
E	NICROMO Ni-Cr	CONSTANTÁN CUPRONÍQUEL Cu-Ni	Oxidante o inerte. Uso limitado en vacío o atmósfera reductora. El cambio más alto de FEM por grado.	-270 a 1000 °C -454 a 1832 °F	-9.835 a 76.373
N	NICROSIL Ni-Cr-Si	NISIL Ni-Si-Mg	Alternativa a tipo K. Más estable a temperaturas altas.	-270 a 1300 °C -450 a 2372 °F	-4.345 a 47.513
R	PLATINO- 13 % RODIO Pt-13 % Rh	PLATINO Pt	Oxidante o inerte. No insertar en tubos metálicos. Cuidado con la contaminación. Temperatura alta.	-50 a 1768 °C -58 a 3214 °F	-0.226 a 21.101
S	PLATINO- 10 % RODIO Pt-10 % Rh	PLATINO Pt	Oxidante o inerte. No insertar en tubos metálicos. Cuidado con la contaminación. Temperatura alta.	-50 a 1768 °C -58 a 3214 °F	-0.236 a 18.693
R/ SX	COBRE Cu	COBRE-BAJO NÍQUEL Cu-Ni	Cable de conexión de grado de extensión para termopares R & S, también conocido como cable de extensión RX y SX.	-	-
U	COBRE Cu	COBRE Cu	No compensado para uso con RTDS y termistores.	-	-
B	PLATINO- 30 % RODIO Pt-30 % Rh	PLATINO- 6 % RODIO Pt-6 % Rh	Oxidante o inerte. No insertar en tubos metálicos. Cuidado con la contaminación. Temperatura alta. Uso común en la industria del vidrio.	0 a 1820 °C 32 a 3308 °F	0 a 13.820
G* (W)	TUNGSTENO W	TUNGSTENO- 26 % RENIO W-26 % Re	Vacío, inerte, hidrógeno. Cuidado con la fragilización. No es práctico por debajo de 399 °C (750 °F). No apto para atmósfera oxidante.	0 a 2320 °C 32 a 4208 °F	0 a 38.564
C* (W5)	TUNGSTENO- 5 % RENIO W-5 % Re	TUNGSTENO- 26 % RENIO W-26 % Re	Vacío, inerte, hidrógeno. Cuidado con la fragilización. No es práctico por debajo de 399 °C (750 °F). No es para atmósfera oxidante.	0 a 2320 °C 32 a 4208 °F	0 a 37.066

D* (W3)	TUNGSTENO- 3 % RENIO W-3 % Re	TUNGSTENO- 25 % RENIO W-25 % Re	Vacío, inerte, hidrógeno. Cuidado con la fragilización. No es práctico por debajo de 399 °C (750 °F). No es para atmósfera oxidante.	0 a 2320 °C 32 a 4208 °F	0 a 39.506
--------------------------	-------------------------------------	---------------------------------------	--	-----------------------------	------------

- No hay símbolo oficial ni designación estándar.

Para la realización del presente proyecto se utilizaron termocuplas tipo “K”, ya que es establecido su uso según su rango de temperaturas y características específicas requeridas, además de ser la calibración más popular.

b. Sistemas Digital de Almacenamiento de Datos (Datalogger)

Estos equipos se han actualizado de manera continua a través del tiempo, contando con sistemas manuales, sistemas electrónicos complejos y hasta micro electrónicos avanzados. En la evolución se han mejorado la exactitud, la automatización, y la seguridad e integridad de los datos obtenidos. Se puede dividir en dos generaciones, siendo su distinción la localización de donde se registran los datos y la tecnología de almacenaje de la información. La primera generación almacena los datos externamente y la segunda generación los registra dentro del mismo concreto, pudiendo ser estos dispositivos cableados o inalámbricos.

En la realización de este proyecto se utilizó equipo de primera generación, un método alternativo para el procedimiento. Se contó con un sistema digital de recolección de datos, DT4947SD, de la compañía General Tools, con un rango de temperaturas de 148° to 3092°F (-100° to 1700°C) y 4 cuatro canales de recolección de datos, siendo el mismo compatible con las termocuplas tipo K utilizadas.

Figura 21: Sistema digital de recolección de datos de temperatura, modelo DT4947SD, de la compañía General Tools.



Fuente: Compañía General Tools (2015).

3.3 METODOLOGÍA

3.3.1 Procedimiento para la Determinación de la Temperatura de Referencia o de la Energía de Activación

Como paso preliminar de este procedimiento se debe investigar las temperaturas máximas y mínimas que se espera tendrá en concreto en el sitio durante el periodo de estudio de su resistencia. Llamadas temperaturas extremas. Para lo cual se pueden utilizar instrumentos de recolección de datos en el sitio, o bien analizar historiales sobre las temperaturas en la información proporcionada por el Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala (NSIVUMEH).

El procedimiento se basa en la normativa NTG 41042 (ASTM C1074), incluido este procedimiento en el Anexo I.

Descripción del Procedimiento

- (1) “Los ensayos requeridos para determinar experimentalmente la temperatura de referencia o la energía de activación pueden ser realizados sobre especímenes de mortero, y los resultados son aplicables al concreto que se está investigando. La investigación básica es para establecer la resistencia a la compresión en función de la edad para especímenes de mortero curados en un baño de agua mantenida a tres temperaturas diferentes. Dos baños de agua deben estar a la máxima y mínima temperatura que se espera tendrá el concreto en el sitio durante el período en el cual se va a estimar la resistencia. La temperatura del tercer baño debe estar en el medio de las dos temperaturas. Los tiempos de fraguado final a las tres temperaturas pueden ser medidos, dependiendo del procedimiento de análisis de datos.
- (2) Se dosifica una mezcla de mortero que tenga una relación agregado fino a cemento (en masa) igual a la relación agregado grueso a cemento de la mezcla de concreto bajo investigación. La mezcla de mortero debe tener la misma relación agua/material cementante y la misma cantidad de aditivos que se usarán en el concreto.
- (3) Si los datos de resistencia se analizan usando el procedimiento de ploteo del recíproco del numeral (7), los tiempos de fraguado final deben ser medidos. Se preparan tres especímenes de mortero usando los recipientes especificados en el Método de ensayo NTG 41017 h12 (ASTM C403/C403M). Se sumerge con cuidado cada espécimen en su correspondiente baño de agua a temperatura controlada. Se determina el tiempo de fraguado final para cada temperatura de acuerdo con el Método de ensayo NTG 41017 h12 (ASTM C403/C403M). Los especímenes son retirados del baño de agua y el exceso de agua es removida antes de hacer las medidas de penetración. Si los datos se analizan usando los

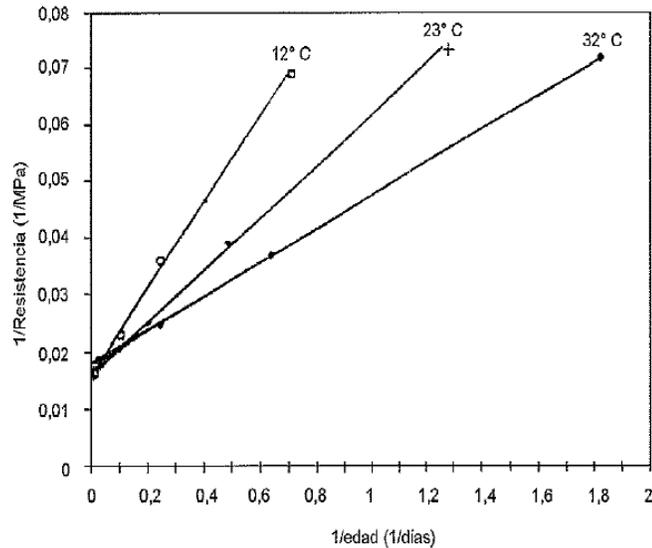
procedimientos de regresión del numeral (8) no es necesario medir los tiempos de fraguado.

- (4) Se preparan tres grupos de cubos de mortero de 50 mm, con 18 cubos por grupo. Los cubos se moldean de acuerdo con el Método de ensayo NTG 41003 h4 (ASTM C109/C109M) y se sumerge con cuidado cada grupo dentro de uno de los baños de agua a temperatura controlada. Para cada grupo, se remueven los moldes y se regresan los especímenes a sus respectivos baños, aproximadamente 1h antes de la primera serie de ensayo de compresión.
- (5) Para cada grupo de cubos, se determina la resistencia a compresión de tres cubos de acuerdo con el Método de ensayo NTG 41003 h4 (ASTM C109/C109M) a una edad que es aproximadamente el doble de la edad en la que se alcanza el fraguado final. Si no se miden los fraguados finales, se realiza el primer ensayo de resistencia cuando la resistencia a la compresión sea de aproximadamente 4 MPa.

Se hacen subsecuentes ensayos sobre 3 cubos de cada grupo a edades aproximadamente el doble que las edades de los ensayos previos. Por ejemplo, si el tiempo para el primer ensayo fue de 12h, los ensayos de compresión sucesivos se deben realizar a 1, 2, 4, 8, 16 y 32 días.

- (6) Los datos obtenidos de la resistencia en función de la edad en las tres temperaturas de curado son analizados para determinar la relación entre la velocidad constante de desarrollo de resistencia (Valor k) y la temperatura de curado. Dependiendo de las herramientas de computador disponibles pueden emplearse diferentes procedimientos. Si el usuario solo tiene capacidad de hacer análisis de regresión lineal, se debe usar el procedimiento del numeral (7) o (8.2). Si el usuario tiene un programa de computador que pueda hacer análisis de regresión con una función general, se debe usar el procedimiento del numeral (8.1).
- (7) Los tiempos finales de fraguado en las tres temperaturas deben ser conocidos para usar este procedimiento. Se prepara un gráfico con el recíproco de la resistencia en el eje Y y el recíproco de la edad en el eje X. Para cada temperatura de curado, se plotea el recíproco del promedio de la resistencia de los cubos a lo largo del eje Y y el recíproco de la edad después del tiempo de fraguado final a lo largo del eje X. Un ejemplo de esta gráfica se muestra en la figura 20. Se determina la pendiente y el intercepto de la recta de mejor ajuste a través de los datos para cada temperatura de curado. Para cada recta, se divide el valor del intercepto por el valor de la pendiente. Estos cocientes son los valores k que se usan para calcular la temperatura de referencia o la energía de activación.

Figura 22: Inverso de la resistencia versus el inverso de la edad después del fraguado final.



Fuente: Norma Técnica Guatemalteca, NTG 410242 (ASTM C1074-11) (2014).

(8) Como una alternativa para el procedimiento del numeral (7), los valores k pueden ser estimados por cualquiera de los siguientes métodos. En estos casos, el tiempo final de fraguado no tiene que ser medido.

(8.1) Si el usuario tiene acceso a un programa de computadora que permite ajustar una ecuación general a un grupo de datos, valor k se determina por ajuste a la siguiente ecuación de los datos resistencia-edad para cada temperatura de curado.

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

Ecuación (4)

S = Promedio de la resistencia a la compresión de los cubos a una edad t.

t = Edad t.

S_u = Resistencia límite.

t₀ = Edad en la cual se asume que se inicia el desarrollo de la resistencia.

k = Relación constante.

El programa de computadora calculará los mejores valores ajustados de S_u, t₀ y k.

(8.2) Además, el valor de k puede ser estimado por el siguiente método:

1. Usando los últimos valores de resistencia-edad para las últimas cuatro edades de ensayo, se grafican los recíprocos de la resistencia (eje-y) contra los recíprocos de la edad (eje x). Se determina el intercepto con el eje y. El inverso del intercepto es la resistencia límite, S_u . El proceso se repite para cada temperatura de curado.
2. Para cada temperatura de curado, se usan los valores de resistencia-edad de las cuatro edades más tempranas y el valor de S_u para calcular los valores de A para cada resistencia, donde A está dado por la siguiente ecuación:

$$A = \frac{S}{S_u - S}$$

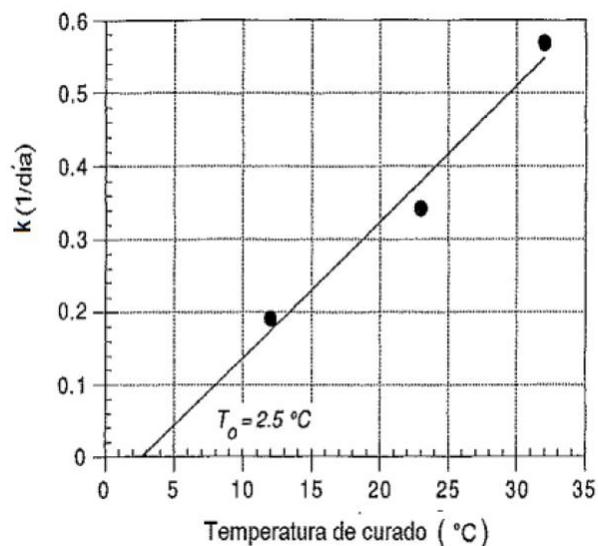
Ecuación (5)

3. Para cada temperatura de curado, se grafican los valores de A vs. edad. Se determinan las pendientes de las líneas que mejor se ajusten para cada temperatura de curado. Estas pendientes son los valores de k".

3.3.1.1 Determinación de la Temperatura de Referencia

- (1) "Se plotean los valores k, como una función de las temperaturas del baño de agua (Figura 23) Se determina la recta de mejor ajuste a lo largo de los tres puntos y se determina el intercepto de la línea con el eje de la temperatura. Este intercepto es la temperatura de referencia T_0 , que será usada en el cálculo del factor temperatura-tiempo de acuerdo con la ecuación (1)".

Figura 23: Ejemplo de cómo graficar los valores de k, contra la temperatura de curado.

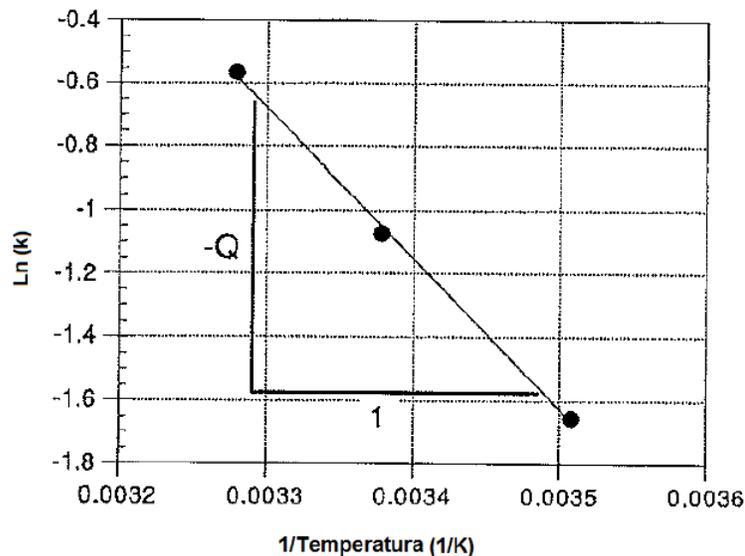


Fuente: Norma Técnica Guatemalteca, NTG 410242 (ASTM C1074-11) (2014).

3.3.1.2 Determinación de la Energía de Activación

- (1) “Se calcula el logaritmo natural de los cocientes (valores de k) de la sección numeral (9) y se determinan las temperaturas absolutas (en Kelvin = Celsius + 273) de los baños de agua.
- (2) Se dibuja el logaritmo natural de los valores de k , como una función del recíproco de la temperatura absoluta (Figura 24). Se determina la recta de mejor ajuste a los largo de tres puntos. La pendiente de la línea es el valor de la energía de activación dividida por la constante del gas, Q , que será usada en el cálculo de la edad equivalente de acuerdo con la ecuación 2”.

Figura 24: Ejemplo de graficar el logaritmo natural de los valores de k contra la temperatura absoluta para determinar el valor de Q usado en el cálculo de la edad equivalente.



Fuente: Norma Técnica Guatemalteca, NTG 410242 (ASTM C1074-11) (2014).

3.3.2 Procedimiento para la Determinación de la Relación Resistencia-Madurez

El procedimiento a continuación es lo descrito en la normativa NTG 41042 (ASTM C1074), numeral 8.

- (1) “Se preparan por lo menos 15 especímenes cilíndricos de acuerdo con la Práctica NTG 41060 (ASTM C192/C192M) usando las proporciones de mezcla y los constituyentes similares a aquellos del concreto al cual se le va estimar la resistencia usando esta práctica. Si se requiere de dos amasadas para preparar el número requerido de cilindros, se moldea un número igual de cilindros de cada

amasada y se ensaya un cilindro de cada amasada a las edades de ensayo indicadas en el numeral (4).

- (2) Se introducen sensores de temperatura por lo menos a ± 15 mm de los centros de al menos dos especímenes. Se conectan los sensores a los instrumentos de medición de la madurez o a los dispositivos de registro de temperatura como registradores digitales de datos o registradores continuos de cinta gráfica.

Nota 1 - Un método para ayudar a obtener una posición adecuada del sensor, consistente en insertar una varilla de diámetro pequeño en el centro del cilindro de concreto recién moldeado. La varilla apartará hacia un lado las partículas de agregado que puedan interferir. Se retira la varilla y luego se introduce el sensor dentro del cilindro. Enseguida se golpea ligeramente con un mazo de hule o con la varilla apisonadora los lados del molde para asegurar que el concreto entre en contacto adecuado con el sensor.

- (3) Los especímenes se curan en húmedo en un baño de agua o en un cuarto húmedo siguiendo los requisitos de la norma NTG 41059 (ASTM C511).
- (4) Se llevan a cabo los ensayos de compresión de 1, 3, 7, 14 y 28d de acuerdo con el Método de ensayo NTG 41017 h1 (ASTM C39/C39M). Se ensayan dos especímenes para cada edad y se calcula la resistencia promedio. Si el rango de la resistencia a la compresión de los dos cilindros excede del 10% de su resistencia promedio, se ensaya otro cilindro y se calcula el promedio de tres resultados. Si un resultado de ensayo es bajo debido a efectos obvios del espécimen se debe descartar ese resultado.

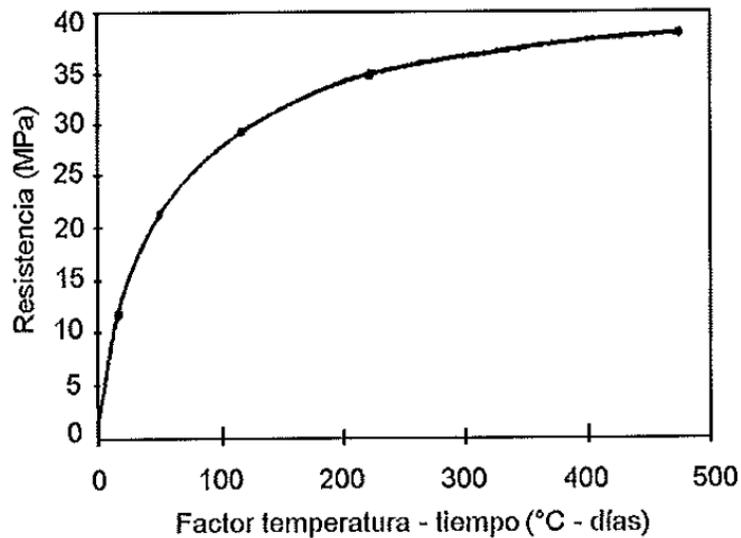
Nota 2 - Para mezclas de concreto que tengan un desarrollo rápido de resistencia, o cuando las estimaciones de resistencia deben hacerse a valores bajos del índice de madurez, los ensayos deben comenzar tan pronto como sea practicable. Se deben programar ensayos subsiguientes para que den por resultado unos incrementos de ganancia de resistencia aproximadamente iguales entre las edades de ensayo. Se recomienda usar por lo menos cinco edades de ensayo.

- (5) Para cada edad de ensayo, se registra el índice de madurez promedio para los especímenes instrumentados.
 - (5.1) Si se utilizan los instrumentos de medición de la madurez, se registra el promedio de los valores mostrados.
 - (5.2) Si se utilizan los registradores de temperatura, se evalúa la madurez de acuerdo con las ecuaciones de Nurse-Saul o Arrhenius. A menos que se especifique de otro modo, se usa un intervalo de tiempo de $\frac{1}{2}$ h o menos para las primeras 48h del registro de temperatura. Se pueden usar mayores intervalos de tiempo para la porción relativamente constante del subsecuente registro de temperaturas.

Nota 3 - Se debe ejercer criterio en la selección de los intervalos de tiempo iniciales para el registro de la temperatura en mezclas que tengan cambios rápidos de temperatura en la edad temprana, debido a una hidratación rápida. En el apéndice X2 se da un ejemplo de cómo evaluar el factor temperatura-tiempo o la edad equivalente, a partir del historial de temperatura del concreto.

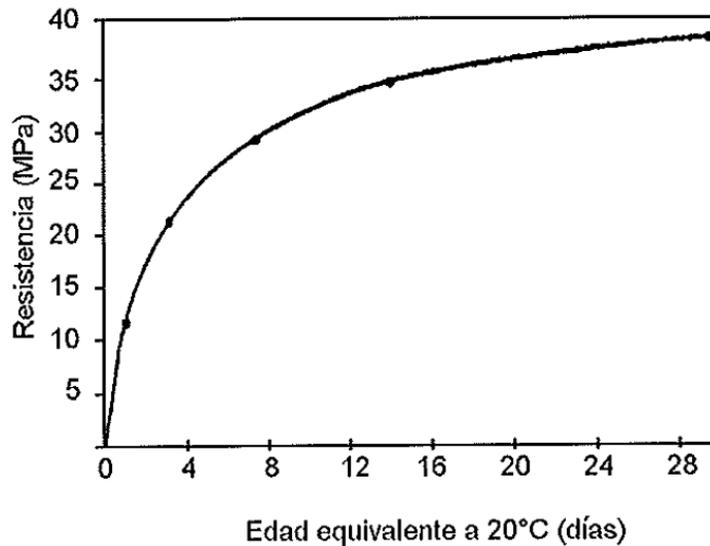
- (1) En un gráfico se plotea la resistencia a la compresión promedio como una función del valor promedio del índice de madurez. Se trata la curva que mejor se ajuste a todos los datos. La curva resultante es la relación resistencia-madurez usada para estimar la resistencia de la mezcla de concreto curada bajo otras condiciones de temperatura. La Figura 25 es un ejemplo de la relación entre la resistencia a compresión y el factor temperatura-tiempo y la Figura 26 es un ejemplo de la relación entre la resistencia a compresión y la edad equivalente a 20°C”.

Figura 25: Ejemplo de la relación entre la resistencia a compresión y el factor temperatura-tiempo.



Fuente: Norma Técnica Guatemalteca, NTG 410242 (ASTM C1074).

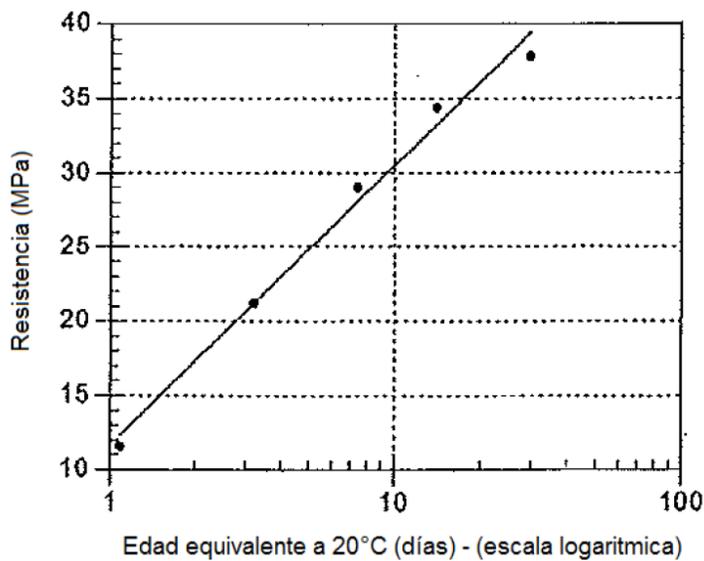
Figura 26: Ejemplo de la relación entre la resistencia a compresión y la edad equivalente a 20°C.



Fuente: Norma Técnica Guatemalteca, NTG 410242 (ASTM C1074-11) (2014).

“Nota 6 – La relación resistencia-madurez puede también ser establecida mediante un análisis de regresión para determinar la mejor ecuación que de ajuste a los datos. Las posibles ecuaciones que se han encontrado adecuadas para este propósito. Una ecuación popular es la que expresa la resistencia como una función lineal del logaritmo del índice de madurez”.

Figura 27: Ejemplo de la resistencia a la compresión como una función del logaritmo de la edad equivalente.



Fuente: Norma Técnica Guatemalteca, NTG 410242 (ASTM C1074-11) (2014).

- (2) “Cuando así se especifique, se permite el uso de una relación resistencia a la flexión respecto al índice de madurez. Se preparan en este caso, por lo menos 15 especímenes de vigas de acuerdo con la Práctica NTG 41060 (ASTM C192/C192M). Si se requiere de dos amasadas para preparar el número requerido de vigas, se moldea un número igual de vigas de cada amasada y se ensaya una viga de cada amasada a las edades de ensayo indicadas en el número (4). Se introducen sensores de temperatura en dos especímenes de vigas, uno de cada amasada, si se hicieran dos amasadas. Se conectan los sensores a los instrumentos de medición de la madurez o a los dispositivos de registro de temperatura, y se procede a curar los especímenes en húmedo, en un baño de agua o en un cuarto húmedo siguiendo los requisitos de la norma NTG 41059 (ASTM C511). Se ensayan los especímenes de acuerdo con el método de ensayo NTG 41017 h2 (ASTM C 78) a intervalos de tiempo de 1, 3, 7, 14 y 28 días u otras edades especificadas. Se ensayan dos especímenes a cada edad y se calcula su resistencia a la flexión promedio. Si el rango de la resistencia a la flexión de dos especímenes excede del 15% de su resistencia promedio, se ensaya otra viga y se calcula el promedio de los resultados de tres ensayos realizados. Si un resultado de ensayo es bajo debido a defectos obvios del espécimen, se debe descartar ese resultado. Se usan los mismos procedimientos indicados en el numeral (5) y en el (6) para el desarrollo de la relación resistencia a la flexión-índice de madurez.
- (3) También se permite el desarrollo de una relación entre la resistencia de cubos de concreto y el índice de madurez. Se sigue el mismo procedimiento dado para los cilindros excepto que los cubos deben ser preparados y ensayados de acuerdo con el método de ensayo que sea aplicable. Se insertan sensores de temperatura en los centros de por lo menos dos cubos. Se ensayan dos cubos para cada edad de ensayo prevista. Para decidir si algún resultado de resistencia bajo de un cubo debe ser descartado se recomienda tomar como guía, la declaración de precisión del método de ensayo de los cubos, usado”.

3.3.3 Procedimiento para la Estimar la Resistencia del Concreto en el Sitio de la Obra

El procedimiento a continuación es lo descrito en la normativa NTG 41042 (ASTM C1074), numeral 9.

- (1) “Se colocan sensores de temperatura dentro de la sección que va a ser colocada, antes de la colocación del concreto o bien se introducen los sensores de temperatura en el concreto fresco tan pronto como sea posible luego de colocar el concreto. (Nota 1). Los elementos sensores de la temperatura deben colocarse de tal modo que queden rodeados por concreto y no queden en

contacto con metales embebidos u otros elementos que puedan estar parcialmente expuestos al ambiente externo. (Nota 2). Si esta práctica se usa para decidir el inicio de operaciones críticas de la construcción, los sensores deben ser instalados en lugares de la estructura que sean críticos en términos de las condiciones de exposición y de los requisitos estructurales (Nota 3).

Nota 1 – El método apropiado de colocación depende del tipo del sensor que será usado y de las condiciones en el sitio de la construcción. Las recomendaciones del fabricante del sensor proporcionan una guía adicional.

Nota 2 – Lo que se pretende es evitar la colocación de elementos sensores de temperatura en contacto con insertos que estén parcialmente expuestos al ambiente externo y que potencialmente podrían estar a una diferente temperatura que la del concreto.

Nota 3 – En la construcción de edificaciones, las porciones expuestas de losas de concreto y de las conexiones losa-columna son típicamente localizaciones críticas. Se debe buscar la asesoría de un ingeniero estructural para localizar los lugares críticos en la estructura particular en construcción.

- (2) Los sensores se conectan a los instrumentos de medición de la madurez o a los dispositivos de registro de temperatura, y se activan los dispositivos de registro tan pronto sea posible. Se usa el mismo valor de temperatura de referencia o de energía de activación, la que sea aplicable de acuerdo a la que se usó para el cálculo del Índice de madurez, durante el desarrollo de la relación resistencia-índice de madurez descrita en la sección anterior.
- (3) Cuando se desee estimar la resistencia en los sitios de colocación de los sensores, se lee el valor del índice de madurez del instrumento de medición de la madurez o bien se evalúa el índice de madurez a partir de los registros de temperatura.
- (4) Usando la relación resistencia-madurez desarrollada en la sección 8, se lee el valor de la resistencia a la compresión o de la resistencia a la flexión correspondiente al índice de madurez medido.
- (5) Antes de la ejecución de operaciones críticas tales como la remoción de encofrados o formaletas y los post-tensionamientos, que están basados en la resistencia estimada con base en la madurez del concreto, deben realizarse otros ensayos para asegurarse que el concreto en la estructura, tiene una resistencia potencial que es similar a aquella del concreto usado para encontrar la relación resistencia-madurez. Las técnicas apropiadas incluyen:
 - (5.1) Los ensayos en el sitio de la obra que ofrecen indicaciones sobre la resistencia, tales como los métodos de ensayo ASTM C873/C873M), NTG 41017 h29 (ASTM C803/C803M9 o en el método de ensayo NTG 41017 h28 (ASTM C900).

- (5.2) Los ensayos de resistencia a la compresión a edad temprana de acuerdo con el método de ensayo NTG 41017 h24 (ASTM C918/C918M), de especímenes de curado estándar moldeados de muestras de concreto al ser descargado, o
- (5.3) Los ensayos de resistencia a la compresión sobre especímenes moldeados del concreto al ser descargado y sujetos a un curado acelerado de acuerdo al método de ensayo ASTM C684.
- (5.4) Ensayos a edad temprana de especímenes moldeados en el sitio de la obra e instrumentados con instrumentos medidores de la madurez. Estos cilindros deben ser sometidos a un curado húmedo estándar de acuerdo con la Práctica NTG 41061 (ASTM C31/C31M). La resistencia a edades tempranas son medidas después de que la madurez en el sitio de la estructura indica que el concreto ha alcanzado la resistencia meta deseada con base en la relación resistencia-índice de madurez. Los esfuerzos obtenidos por el ensayo de los especímenes se comparan con las resistencias estimadas de la relación resistencia-índice de madurez establecida y del índice de madurez de los cilindros ensayados. Si la diferencia consistentemente excede de un 10%, se debe desarrollar una nueva relación resistencia-índice de madurez, de acuerdo con la sección”.

**MARCO IV: PRESENTACIÓN
Y ANALISIS DE
RESULTADOS**

4.1. CRONOGRAMA DE ESTUDIO

Cronograma de Estudio – Estimación de la Resistencia del Concreto por el Método de Madurez en Proyecto VAS												
Actividades principales	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Delimitación del estudio, objetivos y alcances	■	■										
Visita a proyecto VAS y presentación del método		■	■									
Preparación de equipo, materiales y herramientas requeridas		■	■	■								
Muestreo de materiales en proyecto VAS			■									
Pruebas de laboratorio (calibración de curvas de calibración)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Caracterización de Materiales				■	■							
Determinación de tiempos de fraguado					■							
Determinación de la energía de activación						■	■					
Calibración de las curvas de madurez						■	■					
Estudio de la historia de temperaturas y resistencias						■	■					
Pruebas en campo (sensores y lecturas)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Pruebas previas de colocación de dispositivos								■				
Preparación de equipo, materiales y herramientas requeridas									■			
Segunda colocación estación 0+090										■	■	
Evaluación de Resultados e Informe Final												■

4.2. RESULTADOS POR FASES

4.2.1 Fase de Experimentación en Laboratorio

Caracterización de los Componentes del Concreto

Como se mostrará a continuación, en reportes de resultados de laboratorio, fue requerida la caracterización de cada uno de los materiales utilizados en la mezcla de concreto a utilizar en el proyecto Vía Alternativa del Sur (VAS). Ya que, como dicta la normativa, cada una de las curvas de madurez trazadas, serán para el mismo proporcionamiento y los mismos materiales en la mezcla de concreto que se utilizará en obra. De llegar a modificar alguna proporción o material utilizados, el siguiente estudio no sería significativo de las condiciones reales del concreto.

Como primer reporte se muestra el análisis químico del cemento utilizado, que fue el CFB, recolectado de las instalaciones de la planta concretera del proyecto VAS. Luego se muestra el reporte de caracterización de los ensayos físicos realizados al mismo. Esto con el fin de comparar el historial de comportamiento del cemento CFB en la empresa, pudiendo comprobar que siempre se mantiene estable dentro de los parámetros especificados.

Seguidamente se muestran los ensayos a los agregados gruesos (de 3/4" y 3/8"), así como del agregado fino procedentes de la planta de AGRECA, muestreados también en las instalaciones de almacenamiento de agregados del proyecto VAS.

Cada uno de los análisis realizados a lo largo del proyecto, incluyendo los realizados para la caracterización del cemento y agregados, fueron realizados con base a las normativas respectivas, ya que los laboratorios en donde fueron realizados dichos ensayos, los procedimientos están acreditados. Se muestran los resultados obtenidos en las páginas siguientes.

Es importante mencionar que los aditivos Polyheed 789 y Micro-Air, utilizados para la producción de este concreto, son abastecidos por la empresa MASTER BUILDER, con una calidad controlada, lo que hace que la mezcla de concreto mantenga sus características.



CEMENTOS PROGRESO S. A.
CENTRO TECNOLÓGICO

15 Ave. 18-01, zona 6 La Pedrera

Tel: 22864178 Fax: 22864181 cetec@cempro.com

OT	25826
FECHA	2015-04-30
PÁGINA	1 DE 1
ÁREA DE LAB.	QC

Cliente	CENTRO DE I+D/CETEC	Procedencia	VAS
Dirección	15 AV. 18-01 FINCA LA PEDRERA ZONA 6	Muestra	CEMENTO CFB
Contacto	ING. ESTUARDO HERRERA	Analista(s)	OLIVER SANTELIZ
Teléfono	2286-4100	Fecha de Ensayo	2015-05-06

INFORME DE ENSAYO LABORATORIO QUÍMICO

ANÁLISIS QUÍMICO

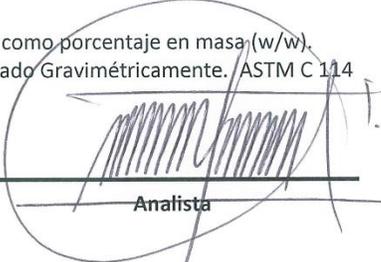
MEDIANTE FLUORESCENCIA DE RAYOS X

COMPOSICIÓN QUÍMICA*

SiO ₂ , %	24.95
Fe ₂ O ₃ , %	2.39
Al ₂ O ₃ , %	5.35
CaO, %	56.54
MgO, %	2.82
K ₂ O, %	0.89
Na ₂ O, %	0.62
SO ₃ , %	2.91
P ₂ O ₅ , %	NA
TiO ₂ , %	NA
Cr ₂ O ₃ , %	NA
MnO, %	NA
LOI (950 °C), %	3.66
Total, %	100.13
** RI, %	9.08

* Expresada como porcentaje en masa (w/w).

** Determinado Gravimétricamente. ASTM C 114


Analista


Ing. Mario de León.
Jefe de Laboratorio

OBSERVACIONES



CEMENTOS PROGRESO S. A.
CENTRO TECNOLÓGICO
15 Av. 18 - 01 Zona 6, La Pedrera
Tel: 2286 - 4178 Fax: 2286 - 4181
laboratoriocetec@cempro.com



ACREDITADO
OGA-LE-052-13

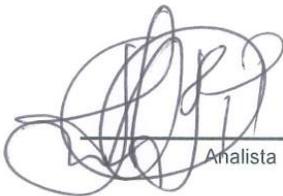
OT:	25826
FECHA:	30/04/2015
PÁGINA:	1 DE 1
IMPRESIÓN:	2016-03-07

CLIENTE:	CENTRO DE INVESTIGACION & DESARROLLO / CETEC	CONTACTO:	ING. ESTUARDO HERRERA		
DIRECCION:	15 Av. 18 - 01 Zona 6, Finca La Pedrera	TELEFONO:	2286-4100		
PROYECTO:	CARACTERIZACION DE LOS AGREGADOS PARA LA CURVA DE MADUREZ	ANALISTA (S)	CL	LABORATORIO	CE

INFORME DE ENSAYOS FISICOS DE CEMENTO

NORMA ASTM	MUESTRA		CEMENTO CFB
		Fecha Ensayo	
C187	Consistencia Normal (mm)		11
	% H ₂ O para C.N.		26.4
C191	Vicat Inicial (min)		124
	Vicat Final (min)		270
C 1437	FLOW (% w/w Cemento)		110
	% H ₂ O para FLOW		49.0
COGUANOR NTG 41003 h4 (ASTM C109) Método Acreditado	Resistencia a Compresión (psi)	1d	2694
		3d	4002
		7d	4438
		28d	5504
C 430	Fineza Tamiz No. 325 (% Pasa)		97.78
C 204	Sup. Especifica Blaine (cm ² /g)		4113

Ensayo de Resistencia a Compresión COGUANOR NTG 41003 h4 (ASTM C109) Acreditado OGA-LE-052-13



Analista



Jefe de Laboratorio / Coordinador

OBSERVACIONES:

Los resultados de ensayo se refieren a la muestra presentada.



CEMENTOS PROGRESO, S. A.
CENTRO TECNOLÓGICO
 15 Ave. 18-01 zona 6, Finca La Pedrera, Guatemala, Guatemala



Orden de Trabajo: 25826-2
 Fecha: 2015-04-30
 Página: 1 De 1
 Impresión: 2015-05-08

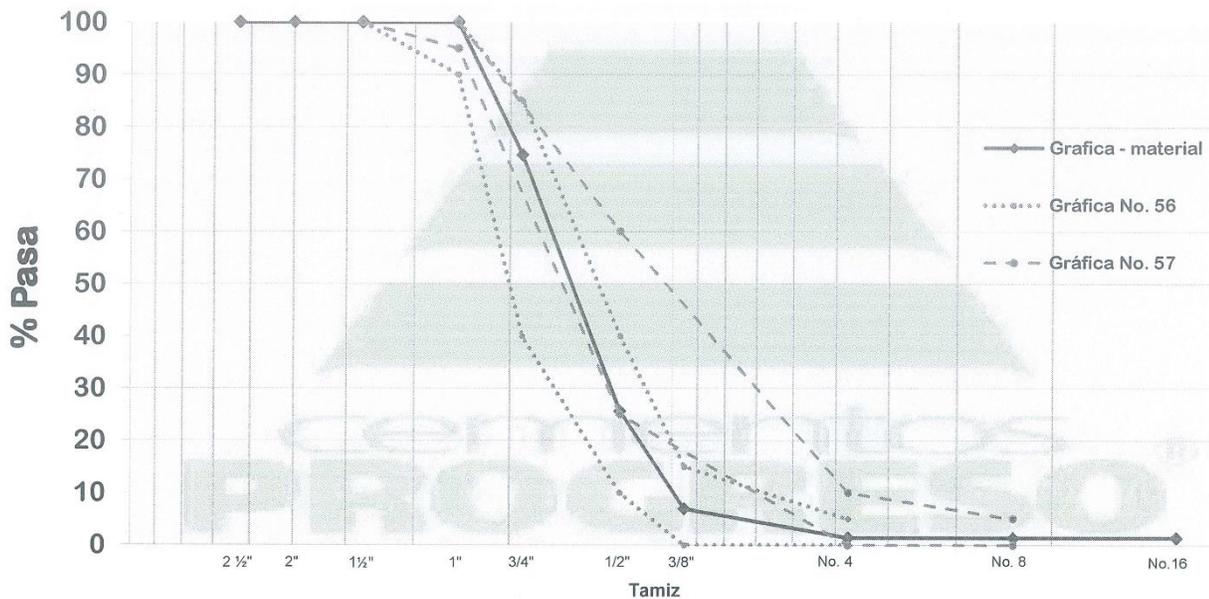
Tel: 2286-4178 cetec@cempro.com

Cliente:	CENTRO DE I + D / CETEC	Procedencia:	VAS
Dirección:	15 AV. 18-01 ZONA 6 FINCA LA PEDRERA	Muestra:	AGREGADO DE 3/4"
Contacto:	ESTUARDO HERRERA	Proyecto:	CARACTERIZACION DE LOS AGREGADOS PARA LA CURVA DE MADUREZ
Teléfono:	2286-4100	Fecha de Ensayo:	2015-05-08

INFORME DE ENSAYOS

LABORATORIO DE AGREGADOS

Granulometría de Agregado Grueso COGUANOR NTG-41010 h1 Método de ensayo Acreditado.



Límites en base a norma COGUANOR NTG-41007,

Tamaño nominal	63.0 mm	50.0 mm	37.5 mm	25.0 mm	19.0 mm	12.5 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm
	2 1/2"	2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 8	No. 16
Masa Retenida (g)	0.0	0.0	0.0	0.0	1540.6	2988.0	1141.6	339.1	0.3	0.4
% Pasa	100	100	100	100	75	26	7	1	1	1

Total tamizado (g): 6094.0

Densidad Relativa (s.s.s.) COGUANOR NTG-41010 h08	2.66	Densidad Aparente Compactada (kg/m ³) COGUANOR NTG-41010 h2	1552
Absorción (%) COGUANOR NTG-41010 h08	0.7	Densidad Aparente Suelta (kg/m ³) COGUANOR NTG-41010 h2	1441
Módulo de Finura (MF) COGUANOR NTG-41010 h1	7.14	Pasa Tamiz No. 200 (0.075mm) (%) COGUANOR NTG-41010 h1	0.9

Fernando Quintero
 Analista de Laboratorio

Ing. Mario De León M.
 Jefe de Laboratorio

* La reducción de la muestra se llevo acabo en base al método planteado en norma COGUANOR NTG-41010 h11

Observaciones:

Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse éste informe, salvo que se haga íntegramente.



CEMENTOS PROGRESO, S. A.
CENTRO TECNOLÓGICO
 15 Ave. 18-01 zona 6, Finca La Pedrera, Guatemala, Guatemala
 Tel: 2286-4178 cetec@cempro.com



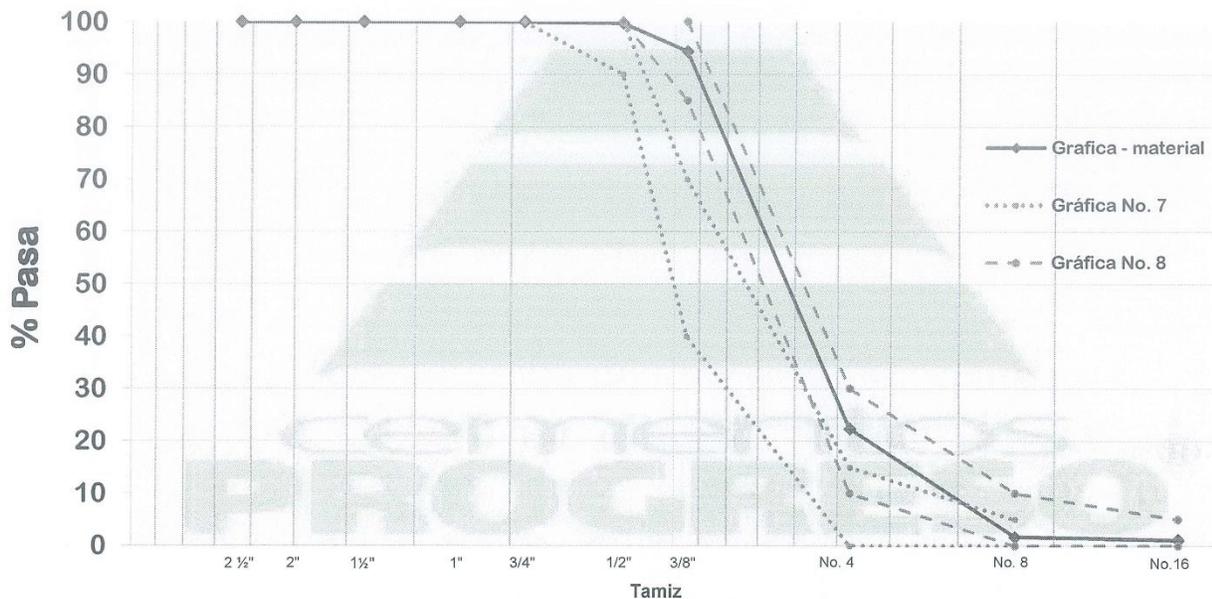
Orden de Trabajo:	25826-3
Fecha:	2015-04-30
Página:	1 De 1
Impresión:	2015-05-08

Cliente:	CENTRO DE I + D / CETEC	Procedencia:	VAS
Dirección:	15 AV. 18-01 ZONA 6 FINCA LA PEDRERA	Muestra:	AGREGADO DE 3/8"
Contacto:	ESTUARDO HERRERA	Proyecto:	CARACTERIZACION DE LOS AGREGADOS PARA LA CURVA DE MADUREZ
Teléfono:	2286-4100	Fecha de Ensayo:	2015-05-08

INFORME DE ENSAYOS

LABORATORIO DE AGREGADOS

Granulometría de Agregado Grueso COGUANOR NTG-41010 h1 Método de ensayo Acreditado.



Límites en base a norma COGUANOR NTG-41007,

Tamaño nominal	63.0 mm	50.0 mm	37.5 mm	25.0 mm	19.0 mm	12.5 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm
	2 1/2"	2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	No. 8	No. 16
Masa Retenida (g)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.0	129.1	1728.0	496.6	14.9
% Pasa	100	100	100	100	100	100	94	22	2	1

Total tamizado (g): 2400.0

Densidad Relativa (s.s.s.) COGUANOR NTG-41010 h08	2.68	Densidad Aparente Compactada (kg/m ³) COGUANOR NTG-41010 h2	1584
Absorción (%) COGUANOR NTG-41010 h08	0.6	Densidad Aparente Suelta (kg/m ³) COGUANOR NTG-41010 h2	1452
Módulo de Finura (MF) COGUANOR NTG-41010 h1	5.81	Pasa Tamiz No. 200 (0.075mm) (%) COGUANOR NTG-41010 h1	0.6

Fernando Quintero
 Analista de Laboratorio

Ing. Mario De León M.
 Jefe de Laboratorio

* La reducción de la muestra se llevo a cabo en base al método planteado en norma COGUANOR NTG-41010 h11

Observaciones:

Los resultados de ensayo se refieren únicamente a las muestras presentadas por el cliente. No debe reproducirse éste informe, salvo que se haga íntegramente.

4.2.1.2 Dosificación de la Mezcla de Concreto

El concreto utilizado para la pavimentación del proyecto Vía Alternativa del Sur (VAS) es nominalmente un concreto con resistencia especificada ($f'c$) de 4,000 psi a los 28 días, aunque como se puede observar más adelante en los informes de laboratorio, las resistencias en cilindros de concreto obtenidas son muy superiores al valor especificado. El proporcionamiento de la mezcla utilizado durante el estudio, se muestra a continuación.

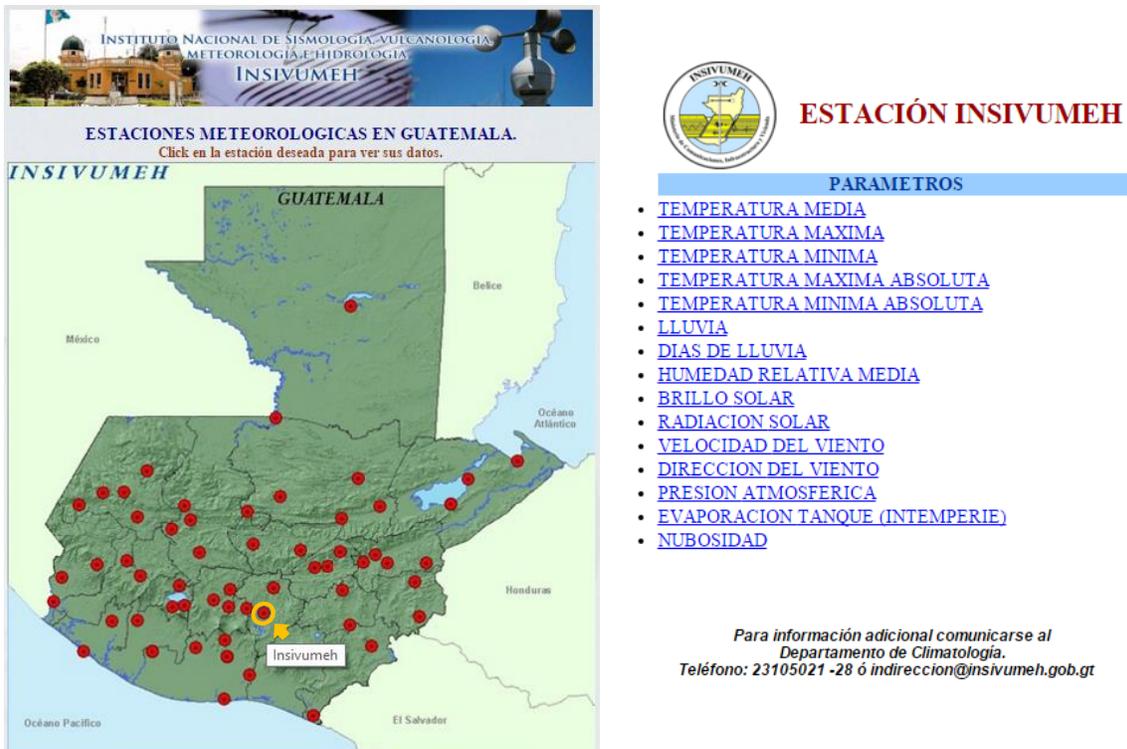
Diseño de Mezcla Teórica	
Cemento: CFB (kg/m^3)	323
Agua: Potable (kg/m^3)	157
Agregado Grueso 1: Piedrín 3/4" (kg/m^3)	817
Agregado Grueso 2: Piedrín 3/8" (kg/m^3)	295
Agregado Fino: Arena Triturada (kg/m^3)	750
Aditivo 1: Polyheed 789 (ml/kg de cemento)	5.0
Aditivo 2: Micro-Air (ml/kg de cemento)	0.3
Densidad Teórica (ml/kg de cemento)	2342
Relación Agua/Cemento (A/C)	0.49

Como todo el estudio se realizó en base al mismo proporcionamiento, es importante que este se mantenga, ya que de modificar la dosis de alguno de los materiales, su calidad o procedencia, los resultados no serían confiables bajo esta metodología.

4.2.1.3 Estudio de la Temperaturas Extremas en el Sitio

Para realizar los estudios de comportamiento del concreto, según la normativa, es necesario conocer la temperatura máxima y mínima que se espera tendrá el sitio de obra durante el periodo en el cual se va a estimar la resistencia y que influyen en la temperatura del concreto. Se verificó el comportamiento del historial de las temperaturas con base a estaciones del Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala (INSIVUMEH), siendo en este caso en particular, la más cercana al proyecto la estación ubicada en las cercanías del Aeropuerto la Aurora llamada INSIVUMEH.

Figura 28: Parámetros meteorológicos según la estación meteorológica INSIVUMEH.



Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala (INSIVUMEH) (2015).

En el historial de las temperaturas máximas y mínimas absolutas anuales que se registran en dicha estación se observó que la temperatura máxima absoluta es de 32°C y la temperatura mínima absoluta de 8°C. Los registros mostraban datos hasta el año 2013 al momento del estudio de las mismas. Esto no representa ningún obstáculo para la ejecución del método, ya que los datos son utilizados como referencia de posibles condiciones de temperatura a las que puede estar sometido el concreto, con el fin de la obtención de la temperatura de referencia y energía de activación.

Figura 29: Temperatura Máxima Absoluta según parámetros de meteorología, utilizada para estudios en el laboratorio.

Valores Mensuales de temperatura máxima (C)

Número 060100 Nombre INSIVUMEH GUATEMALA - GUATEMALA		LAT: 14.59 Norte LON: 91.50 Oeste		Elevación 1,502 m.s.n.m.											
		AÑOS: 1990 al 2015												Anual	
		ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic		
1990	Prom.	23.0	24.7	26.0	27.8	27.1	25.1	25.1	25.7	25.3	24.9	22.8	23.4	25.0	25.0
	MAX	26.0	29.4	29.4	30.4	28.7	27.3	27.5	26.6	27.9	27.9	26.3	27.5	30.4	30.4
	MIN	18.6	18.9	22.0	22.6	24.4	22.5	22.4	25.0	21.0	20.1	18.7	16.9	16.9	16.9
1991	Prom.	24.3	25.3	28.1	28.7	27.4	25.9	25.2	25.4	25.1	24.5	23.1	22.3	25.5	25.5
	MAX	28.4	31.5	31.4	33.9	29.5	28.4	27.4	28.1	27.0	26.5	27.2	26.5	33.9	33.9
	MIN	19.6	20.8	22.7	20.9	24.9	20.0	21.7	21.6	21.9	21.8	19.7	18.0	18.0	18.0
1992	Prom.	24.1	25.5	27.6	27.2	26.5	25.9	23.9	24.5	24.3	24.1	24.5	23.2	25.1	25.1
	MAX	26.8	28.7	31.3	31.2	29.0	28.8	26.0	26.1	27.7	26.0	28.6	27.1	31.3	31.3
	MIN	22.0	22.8	22.2	19.8	23.8	21.6	19.9	21.0	20.8	20.5	21.5	19.3	19.3	19.3
1993	Prom.	24.2	25.7	26.6	27.1	27.6	25.4	24.7	24.2	24.4	24.4	23.6	23.5	25.1	25.1
	MAX	27.2	29.4	30.5	29.8	30.0	31.2	26.8	26.3	26.2	25.9	26.9	27.0	31.2	31.2
	MIN	20.6	22.0	21.2	22.5	24.4	19.2	21.4	21.8	21.1	22.0	20.8	20.5	19.2	19.2
1994	Prom.	24.1	25.8	27.5	27.4	27.4	25.7	25.8	25.1	24.7	25.3	25.3	24.2	25.7	25.7
	MAX	27.8	28.8	29.8	30.2	31.0	27.8	28.3	27.4	27.0	27.9	28.6	27.1	31.0	31.0
	MIN	18.8	22.3	24.0	23.6	23.4	22.0	23.3	21.5	20.2	22.0	22.5	15.1	15.1	15.1
1995	Prom.	25.0	26.7	28.1	27.5	27.6	26.2	25.3	25.2	24.2	23.6	24.3	24.1	25.6	25.6
	MAX	30.0	32.1	31.5	31.0	30.0	29.5	26.9	29.1	27.8	26.1	27.2	27.1	32.1	32.1
	MIN	20.4	22.2	24.0	19.1	24.2	22.2	22.8	21.0	20.4	20.0	21.0	21.0	19.1	19.1
1996	Prom.	23.7	25.3	25.9	26.9	26.2	26.1	24.7	25.0	25.5	24.8	23.5	24.2	25.1	25.1
	MAX	27.9	29.4	30.8	30.2	31.3	28.4	26.5	27.0	28.2	28.4	28.5	28.8	31.3	31.3
	MIN	17.2	17.0	21.5	24.9	22.3	22.2	21.6	21.9	21.9	21.4	18.4	20.8	17.0	17.0
1997	Prom.	25.0	25.4	27.1	28.2	27.6	25.6	25.8	25.9	25.0	24.4	24.6	24.7	25.8	25.8
	MAX	28.1	28.6	30.3	30.6	31.0	29.1	28.8	27.9	27.4	28.2	29.3	29.8	31.0	31.0
	MIN	21.5	21.0	22.6	25.2	20.9	21.0	21.1	21.7	18.1	18.6	21.5	17.8	17.8	17.8
1998	Prom.	25.9	27.2	27.2	28.7	29.1	27.4	26.3	25.5	24.9	24.6	23.4	23.8	26.1	26.1
	MAX	28.0	30.4	30.0	31.6	32.6	29.9	29.8	30.2	28.4	28.2	27.0	27.8	32.6	32.6
	MIN	20.7	23.1	23.0	21.2	23.5	22.0	20.9	20.3	19.0	19.8	18.5	19.2	18.5	18.5
1999	Prom.	23.3	24.5	27.2	28.0	27.7	24.9	24.1	25.6	23.2	23.8	22.6	22.8	24.8	24.8
	MAX	27.2	28.0	30.6	31.0	33.9	27.7	26.3	29.6	26.2	26.1	26.0	26.1	33.9	33.9
	MIN	18.6	17.1	22.7	23.2	24.2	22.1	19.2	21.6	18.8	18.8	19.4	18.2	17.1	17.1
2000	Prom.	23.4	24.3	26.6	27.3	25.6	24.6	25.9	25.9	25.5	24.4	25.1	23.5	25.2	25.2
	MAX	27.0	28.5	29.0	29.7	28.2	27.2	29.0	27.8	27.7	26.8	28.0	27.4	29.7	29.7
	MIN	20.0	20.4	23.3	23.5	21.2	19.6	23.8	22.7	22.3	19.8	21.4	20.5	19.6	19.6
2001	Prom.	24.2	25.1	26.3	27.9	27.0	25.8	26.0	26.4	25.3	25.1	24.3	24.9	25.7	25.7
	MAX	27.8	29.0	31.5	30.1	31.4	28.9	28.9	28.9	27.9	27.4	26.8	28.0	31.5	31.5
	MIN	20.0	20.8	22.6	24.3	20.4	19.0	24.0	24.0	19.2	21.1	21.0	21.5	19.0	19.0
2002	Prom.	25.7	26.1	27.4	28.4	27.5	25.8	26.1	26.9	24.8	25.7	25.0	24.4	26.2	26.2
	MAX	28.1	31.2	31.1	30.6	30.3	28.4	27.7	29.0	27.8	28.0	29.9	28.0	31.2	31.2
	MIN	20.5	22.8	24.0	26.8	22.0	23.5	21.9	23.8	19.0	22.8	21.7	20.3	19.0	19.0
2003	Prom.	23.5	26.3	27.1	28.5	27.8	25.8	25.9	25.8	25.9	24.9	25.0	23.0	25.8	25.8
	MAX	29.7	29.8	31.0	31.3	32.0	28.0	27.3	27.8	27.8	27.4	26.8	26.0	32.0	32.0
	MIN	20.2	21.6	20.0	22.3	23.0	22.0	24.0	22.9	21.8	21.0	22.0	19.0	19.0	19.0
2004	Prom.	23.6	25.3	26.3	26.8	26.3	24.9	25.2	26.5	25.9	25.4	24.6	22.8	25.3	25.3
	MAX	26.5	29.5	29.6	29.8	29.4	28.6	28.5	30.1	28.0	27.9	27.2	27.7	30.1	30.1
	MIN	20.7	20.0	22.9	22.0	22.8	21.4	20.1	21.8	22.5	22.9	21.1	17.0	17.0	17.0
2005	Prom.	23.9	26.0	27.0	28.6	0.0	26.3	25.9	26.0	0.0	23.8	23.7	24.3	25.5	25.5
	MAX	27.0	28.7	29.9	33.5	0.0	28.0	28.0	28.0	0.0	27.5	25.4	26.9	33.5	33.5
	MIN	17.9	22.4	22.0	23.0	0.0	23.6	22.2	22.9	0.0	17.7	18.4	19.3	17.7	17.7
2006	Prom.	23.6	25.4	26.1	27.1	26.6	25.0	25.6	26.3	25.8	0.0	0.0	0.0	25.7	25.7
	MAX	26.5	28.0	29.8	29.7	29.8	27.4	28.6	28.0	27.4	0.0	0.0	0.0	29.8	29.8
	MIN	20.7	19.2	23.0	24.5	22.7	22.0	19.8	24.5	22.3	0.0	0.0	0.0	19.2	19.2
2007	Prom.	24.6	26.5	25.9	28.0	27.5	25.9	26.1	25.5	25.5	24.2	24.1	24.7	25.7	25.7
	MAX	28.0	28.9	30.5	30.3	30.9	27.8	28.0	27.6	27.8	27.0	27.8	27.2	30.9	30.9
	MIN	21.4	23.4	21.2	25.3	21.8	21.5	21.5	20.0	21.6	18.4	18.0	22.2	18.0	18.0
2008	Prom.	23.9	25.4	26.1	27.6	27.3	24.5	24.4	25.6	24.9	24.2	23.8	24.6	25.2	25.2
	MAX	27.4	28.8	29.6	31.0	30.6	27.3	27.2	28.9	27.9	27.4	27.2	27.2	31.0	31.0
	MIN	17.4	22.1	20.4	23.4	22.5	18.4	21.0	21.4	18.6	20.4	20.0	20.4	17.4	17.4
2009	Prom.	24.3	25.0	25.3	27.4	26.5	26.3	26.2	25.9	26.8	26.5	25.1	24.6	25.8	25.8
	MAX	27.8	29.6	28.0	31.5	30.4	30.0	27.2	27.9	29.8	28.6	28.0	27.8	31.5	31.5
	MIN	20.2	19.3	20.4	24.5	23.2	22.7	22.8	23.2	23.2	22.0	21.4	16.8	16.8	16.8
2010	Prom.	24.2	26.1	27.9	27.7	26.5	25.1	25.2	24.7	24.6	24.5	24.0	22.9	25.3	25.3
	MAX	30.4	29.2	32.0	30.5	29.2	28.2	27.6	28.0	27.6	27.4	27.6	26.8	32.0	32.0
	MIN	18.2	20.8	24.9	24.4	18.8	19.4	22.4	20.4	18.1	21.4	19.2	18.2	18.1	18.1
2011	Prom.	25.1	26.4	25.7	27.7	27.2	26.0	25.8	26.2	25.4	24.0	24.9	23.9	25.7	25.7
	MAX	28.1	29.4	27.8	31.4	29.8	28.9	28.6	29.4	28.8	28.2	28.0	26.4	31.4	31.4
	MIN	19.5	23.8	20.8	25.5	23.8	20.8	21.2	21.2	20.3	19.2	20.9	21.2	19.2	19.2
2012	Prom.	24.2	25.5	26.6	27.3	27.1	20.9	26.2	26.2	25.8	25.8	23.9	25.4	25.4	25.4
	MAX	28.4	28.4	29.3	30.8	30.2	27.1	28.6	28.6	27.9	27.8	27.0	28.0	30.8	30.8
	MIN	19.0	20.6	17.6	23.8	22.8	18.1	21.0	22.4	21.0	22.9	19.9	21.4	17.6	17.6
2013	Prom.	25.3	26.4	26.5	28.0	27.0	26.3	25.8	26.0	25.2	25.8	0.0	0.0	26.2	26.2
	MAX	27.8	28.8	30.6	32.0	30.6	28.2	27.4	29.2	28.5	28.4	0.0	0.0	32.0	32.0
	MIN	21.2	22.5	21.5	21.2	19.6	22.0	21.0	23.2	20.2	19.8	0.0	0.0	19.6	19.6
2014	Prom.	25.0	26.8	27.8	27.7	26.5	25.3	26.4	26.7	24.9	24.7	24.2	23.7	25.8	25.8
	MAX	28.8	29.8	30.2	29.9	29.0	28.0	29.4	28.6	28.0	28.2	27.4	27.2	30.2	30.2
	MIN	20.6	23.2	23.1	24.2	23.6	18.0	23.2	22.0	20.3	20.6	18.7	20.9	18.0	18.0
2015	Prom.	23.7	25.4	26.5	28.0	27.9	26.1	26.4	27.1	25.2	25.3	24.4	0.0	26.0	26.0
	MAX	28.6	28.8	29.8	30.7	30.5	28.5	29.0	28.8	28.2	27.4	29.0	0.0	30.7	30.7
	MIN	20.8	19.3	22.4	23.6	25.5	22.6	22.3	21.2	21.6	17.9	19.6	0.0	17.9	17.9

Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala (INSIVUMEH) (2015).

Figura 30: Temperatura Mínima Absoluta según parámetros de meteorología, utilizada para estudios en el laboratorio.

Valores Mensuales de temperatura mínima (C)

Nombre INSIVUMEH
GUATEMALA - GUATEMALA

LAT: 14.59 Norte
LON: 91.50 Oeste

Elevación 1,502 m.s.n.m.

		AÑOS: 1990 al 2015												Annual
		ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	
1990	Prom.	13.6	13.5	14.4	16.1	17.0	16.7	16.4	16.3	16.3	15.9	15.1	14.1	15.4
	MIN	10.4	10.5	11.8	13.1	15.1	15.1	14.6	16.1	15.2	11.7	12.1	9.8	9.8
	MAX	15.4	16.0	16.2	17.9	18.0	17.7	18.0	16.8	17.0	17.6	17.5	16.0	18.0
1991	Prom.	14.0	13.6	15.0	17.0	17.1	17.0	16.3	16.5	16.3	16.0	14.5	14.5	15.7
	MIN	11.5	10.2	10.0	13.1	15.9	15.0	15.1	15.2	15.2	14.9	10.6	11.6	10.0
	MAX	15.6	16.5	17.8	19.1	18.8	18.5	17.8	17.5	17.2	17.0	16.5	18.8	19.1
1992	Prom.	14.2	14.0	15.6	16.6	16.4	17.0	16.3	16.1	16.2	15.8	15.2	13.8	15.6
	MIN	11.6	10.4	13.2	13.8	12.3	11.2	15.2	15.0	14.3	14.1	12.8	11.8	10.4
	MAX	15.8	16.8	18.8	19.0	18.4	18.5	17.2	17.6	17.0	17.6	17.1	16.3	19.0
1993	Prom.	13.2	13.3	14.1	16.5	16.9	16.7	16.0	16.0	16.0	15.9	14.0	12.8	15.1
	MIN	8.2	11.0	9.5	13.6	15.2	15.7	14.5	13.5	14.8	13.3	11.0	8.5	8.2
	MAX	15.2	16.2	17.0	18.6	18.8	18.6	17.2	17.4	17.0	17.2	16.8	15.8	18.8
1994	Prom.	12.8	14.0	14.0	15.6	16.6	15.8	15.7	15.4	15.8	16.0	15.3	14.2	15.1
	MIN	9.3	11.4	9.5	13.8	14.5	14.1	13.1	13.9	14.5	13.6	12.9	12.0	9.3
	MAX	15.3	17.2	16.9	18.3	18.4	17.2	17.2	16.2	17.0	17.2	17.0	16.2	18.4
1995	Prom.	13.5	13.3	14.2	16.6	16.9	17.2	16.4	17.0	16.5	16.1	14.6	14.3	15.6
	MIN	11.2	10.4	10.4	14.2	15.4	14.8	12.1	15.9	15.0	13.9	12.0	12.4	10.4
	MAX	16.6	15.8	17.0	19.0	18.3	18.3	18.0	18.2	17.4	17.8	17.1	16.5	19.0
1996	Prom.	12.3	13.0	13.6	16.2	16.8	17.0	16.5	15.9	16.7	15.9	14.7	13.6	15.2
	MIN	6.9	7.8	8.6	15.0	15.0	15.9	15.0	14.0	15.0	13.8	11.8	11.5	6.9
	MAX	16.0	15.4	17.0	17.4	18.6	18.1	18.2	18.0	17.9	18.0	17.0	15.2	18.6
1997	Prom.	13.3	14.0	14.7	16.0	16.2	16.7	17.0	16.8	16.8	16.2	16.1	13.9	15.6
	MIN	10.2	12.3	12.3	13.6	14.6	14.9	15.2	14.9	15.4	14.0	14.0	7.6	7.6
	MAX	15.4	16.4	17.8	18.2	18.1	18.8	18.1	18.0	17.7	18.2	19.0	17.4	19.0
1998	Prom.	14.3	13.6	14.5	16.5	16.8	17.6	16.3	17.0	16.4	16.6	15.6	13.5	15.7
	MIN	11.5	8.5	10.3	13.4	14.4	16.6	14.0	15.8	14.8	15.4	12.4	10.4	8.5
	MAX	18.0	17.8	18.6	19.4	18.8	19.2	18.6	18.4	18.2	18.2	17.7	16.1	19.4
1999	Prom.	12.8	12.5	13.8	15.5	16.4	16.4	15.5	16.0	16.0	15.2	13.6	12.7	14.7
	MIN	8.5	9.0	10.1	11.8	14.1	15.0	14.4	14.0	14.2	11.4	11.5	8.6	8.5
	MAX	16.8	14.9	16.1	18.0	17.7	18.1	16.9	17.1	18.1	17.8	17.2	15.3	18.1
2000	Prom.	12.0	12.9	14.5	15.5	16.8	16.5	16.0	16.3	16.3	15.3	15.3	13.3	15.1
	MIN	10.0	10.0	11.0	13.7	15.0	15.2	15.1	14.9	15.2	12.0	12.5	9.9	9.9
	MAX	15.0	15.0	17.1	17.4	17.9	17.9	17.2	18.0	17.4	17.0	17.2	15.8	18.0
2001	Prom.	12.1	13.5	13.6	15.6	16.6	16.0	16.4	16.8	16.5	15.8	13.6	14.2	15.1
	MIN	8.5	11.0	10.0	13.3	14.0	13.8	14.0	15.0	14.4	13.6	11.8	11.7	8.5
	MAX	14.8	15.6	16.4	17.2	19.2	17.5	18.0	18.0	17.9	17.5	16.4	17.3	19.2
2002	Prom.	13.2	13.1	14.1	15.2	16.4	16.4	16.5	16.1	16.1	15.8	14.2	14.2	15.1
	MIN	6.0	10.1	12.3	13.4	15.0	15.0	15.0	14.0	13.0	14.5	10.0	12.0	6.0
	MAX	16.3	15.2	16.4	17.6	18.3	18.0	18.2	17.6	18.1	17.5	18.0	16.1	18.3
2003	Prom.	12.5	13.7	15.2	15.4	17.5	16.6	16.6	16.7	16.9	16.8	15.4	12.5	15.5
	MIN	10.2	11.8	10.9	8.6	15.9	15.0	14.9	15.0	15.5	15.0	12.1	9.6	8.6
	MAX	15.5	16.6	17.6	18.6	19.3	17.5	18.1	18.3	18.0	18.2	17.1	15.4	19.3
2004	Prom.	13.1	13.9	14.8	16.1	16.9	17.3	16.4	17.0	16.8	16.5	14.5	14.0	15.6
	MIN	11.0	10.4	12.5	12.8	15.0	16.0	15.0	15.9	15.0	14.4	9.9	9.3	9.3
	MAX	16.2	16.1	16.6	19.0	18.4	19.8	18.0	18.8	18.6	18.6	17.0	19.8	19.8
2005	Prom.	11.9	13.0	16.0	16.5	16.7	17.0	16.3	16.3	0.0	15.9	13.7	0.0	15.4
	MIN	9.0	10.8	12.9	13.2	14.5	15.5	15.0	14.2	0.0	12.0	9.5	0.0	9.0
	MAX	18.5	17.0	19.2	18.9	19.6	19.5	18.0	18.4	0.0	17.6	16.2	0.0	19.6
2006	Prom.	13.1	0.0	13.3	15.6	16.5	16.7	11.9	16.6	16.5	0.0	0.0	0.0	15.0
	MIN	11.0	0.0	10.9	11.3	15.5	15.8	5.0	15.0	15.1	0.0	0.0	0.0	5.0
	MAX	16.1	0.0	16.2	19.0	18.5	17.6	16.4	18.1	18.2	0.0	0.0	0.0	19.0
2007	Prom.	14.3	13.7	14.9	16.5	17.3	17.0	17.0	16.7	16.4	15.9	14.3	13.6	15.6
	MIN	11.8	9.0	12.2	14.0	16.0	15.0	14.8	15.0	15.0	11.9	11.8	10.2	9.0
	MAX	16.0	17.4	16.7	18.8	18.8	17.8	18.4	17.9	17.4	17.7	16.0	15.7	18.8
2008	Prom.	13.4	14.3	14.2	15.9	16.8	16.1	15.6	16.1	16.2	15.3	12.9	13.2	15.0
	MIN	8.2	11.8	9.8	13.1	14.5	15.0	13.5	15.0	14.0	11.4	9.5	9.0	8.2
	MAX	15.3	16.6	17.8	18.2	18.2	17.8	17.4	17.2	17.8	18.0	16.2	16.0	18.2
2009	Prom.	13.4	13.3	13.3	16.1	17.1	17.0	16.9	16.7	17.6	17.3	15.4	14.5	15.7
	MIN	9.8	9.5	8.4	13.0	15.0	14.0	15.5	15.0	16.1	15.0	12.8	10.3	8.4
	MAX	16.0	16.2	16.6	18.6	19.2	19.2	18.4	18.6	18.8	19.3	17.8	17.6	19.3
2010	Prom.	13.1	15.2	15.3	17.4	18.1	17.8	17.3	17.2	17.0	15.4	14.5	12.1	15.9
	MIN	7.6	11.2	11.6	14.8	16.0	16.2	16.0	16.0	15.8	13.0	10.4	9.2	7.6
	MAX	15.6	18.4	18.6	20.1	20.0	19.6	18.2	18.6	18.2	18.6	17.8	16.0	20.1
2011	Prom.	13.9	14.3	13.7	15.9	16.9	16.7	16.7	16.8	16.4	15.6	14.4	13.4	15.4
	MIN	11.2	12.4	10.8	14.2	14.6	15.5	14.6	15.0	14.6	11.4	9.4	11.0	9.4
	MAX	16.1	16.8	16.1	18.2	18.8	19.0	18.0	18.6	17.8	18.0	17.2	15.8	15.2
2012	Prom.	13.7	14.1	14.0	15.6	17.2	16.8	16.4	16.3	16.2	15.7	13.1	13.2	15.2
	MIN	9.9	11.2	11.4	13.2	15.2	15.4	13.9	13.8	15.0	13.2	9.8	10.4	9.8
	MAX	15.8	16.2	15.8	17.7	19.0	19.1	18.3	18.4	17.6	17.2	15.9	15.2	19.1
2013	Prom.	13.6	13.8	13.3	16.1	16.4	16.9	16.3	16.3	16.0	16.3	0.0	0.0	15.5
	MIN	10.1	10.5	8.2	14.7	14.4	14.7	15.2	14.7	14.4	15.2	0.0	0.0	8.2
	MAX	15.8	17.2	16.8	18.1	19.6	20.5	17.6	18.2	17.5	17.5	0.0	0.0	20.5
2014	Prom.	12.5	14.7	15.6	16.5	17.0	16.8	16.6	15.9	15.6	16.0	14.8	13.6	15.5
	MIN	8.0	12.8	13.4	12.5	15.3	14.0	15.0	15.0	14.5	11.6	11.5	11.5	8.0
	MAX	14.6	17.2	18.0	19.8	19.5	18.1	18.8	16.8	17.0	17.5	18.4	16.0	19.8
2015	Prom.	13.6	13.2	14.8	17.1	17.2	17.6	17.4	17.7	17.9	17.6	17.3	0.0	16.5
	MIN	9.6	10.9	12.6	13.8	15.5	16.6	15.8	15.4	15.9	15.8	14.2	0.0	9.6
	MAX	16.0	15.1	17.2	19.2	18.8	18.6	18.6	19.8	19.0	19.2	19.2	0.0	19.8

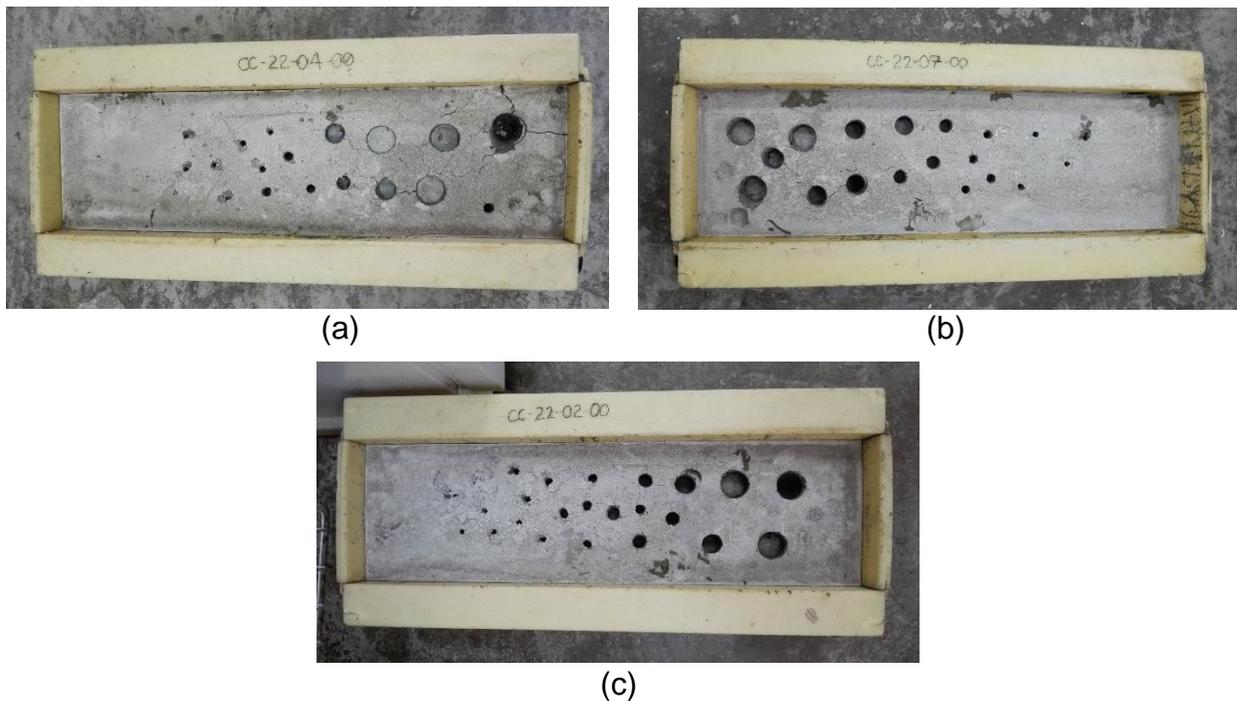
Fuente: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología de Guatemala (INSIVUMEH) (2015).

Las temperatura obtenidas, tanto la temperatura máxima de 32°C y la mínima de 8°C, serán utilizadas para determinar las temperaturas a las cuales se encontraran los baños de curado en la fase de laboratorio, en la que se determina la temperatura de referencia y la energía de activación. También, por medio del conocimiento de las temperaturas anteriores, un tercer baño debe estar en a una temperatura media entre las dos anteriores, es decir a 23°C.

Determinación de Tiempos de Fraguado para las Temperaturas Extremas y Determinación de Tiempos de Rotura de Cubos de 50mm (2 pulgadas)

Como procedimiento siguiente fue necesario conocer los tiempos de fraguado del concreto sometido a la temperatura máxima, mínima y media, anteriormente determinada. Se realizaron pruebas con base a los procedimientos descritos en la normativa COGUANOR NTG 41017 h12 (ASTM C403/C403M), el método del ensayo para la determinación del tiempo de fraguado de mezclas de concreto por su resistencia a la penetración. Dosificando la mezcla de concreto, tamizándola con el fin de obtener el mortero con las mismas dosificaciones del proyecto. Para la realización de las prácticas, fue necesario acondicionar equipos para obtener las temperaturas deseadas. Los elementos sometidos a una temperatura máxima de 32°C fueron ubicados en la cámara de viento, adecuada para dicho fin. Los sometidos a una temperatura mínima de 8°C fueron ubicados en una incubadora programada a estas temperaturas, y la temperatura media de 23°C, en los tanques de curado del laboratorio físico del CETEC, los que fueron utilizados durante todo el estudio.

Figura 31: Ensayos de determinación de tiempos de fraguado iniciales y tiempos de fraguado finales, se muestra la viga sometida a la temperatura máxima de 32°C (a), temperatura media de 23°C (b) y temperatura mínima de 8°C (c).



Fuente: Propia 2015.

A continuación se mostraran informes oficiales de laboratorio, luego de la realización de las prácticas, dichos resultados serán utilizados posteriormente para la determinación los tiempos de las roturas de los cubos, en la fase de laboratorio.

En resumen los tiempos de fraguado finales y fraguados iniciales obtenidos luego de las pruebas realizadas fueron:

Temperatura (°C)	Tiempo de Fraguado Inicial (Horas)	Tiempo de Fraguado Final (Horas)
Máxima 32°C	7:20	8:21
Media 23°C	9:35	10:21
Mínima 8°C	14:14	17:17

Según la normativa, se prepararan tres series de cubos de mortero de 50mm (2 pulgadas) con 18 cubos por grupo, moldeados según la normativa COGUANOR NTG 41003 h4 (ASTM C109/C109M) y se sumergen con cuidado en cada uno de los baños a temperatura controlada, tal como fueron determinadas con anterioridad, según datos del INSIVUMEH. Se determina, para cada grupo de cubos, la resistencia a compresión de tres cubos, según del método de ensayo COGUANOR NTG 41003 h4 (ASTM C109/C109M), a una edad que es aproximadamente el doble de la edad en la que se alcanza el fraguado final. Haciendo subsecuentes ensayos sobre tres cubos de cada grupo a edades aproximadamente el doble que las edades de los ensayos previos.

Figura 32: Realización de la mezcla de concreto en la bachadora, según el proporcionamiento utilizado en el proyecto (a), transporte de la mezcla en la carretilla y realización de las pruebas al concreto fresco (b) y cribado en húmedo de la mezcla de concreto con el fin de la obtención del mortero para la realización de los cubos de 50mm (2 pulgadas) (c).



(a)



(b)



(c)

Fuente: Propia 2015.

Figura 33: Momento de elaboración de las series de cubos de 50mm (2 pulgadas) por técnicos especializados en morteros (a), y en la siguiente imagen se muestra al frente el procedimiento de tamizado para la obtención del mortero y en el fondo la realización de los cubos (b).



Fuente: Propia 2015.

Según los tiempos de fraguado finales la cantidad de horas a las que se efectuaran las roturas de los cubos de 50mm (2 pulgadas), según las temperaturas seleccionadas para el estudio, serán las siguientes:

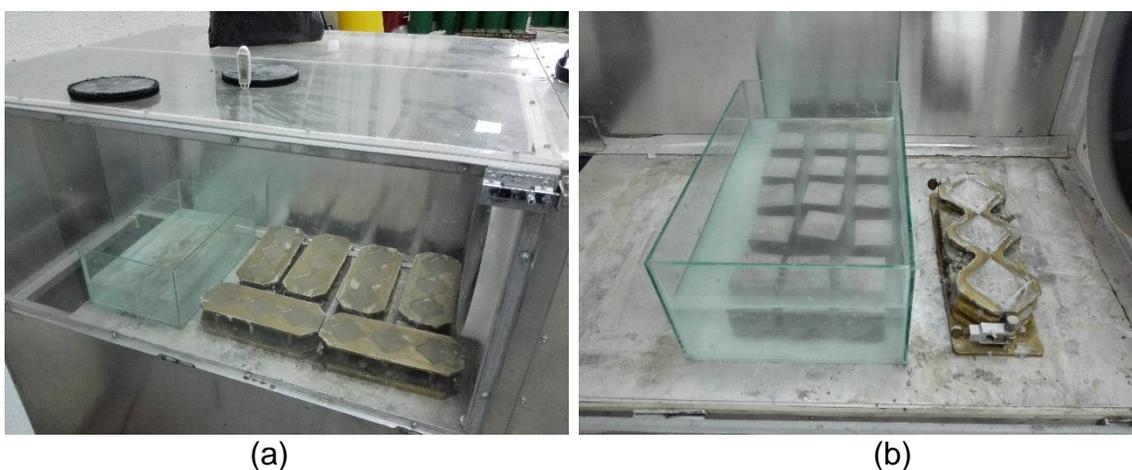
Temperatura (°C)	Fraguado Final (Horas)	Cantidad de Horas según Número de Rotura					
		1	2	3	4	5	6
Máxima 32°C	8	16	32	64	128	256	512
Media 23°C	10	20	40	80	160	320	640
Mínima 8°C	17	34	68	136	272	544	1088

Por lo tanto, la tabla de la calendarización a las cuales se efectuaran las roturas de los cubos a 32°C, ubicados en la cámara de viento como se mencionó con anterioridad serán:

Fecha	Hora	Roturas a 32°C
martes, 09 de Junio de 2015	03:17:00 p. m.	1
martes, 09 de Junio de 2015	04:17:00 p. m.	2
martes, 09 de Junio de 2015	05:17:00 p. m.	3
martes, 09 de Junio de 2015	06:17:00 p. m.	4
martes, 09 de Junio de 2015	07:17:00 p. m.	5
martes, 09 de Junio de 2015	08:17:00 p. m.	6
martes, 09 de Junio de 2015	09:17:00 p. m.	7
martes, 09 de Junio de 2015	10:17:00 p. m.	8

miércoles, 10 de Junio de 2015	06:17:00 a. m.	16
miércoles, 10 de Junio de 2015	10:17:00 p. m.	32
viernes, 12 de Junio de 2015	06:17:00 a. m.	64
domingo, 14 de Junio de 2015	10:17:00 p. m.	128
sábado, 20 de Junio de 2015	06:17:00 a. m.	256
martes, 30 de Junio de 2015	10:17:00 p. m.	512

Figura 34: Se muestra fraguado inicial de los cubos en la cámara de viento sometidos a una temperatura de 32°C (a), en la siguiente imagen se muestran los cubos recientemente desencofrados sumergidos a el baño de curado previamente adecuado a la temperatura respectiva (b).



Fuente: Propia 2015.

Según la tabla de la calendarización a las cuales se efectuaran las roturas de los cubos a 23°C ubicados en el laboratorio físico, se efectuaran según:

Fecha	Hora	Roturas a 23°C
martes, 09 de Junio de 2015	03:17:00 p. m.	1
martes, 09 de Junio de 2015	04:17:00 p. m.	2
martes, 09 de Junio de 2015	05:17:00 p. m.	3
martes, 09 de Junio de 2015	06:17:00 p. m.	4
martes, 09 de Junio de 2015	07:17:00 p. m.	5
martes, 09 de Junio de 2015	08:17:00 p. m.	6
martes, 09 de Junio de 2015	09:17:00 p. m.	7
martes, 09 de Junio de 2015	10:17:00 p. m.	8
martes, 09 de Junio de 2015	11:17:00 p. m.	9
miércoles, 10 de Junio de 2015	12:17:00 a. m.	10
miércoles, 10 de Junio de 2015	10:17:00 a. m.	20
jueves, 11 de Junio de 2015	06:17:00 a. m.	40

viernes, 12 de Junio de 2015	10:17:00 p. m.	80
martes, 16 de Junio de 2015	06:17:00 a. m.	160
lunes, 22 de Junio de 2015	10:17:00 p. m.	320
lunes, 06 de Julio de 2015	06:17:00 a. m.	640

Figura 35: Se muestra fraguado inicial de los cubos en el laboratorio físico del CETEC, el cual cuenta con una temperatura controlada de 23 ° C (a) y en la siguiente imagen se muestra el baño de curado en donde fueron sumergidos (b).



Fuente: Propia 2015.

La tabla de la calendarización a las cuales se efectuaran las roturas de los cubos a 8°C, ubicados en la Incubadora, será la siguiente:

Fecha	Hora	Roturas a 8°C
martes, 09 de Junio de 2015	03:17:00 p. m.	1
martes, 09 de Junio de 2015	04:17:00 p. m.	2
martes, 09 de Junio de 2015	05:17:00 p. m.	3
martes, 09 de Junio de 2015	06:17:00 p. m.	4
martes, 09 de Junio de 2015	07:17:00 p. m.	5
martes, 09 de Junio de 2015	08:17:00 p. m.	6
martes, 09 de Junio de 2015	09:17:00 p. m.	7
martes, 09 de Junio de 2015	10:17:00 p. m.	8
martes, 09 de Junio de 2015	11:17:00 p. m.	9
miércoles, 10 de Junio de 2015	12:17:00 a. m.	10
miércoles, 10 de Junio de 2015	01:17:00 a. m.	11
miércoles, 10 de Junio de 2015	02:17:00 a. m.	12
miércoles, 10 de Junio de 2015	03:17:00 a. m.	13
miércoles, 10 de Junio de 2015	04:17:00 a. m.	14

miércoles, 10 de Junio de 2015	05:17:00 a. m.	15
miércoles, 10 de Junio de 2015	06:17:00 a. m.	16
miércoles, 10 de Junio de 2015	07:17:00 a. m.	17
jueves, 11 de Junio de 2015	12:17:00 a. m.	34
viernes, 12 de Junio de 2015	10:17:00 a. m.	68
lunes, 15 de Junio de 2015	06:17:00 a. m.	136
sábado, 20 de Junio de 2015	10:17:00 p. m.	272
jueves, 02 de Julio de 2015	06:17:00 a. m.	544
viernes, 24 de Julio de 2015	10:17:00 p. m.	1088

Figura 36: Se muestra la incubadora adecuada a una temperatura de 8°C (a), en la siguiente muestra fraguado inicial de los cubos aun en los moldes espaciales de cubos (b), y en la última imagen se muestran los cubos recientemente desencoformados previo a ser sumergidos en el baño de curado previamente adecuado a la temperatura respectiva (c).



(a)



(b)



(c)

Fuente: Propia 2015.

Siendo la tabla resumen final de la calendarización a las cuales se efectuaron las roturas de los cubos, a las tres temperaturas, la siguiente:

Fecha	Hora	Roturas a 32°C	Roturas a 23°C	Roturas a 8°C
martes, 09 de Junio de 2015	03:17:00 p. m.	1	1	1
martes, 09 de Junio de 2015	04:17:00 p. m.	2	2	2
martes, 09 de Junio de 2015	05:17:00 p. m.	3	3	3
martes, 09 de Junio de 2015	06:17:00 p. m.	4	4	4
martes, 09 de Junio de 2015	07:17:00 p. m.	5	5	5
martes, 09 de Junio de 2015	08:17:00 p. m.	6	6	6

martes, 09 de Junio de 2015	09:17:00 p. m.	7	7	7
martes, 09 de Junio de 2015	10:17:00 p. m.	8	8	8
miércoles, 10 de Junio de 2015	12:17:00 a. m.	10	10	10
miércoles, 10 de Junio de 2015	06:17:00 a. m.	16	16	16
miércoles, 10 de Junio de 2015	07:17:00 a. m.	17	17	17
miércoles, 10 de Junio de 2015	10:17:00 a. m.	20	20	20
miércoles, 10 de Junio de 2015	10:17:00 p. m.	32	32	32
jueves, 11 de Junio de 2015	12:17:00 a. m.	34	34	34
jueves, 11 de Junio de 2015	06:17:00 a. m.	40	40	40
viernes, 12 de Junio de 2015	06:17:00 a. m.	64	64	64
viernes, 12 de Junio de 2015	10:17:00 a. m.	68	68	68
viernes, 12 de Junio de 2015	10:17:00 p. m.	80	80	80
domingo, 14 de Junio de 2015	10:17:00 p. m.	128	128	128
lunes, 15 de Junio de 2015	06:17:00 a. m.	136	136	136
martes, 16 de Junio de 2015	06:17:00 a. m.	160	160	160
sábado, 20 de Junio de 2015	06:17:00 a. m.	256	256	256
sábado, 20 de Junio de 2015	10:17:00 p. m.	272	272	272
lunes, 22 de Junio de 2015	10:17:00 p. m.	320	320	320
martes, 30 de Junio de 2015	10:17:00 p. m.	512	512	512
jueves, 02 de Julio de 2015	06:17:00 a. m.		544	544
lunes, 06 de Julio de 2015	06:17:00 a. m.		640	640
viernes, 24 de Julio de 2015	10:17:00 p. m.			1088

Figura 37: Se muestran los cubos en los moldes normados (a), en la siguiente imagen se muestran los cubos después de haber sido desencofrados (b).



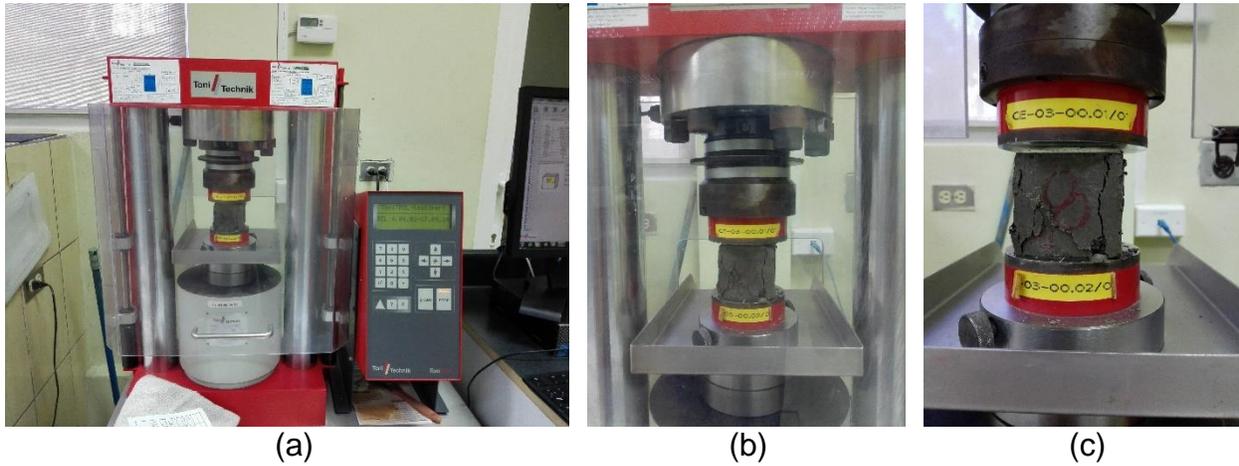
(a)



(b)

Fuente: Propia 2015.

Figura 38: Se muestran el equipo normado para las pruebas de compresión de cubos de 50mm (2 pulgadas) (a), en la siguiente imagen se muestran el ensayo de un cubo (b) y en la última imagen se muestra un cubo posterior al ensayo de compresión (c).



Fuente: Propia 2015.

Mostrándose a continuación los informes oficiales de laboratorio de las roturas efectuadas a las diferentes edades, para cada una de las temperaturas estudiadas:



**CEMENTOS PROGRESO S. A.
CENTRO TECNOLÓGICO**

15 Av. 18 - 01 Zona 6, La Pedrera
Tel: 2286 - 4178 Fax: 2286 - 4181
laboratoriocetec@cempro.com

OT:	25826
FECHA:	2015-06-09
PÁGINA:	2 DE 3
IMPRESIÓN:	2015-10-15

CLIENTE	CENTRO DE INVESTIGACION & DESARROLLO/ CETEC	CONTACTO	ING. ESTUARDO HERRERA		
DIRECCION	15 AV. 18 - 01 ZONA 6, FINCA LA PEDRERA	TELEFONO	2286-4100		
PROYECTO	ENERGIA DE ACTIVACION PARA LA CURVA DE MADUREZ	ANALISTA (S)	LABORATORIO	LABORATORIO	CE

INFORME DE ENSAYO DE CUBOS

CUBO No.	IDENTIFICACIÓN CLIENTE	TOMA DE CUBOS		HORA ROTURA	UBICACIÓN ELEMENTO FUNDIDO	Area Cubo (pulg ²)	FECHA RUPTURA	EDAD (Horas)	RESISTENCIA	
		POR	FECHA						(N/mm ²)	(Psi)
1	Cubos curados a 32°C en Camara de Viento	Laboratorio	09/06/2015	06:17:00 a.m.	Pavimento	4	10/06/2015	16	23.86	3461
2	Cubos curados a 32°C en Camara de Viento	Laboratorio	09/06/2015	22:17:00 pm	Pavimento	4	10/06/2015	32	39.6	5743
3	Cubos curados a 32°C en Camara de Viento	Laboratorio	09/06/2015	06:17:00 a.m.	Pavimento	4	12/06/2015	64	50.5	7324
4	Cubos curados a 32°C en Camara de Viento	Laboratorio	09/06/2015	22:17:00 pm	Pavimento	4	14/06/2015	128	57.16	8290
5	Cubos curados a 32°C en Camara de Viento	Laboratorio	09/06/2015	06:17:00 a.m.	Pavimento	4	20/06/2015	256	64.12	9300
6	Cubos curados a 32°C en Camara de Viento	Laboratorio	09/06/2015	22:17:00 pm	Pavimento	4	30/06/2015	512	69.81	10125

Responsable

Ing. Mario de León
Jefe de Laboratorio

OBSERVACIONES

Los resultados de ensayo se refieren a las muestras presentadas por el Cliente.



CEMENTOS PROGRESO S. A.
CENTRO TECNOLÓGICO

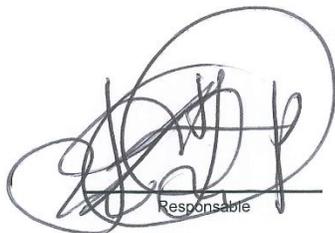
15 Av. 18 - 01 Zona 6, La Pedrera
Tel: 2286 - 4178 Fax: 2286 - 4181
laboratoriocetec@cempro.com

OT:	25826
FECHA:	2015-06-09
PÁGINA:	1 DE 3
IMPRESIÓN:	2015-10-15

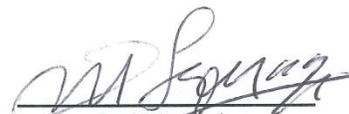
CLIENTE	CENTRO DE INVESTIGACION & DESARROLLO/ CETEC	CONTACTO	ING. ESTUARDO HERRERA		
DIRECCION	15 AV. 18 - 01 ZONA 6, FINCA LA PEDRERA	TELEFONO	2286-4100		
PROYECTO	ENERGIA DE ACTIVACION PARA LA CURVA DE MADUREZ	ANALISTA (S)	LABORATORIO	LABORATORIO	CE

INFORME DE ENSAYO DE CUBOS

CUBO No.	IDENTIFICACIÓN CLIENTE	TOMA DE CUBOS		HORRA ROTURA	UBICACIÓN ELEMENTO FUNDIDO	Area Cubo (pulg ²)	FECHA RUPTURA	EDAD (Horas)	RESISTENCIA	
		POR	FECHA						(N/mm ²)	(Psi)
1	Cubos curados a 23°C	Laboratorio	09/06/2015	10:17:00 a.m.	Pavimento	4	10/06/2015	20	4.32	627
2	Cubos curados a 23°C	Laboratorio	09/06/2015	06:17:00 a.m.	Pavimento	4	11/06/2015	40	29.63	4297
3	Cubos curados a 23°C	Laboratorio	09/06/2015	10:17:00 p.m.	Pavimento	4	12/06/2015	80	47.55	6897
4	Cubos curados a 23°C	Laboratorio	09/06/2015	06:17:00 a.m.	Pavimento	4	16/06/2015	160	55.86	8102
5	Cubos curados a 23°C	Laboratorio	09/06/2015	10:17:00 p.m.	Pavimento	4	22/06/2015	320	63.6	9224
6	Cubos curados a 23°C	Laboratorio	09/06/2015	06:17:00 a.m.	Pavimento	4	06/07/2015	640	69.31	10053



Responsable



Ing. Mario de León
Jefe de Laboratorio

OBSERVACIONES

Los resultados de ensayo se refieren a las muestras presentadas por el Cliente.



CEMENTOS PROGRESO S. A.
CENTRO TECNOLÓGICO

15 Av. 18 - 01 Zona 6, La Pedrera
Tel: 2286 - 4178 Fax: 2286 - 4181
laboratoriocetec@cempro.com

OT:	25826
FECHA:	2015-06-09
PÁGINA:	3 DE 3
IMPRESIÓN:	2015-10-15

CLIENTE	CENTRO DE INVESTIGACION & DESARROLLO/ CETEC	CONTACTO	ING. ESTUARDO HERRERA		
DIRECCION	15 AV. 18 - 01 ZONA 6, FINCA LA PEDRERA	TELEFONO	2286-4100		
PROYECTO	ENERGIA DE ACTIVACION PARA LA CURVA DE MADUREZ	ANALISTA (S)	LABORATORIO	LABORATORIO	CE

INFORME DE ENSAYO DE CUBOS

CUBO No.	IDENTIFICACIÓN CLIENTE	TOMA DE CUBOS		HORRA ROTURA	UBICACIÓN ELEMENTO FUNDIDO	Area Cubo (pulg ²)	FECHA RUPTURA	EDAD (Horas)	RESISTENCIA	
		POR	FECHA						(N/mm ²)	(Psi)
1	Cubos curados a 8°C en Incubadora	Laboratorio	09/06/2015	12:17:00 a.m.	Pavimento	4	11/06/2015	34	2.38	345
2	Cubos curados a 8°C en Incubadora	Laboratorio	09/06/2015	10:17:00 a.m.	Pavimento	4	12/06/2015	68	26.55	3851
3	Cubos curados a 8°C en Incubadora	Laboratorio	09/06/2015	06:17:00 a.m.	Pavimento	4	15/06/2015	136	44.00	6381
4	Cubos curados a 8°C en Incubadora	Laboratorio	09/06/2015	10:17:00 p.m.	Pavimento	4	20/06/2015	272	62.45	9058
5	Cubos curados a 8°C en Incubadora	Laboratorio	09/06/2015	06:17:00 a.m.	Pavimento	4	02/07/2015	544	64.14	9303
6	Cubos curados a 8°C en Incubadora	Laboratorio	09/06/2015	10:17:00 p.m.	Pavimento	4	24/07/2015	1088	67.65	9812

Responsable

Ing. Mario de León
 Jefe de Laboratorio

OBSERVACIONES

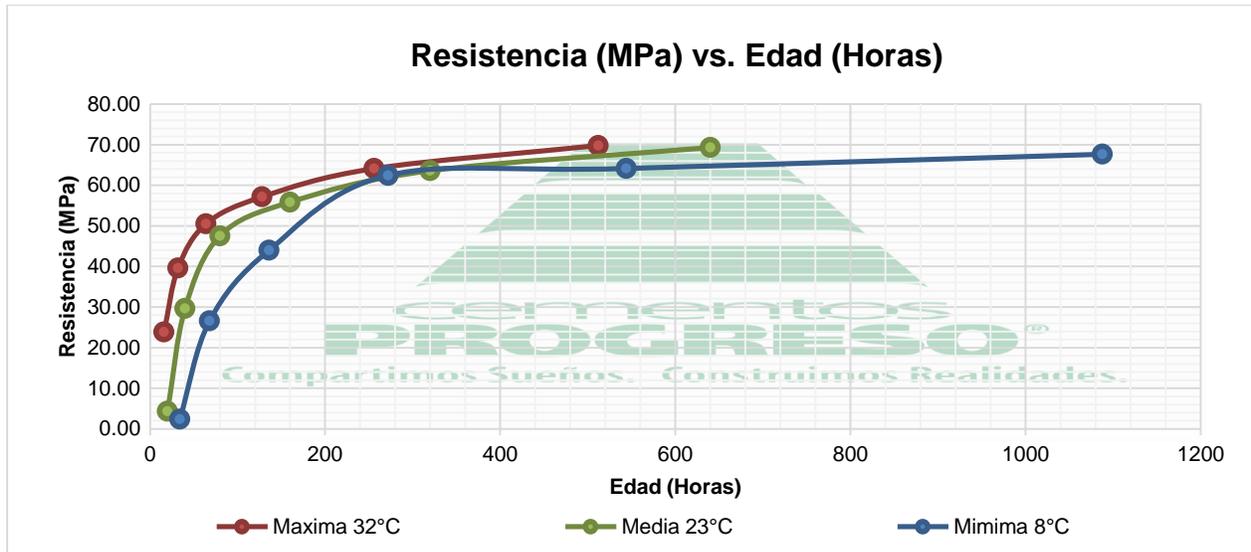
Los resultados de ensayo se refieren a las muestras presentadas por el Cliente.

Determinación de la Temperatura de Referencia y Energía de Activación

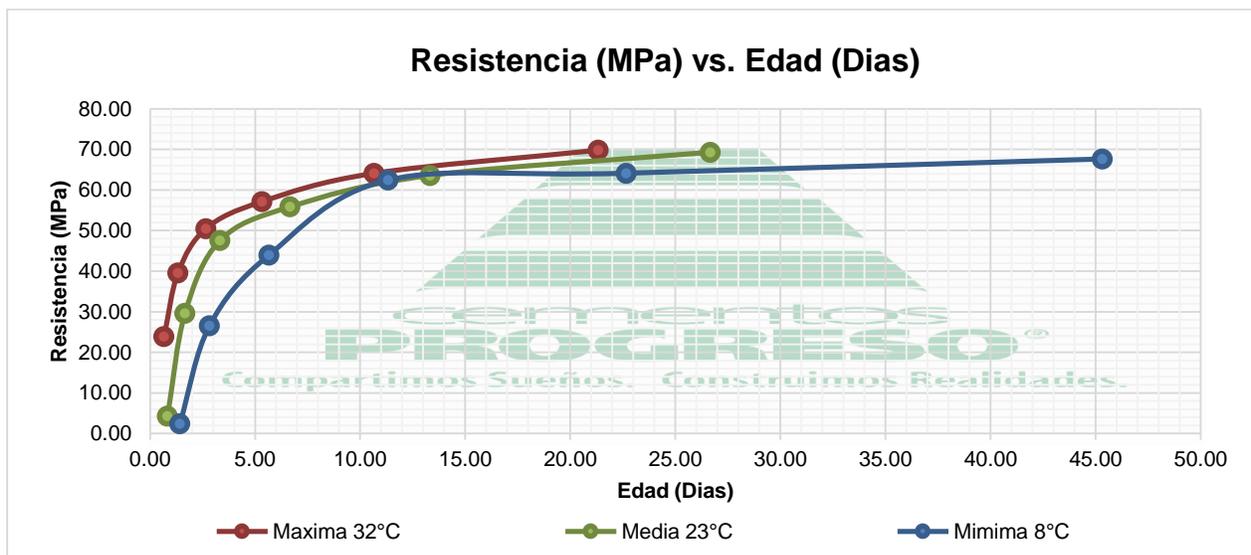
Tal como lo dicta la Norma, se efectúan las rotura de la series de cubos de 50mm (2 pulgadas) a las edades calendarizadas con anterioridad, respetando que esto sea efectuado en función de la norma y por personal capacitado para su realización, ya que de lo contrario el estudio no reflejaría las condiciones reales del concreto.

ID Bachada	No. De Ensayo	Edad (Horas)	Edad (Días)	Reciproco de la Edad (1/Edad) (1/Días)	Resistencia Rotura No.1 (N/mm ²)	Resistencia Rotura No.2 (N/mm ²)	Resistencia Rotura No.3 (N/mm ²)	Resistencia (MPa)	Reciproco de la Resistencia (1/Resistencia) (1/MPa)	Intercepto	Pendiente	Valores K
Máxima 32°C	1	16	0.67	1.50	23.74	23.90	23.94	23.86	0.0419	0.0133	0.0184	0.7228
	2	32	1.33	0.75	39.90	39.55	39.35	39.60	0.0253			
	3	64	2.67	0.38	49.60	50.42	51.48	50.50	0.0198			
	4	128	5.33	0.19	56.86	56.99	57.63	57.16	0.0175			
	5	256	10.67	0.09	63.91	63.98	64.46	64.12	0.0156			
	6	512	21.33	0.05	70.05	69.77	69.61	69.81	0.0143			
Media 23°C	1	20	0.83	1.20	4.07	4.05	4.85	4.32	0.2313	0.0147	0.1789	0.0822
	2	40	1.67	0.60	29.33	30.30	29.27	29.63	0.0337			
	3	80	3.33	0.30	47.16	47.66	47.83	47.55	0.0210			
	4	160	6.67	0.15	56.18	55.95	55.45	55.86	0.0179			
	5	320	13.33	0.08	64.10	63.25	63.45	63.60	0.0157			
	6	640	26.67	0.04	69.58	69.42	68.93	69.31	0.0144			
Mínima 8°C	1	34	1.42	0.71	2.61	2.44	2.09	2.38	0.4202	0.0436	0.5675	0.0768
	2	68	2.83	0.35	26.10	26.35	27.20	26.55	0.0377			
	3	136	5.67	0.18	44.29	44.23	43.48	44.00	0.0227			
	4	272	11.33	0.09	62.08	62.51	62.76	62.45	0.0160			
	5	544	22.67	0.04	63.57	64.37	64.48	64.14	0.0156			
	6	1088	45.33	0.02	67.58	67.27	68.10	67.65	0.0148			

Se muestra a continuación el comportamiento de la resistencia (MPa) en eje Y en base a la edad (Horas) en el eje X, pudiendo observar que al someter el concreto a temperaturas elevadas alcanzara más rápido su resistencia, y por el contrario, al someterlo a temperaturas menores la resistencia es alcanzada en un periodo de tiempo mayor.

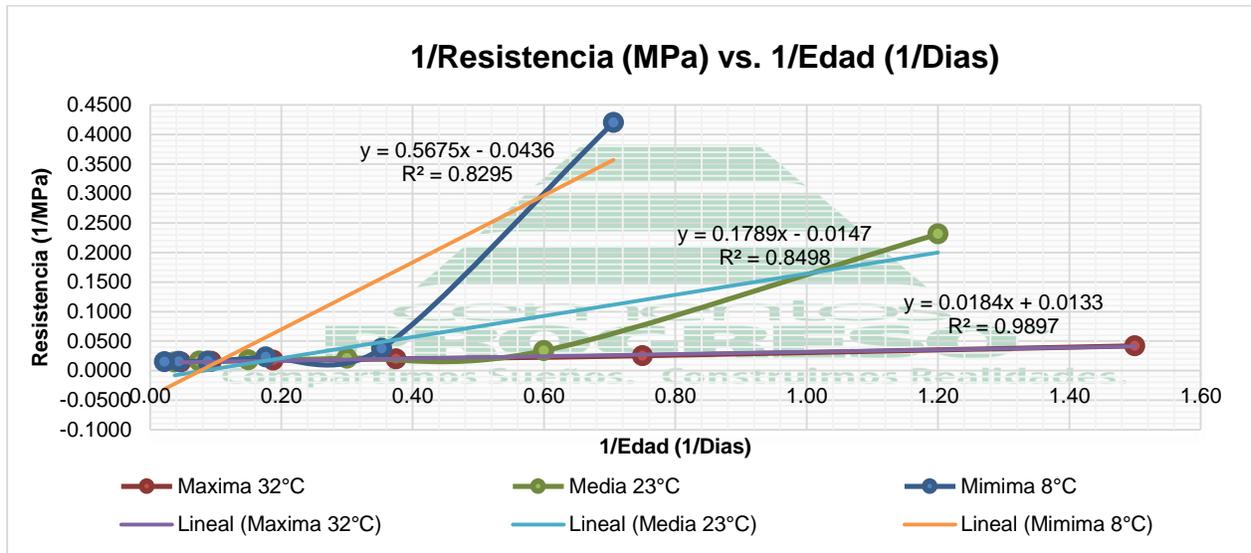


De la misma manera que el anterior se muestra el grafico del comportamiento de la resistencia (MPa) en base a la edad, esta vez mostrada en dias:



Habiendo obtenido las resistencias para cada una de las edades para cada una de las temperaturas, el procedimiento dicta el realizar un gráfico con el recíproco de la resistencia en el eje Y y el recíproco de la edad en el eje X. Para cada temperatura de curado, se plotea el recíproco del promedio de la resistencia de los cubos a lo largo del

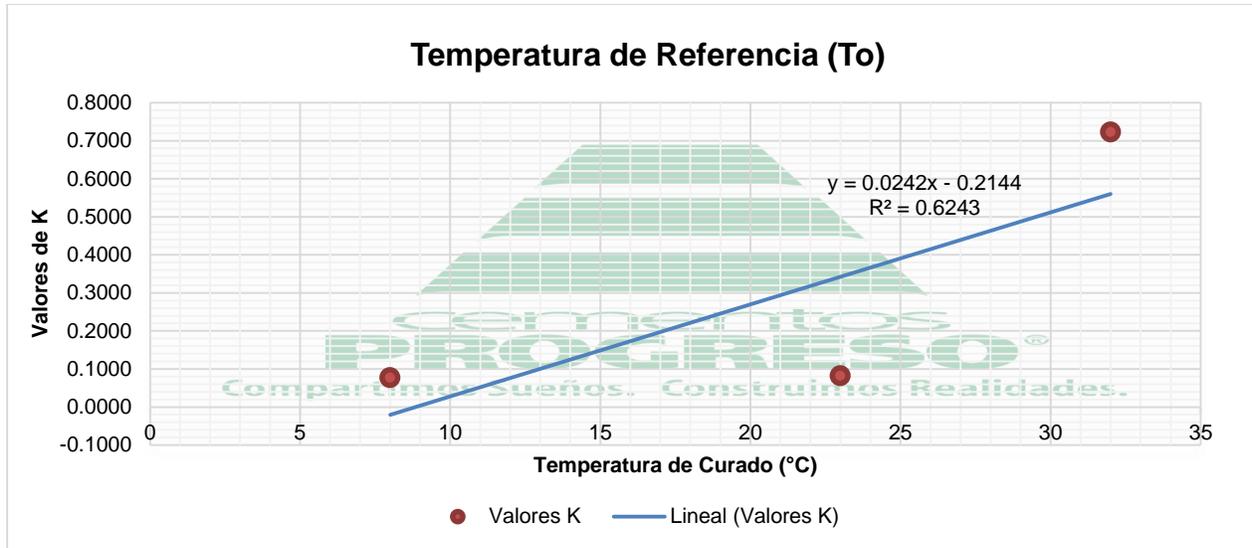
eje Y y el recíproco de la edad después del fraguado final a lo largo del eje X. Determinando la pendiente y el intercepto de la recta que mejor se ajuste a través de los datos para la temperatura de curado. Como se muestra a continuación:



Para cada una de las rectas se divide el valor del intercepto por el valor de la pendiente, los cocientes son los valores de k, que se utilizan para calcular la temperatura de referencia o la energía de activación, los cuales se muestran en la tabla anterior.

a) Determinación de la Temperatura de Referencia (To)

Para la determinación de esta temperatura se plotean los valores de k, como una función de las temperaturas del baño de curado, se determina la recta que mejor se ajuste a lo largo de los tres puntos y se determina el intercepto de la línea con el eje de la temperatura. Este intercepto es la temperatura de referencia de referencia To, que será usada en el cálculo del factor temperatura-tiempo de acuerdo con la ecuación (1).

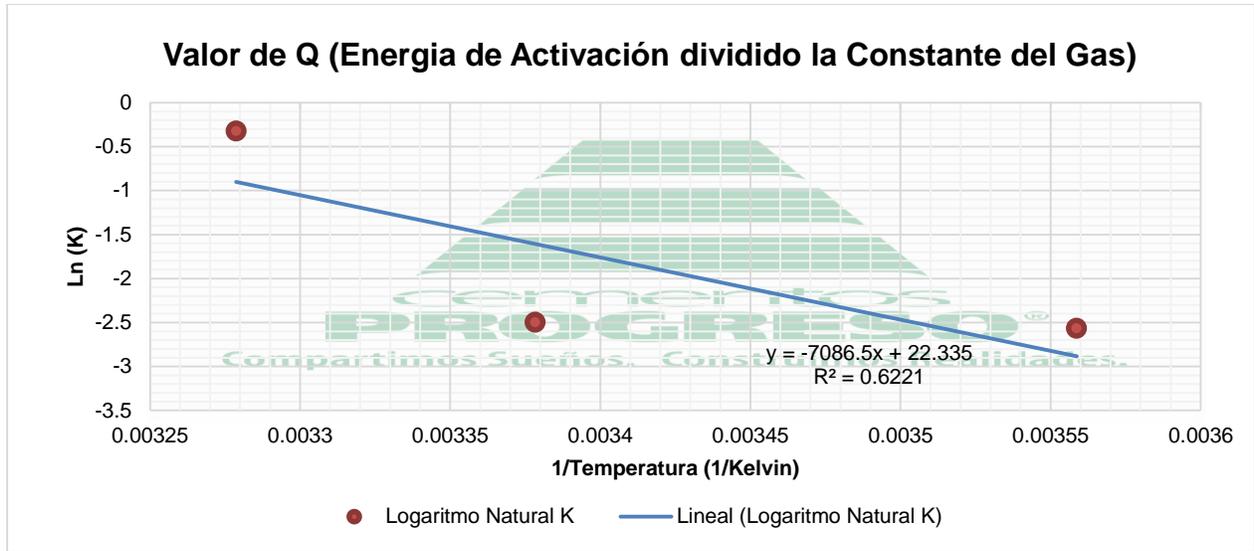


Temperatura (°C)	Valores K	Pendiente	Intercepto (To)
32	0.7228	0.0242	0.2144
23	0.0822		
8	0.0768		

Siendo entonces el intercepto el valor de la temperatura de referencia $T_0 = 0.2144^{\circ}\text{C}$.

b) Determinación de la Energía de Activación

Se calcula el logaritmo natural de los cocientes (valores k) de la sección anterior y se determina las temperaturas absolutas (en Kelvin = Celsius + 273) de los baños de agua. Posteriormente se dibuja el logaritmo natural de los valores de k, como una función del recíproco de la temperatura absoluta. Se determina la recta de mejor ajuste a lo largo de los tres puntos. La pendiente de la línea es el valor de la energía de activación dividida por la constante de gas, Q, que será usada en el cálculo de la edad equivalente de acuerdo con la ecuación (2).



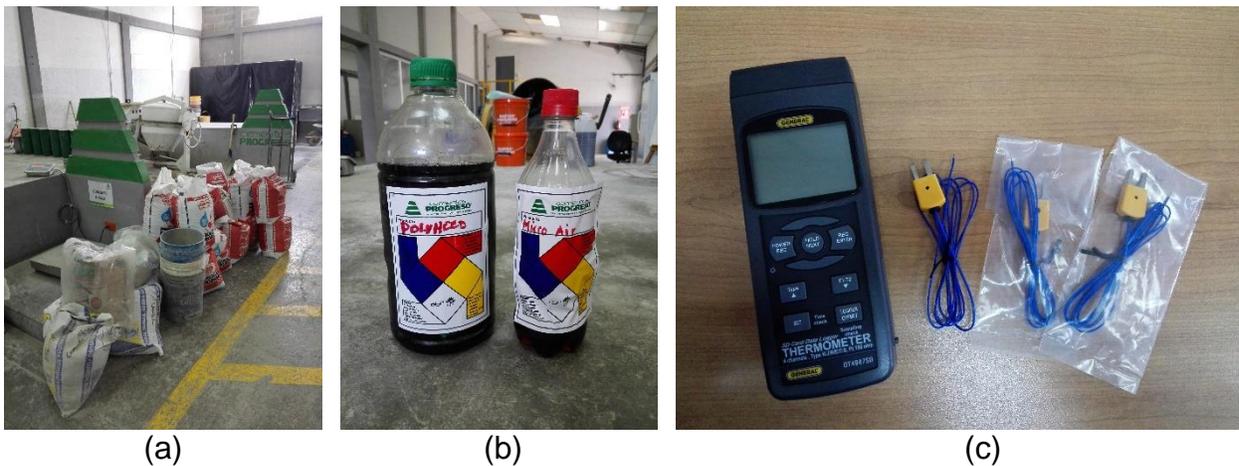
Temperatura (°C)	Temperatura Absoluta (Kelvin)	Reciproco Temperatura Absoluta (Kelvin)	Valores K	Logaritmo Natural K	Intercepto	Pendiente (Valor de Q)
32	305	0.003278689	0.7228	-0.324586629	22.335	7086.5
23	296	0.003378378	0.0822	-2.498979497		
8	281	0.003558719	0.0768	-2.566183599		

Siendo entonces el valor de la energía de activación dividida por la constante de gas, Valor Q = 7086.5

Determinación de la Relación Resistencia-Madurez

Para este procedimiento se preparan los especímenes cilíndrico y las vigas de acuerdo con la práctica COGUANOR NTG 41060 (ASTM C192/C192M) usando las proporciones de mezcla y los constituyentes similares a aquellos del concreto utilizado en el proyecto VAS, para el que se va a estimar la resistencia. Los necesarios para cada edad de rotura, y un par para el control de los cambios de temperatura.

Figura 39: Se muestran los materiales utilizados para la elaboración del concreto (a), en la siguiente imagen se muestran los aditivos para dicha elaboración (b), y por último se muestra el dispositivo registrador digital de datos (datalogger) y las termocuplas tipos k, utilizados durante las pruebas (c).



Fuente: Propia (2015).

Figura 40: Se muestran la realización de la mezcla de concreto, el depósito del concreto en una carretilla para su posterior uso (b) y la realización de las pruebas al concreto fresco (c).



Fuente: Propia (2015).

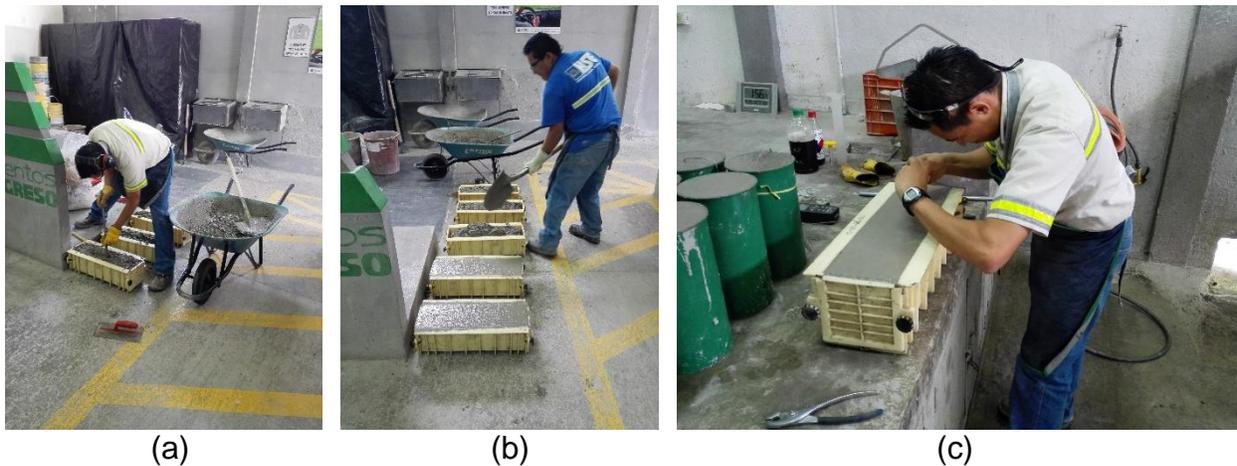
Se introducen sensores de temperatura por lo menos a $\pm 15\text{mm}$ de los centros de al menos dos especímenes. Se conectan los sensores a los instrumentos de medición de la madurez o los dispositivos de registro de temperatura como registradores digitales.

Figura 41: Realización de los especímenes cilíndricos (a), y en la siguiente figura se muestran la inserción de los sensores de temperatura en los especímenes (b).



Fuente: Propia (2015).

Figura 42: Realización de las vigas (a) y (b), y en la siguiente figura se muestran la inserción de los sensores de temperatura en los especímenes (b).



Fuente: Propia (2015).

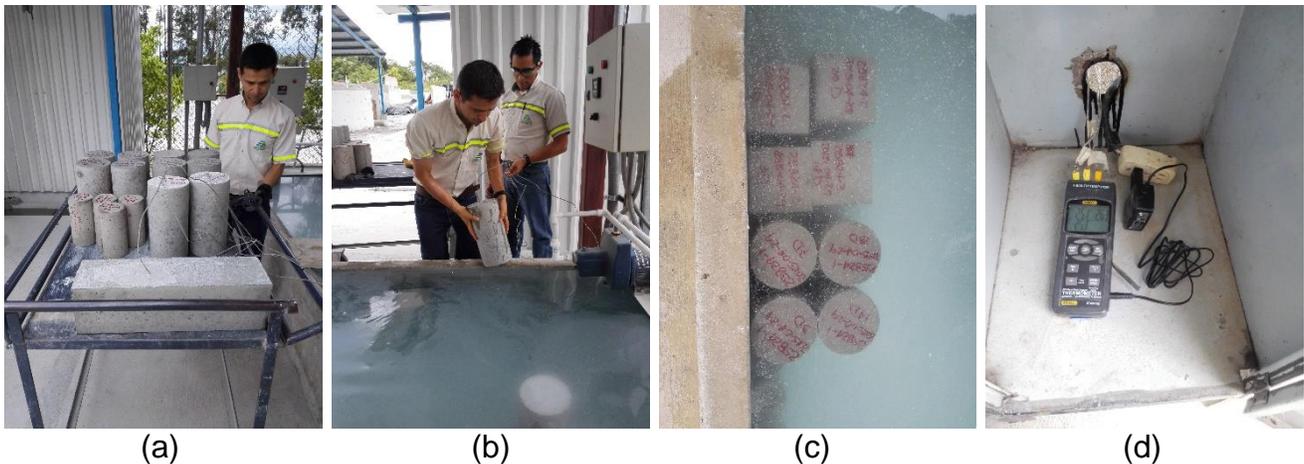
Posterior al desencofrado y etiquetado de los especímenes, se curan en húmedo en un baño de agua siguiendo los procedimientos y requisitos de la norma COGUANOR NTG 41059 (ASTM C511), cuidando las termocuplas y datalogger, ya que de lo contrario se obtienen datos erróneos.

Figura 43: Desencofrado de especímenes cilíndricos (a), marcado de especímenes (b), y en la siguiente figura se muestran el desencofrado de las vigas de concreto (c).



Fuente: Propia (2015).

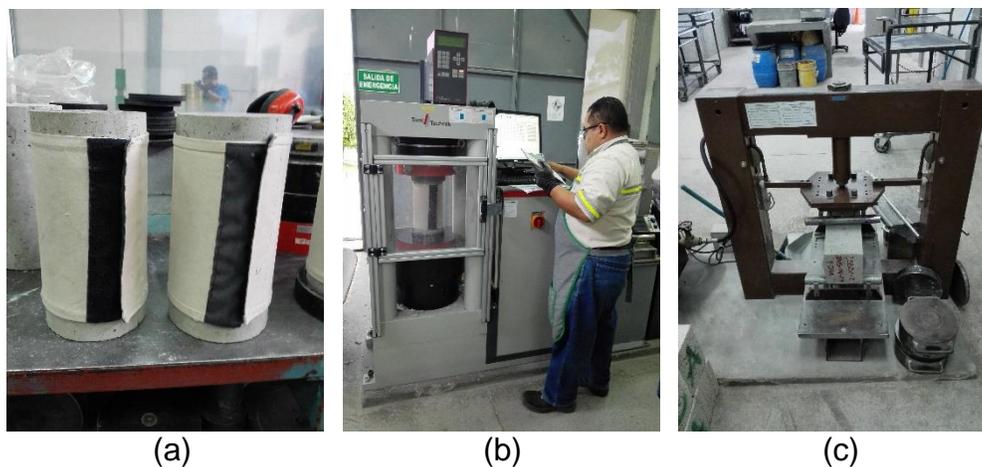
Figura 44: Transporte de los especímenes (a), introducción de los especímenes en los tanques (b), se muestran los especímenes en los tanques de curado (c) y en la siguiente figura se muestra el datalogger introducido en un locker a fin de protección (d).



Fuente: Propia (2015).

Se llevan a cabo los ensayos a compresión de 1, 3, 7, 14 y 28 días de acuerdo con el método de ensayo COGUANOR NTG 41017 h1 (ASTM C39/C39M) para especímenes cilíndricos y la COGUANOR NTG 41017 h2 (ASTM C78) para vigas de concreto. Se ensayan dos especímenes para cada edad y se calcula la resistencia promedio.

Figura 45: Preparación de especímenes cilíndricos previo a ser ensayados (a), realización del ensayo a compresión de los cilindros (b) y en la última figura realización del ensayo a flexión de las vigas de concreto (c).



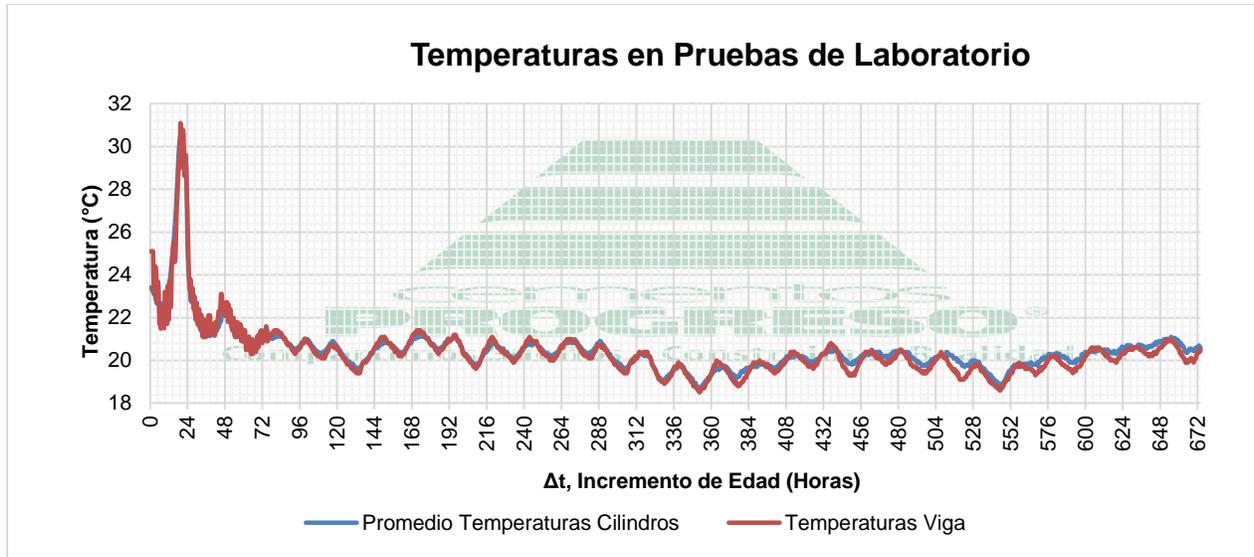
Fuente: Propia (2015).

Para cada edad de ensayo, se registra el índice de madurez promedio para los especímenes instrumentados. Ya que se utilizaron dispositivos registradores de temperatura en vez de utilizar instrumentos de medición de madurez, se evalúa la madurez con respecto a las ecuaciones (1) y (2).

En la siguiente tabla se muestra un resumen del comportamiento de temperaturas en laboratorio para especímenes cilíndricos y vigas, presentado el historial completo en el apéndice X:

Resumen Temperaturas Datalogger Laboratorio		
Temperaturas	Ubicación Termocupla	
	Promedio Cilindros	Viga
Mínima	18.6	18.5
Máxima	30.6	31.1
Promedio	20.5	20.4

El comportamiento de la temperatura, en donde se muestra el valor más alto es aproximadamente a las 7 horas con una temperatura de 30.6°C para cilindros y 31.1°C para vigas, después de la fundición de los especímenes, como podemos observar en la gráfica a continuación:



Previo a la realización de las calibraciones de las curvas de madurez, se muestran los informes oficiales de las pruebas a compresión realizadas a los especímenes cilíndricos y a los especímenes de vigas, en las páginas siguientes:



cementos
PROGRESO®

Compartimos Sueños. Construimos Realidades.

CEMENTOS PROGRESO, S.A.
CENTRO TECNOLÓGICO
15 Av. 18-01, zona 6 La Pedrera
Tel: 2286-4178 Fax: 2286-4181



ACREDITADO
OGA-LE-052-13

Fecha impresión: 2015.10.05
Página: 1 de 1
Usuario: EBARRIOS
OT: 25826-1
Fecha OT: 2015.06.12

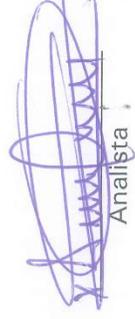
Cliente: CENTRO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO	Proyecto: CREACION DE LA CURVA DE MADUREZ VAS
Dirección: 15 AV. 18-01 ZONA 6 LA PEDRERA	Dirección:
Contacto: ESTUARDO HERRERA	Muestra: CILINDROS
Teléfono: 2286-4100	Analista: DELBERT VILLATORO

INFORME DE ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESION DE ESPECIMENES CILINDRICOS DE CONCRETO - NORMA NTG 41017 h1

No.	Id. Cliente	Id. Especimen	Ubicación Elemento Fundido	Fecha Hechura	Fecha Rotura	Edad (días)	Tipo Concre (PSI)	Slump (in)/ Flujo (mm)	Masa (kg)	Area (mm ²)	Carga (KN)	Resis -tencia (N/mm ²)	Resis -tencia (PSI)	T. Rot
1		25826-1-01		2015.06.09	2015.06.10	1	CFB	6.50	13.12	18146	256.7	14.1	2050	2
2		25826-1-02		2015.06.09	2015.06.10	1	CFB	6.50	13.19	18146	270.7	14.9	2160	2
3		25826-1-03		2015.06.09	2015.06.12	3	CFB	6.50	13.17	18265	554.0	30.3	4400	2
4		25826-1-04		2015.06.09	2015.06.12	3	CFB	6.50	13.20	18265	573.5	31.4	4550	2
5		25826-1-05		2015.06.09	2015.06.16	7	CFB	6.50	13.22	18146	671.9	37.0	5370	3
6		25826-1-06		2015.06.09	2015.06.16	7	CFB	6.50	13.15	18146	636.8	35.1	5090	2
7		25826-1-07		2015.06.09	2015.06.23	14	CFB	6.50	13.18	18146	686.3	37.8	5490	5
8		25826-1-08		2015.06.09	2015.06.23	14	CFB	6.50	13.22	18146	666.8	36.7	5330	5
9		25826-1-09		2015.06.09	2015.07.07	28	CFB	6.50	13.22	18265	776.1	42.5	6160	2
10		25826-1-10		2015.06.09	2015.07.07	28	CFB	6.50	13.15	18265	752.1	41.2	5970	2

T. Rot: 1 = Cónica; 2 = Cónica y vertical; 3 = Columnar; 4 = Diagonal; 5 = Fractura en los extremos; 6 = Similar tipo 5 pero extremo puntiagudo

Observaciones:


Analista


Jefe Laboratorio/Coordinador

Los resultados de ensayos se refieren únicamente a las muestras presentadas. No debe reproducirse este informe, salvo que se haga íntegramente.



Compartimos Sueños. Construimos Realidades.

CEMENTOS PROGRESO, S.A.
CENTRO TECNOLÓGICO
15 Av. 18-01, zona 6 La Pedrera
Tel: 2286-4178 Fax: 2286-4181

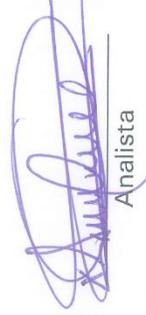
**INFORME DE ENSAYO RESISTENCIA A FLEXIÓN
CON DOS PUNTOS DE CARGA - NORMA NTG 41017 h2**

Fecha impresión: 2015.10.05
Página: 1 de 1
Usuario: EBARRIOS
OT: 25826-2
Fecha OT: 2015.06.12

Cliente:	CENTRO DE INVESTIGACION Y DESARROLLO	Proyecto:	CREACION DE LA CURVA DE MADUREZ VAS
Dirección:	15 AV. 18-01 ZONA 6 LA PEDRERA	Dirección:	
Contacto:	ESTUARDO HERRERA	Muestra:	VIGAS
Teléfono:	2286-4100	Analista:	JIMMY LOPEZ

No.	Id. Cliente	Identificación Especimen	Fecha Hechura	Fecha Rotura	Edad (días)	Masa (kg)	Largo (mm)	Ancho (mm)	Alto (mm)	Módulo Rotura (N/mm ²)	Módulo Rotura (kg/cm ²)
1		25826-2-01	2015.06.09	2015.06.10	1	29.35	535	151	154	2.27	23.15
2		25826-2-02	2015.06.09	2015.06.12	3	29.40	540	152	155	3.70	37.69
3		25826-2-03	2015.06.09	2015.06.16	7	29.29	535	150	154	4.82	49.18
4		25826-2-04	2015.06.09	2015.06.23	14	29.23	536	150	155	5.71	58.25
5		25826-2-05	2015.06.09	2015.07.07	28	29.41	535	148	154	6.15	62.73

Observaciones:


Analista


Jefe Laboratorio/Coordinador

Los resultados de ensayos se refieren únicamente a las muestras presentadas.
No debe reproducirse este informe, salvo que se haga íntegramente.

- **Calibración para Especímenes Cilíndricos**

La tabla resumen de las pruebas a compresión de los especímenes cilíndricos de concreto es la siguiente:

Pruebas a Compresión en Concreto Endurecido			
Edad (Días)	Resistencias Cilindro 1 (Psi)	Resistencias Cilindro 2 (Psi)	Promedio Cilindros (Psi)
1	2050	2160	2105
3	4400	4550	4475
7	5370	5090	5230
14	5490	5330	5410
28	6160	5970	6065

Mostrando en una tabla resumen las determinaciones de los valores para la calibración de los cilindros, con respecto a las ecuaciones (1) y (2), estimando lo siguiente:

Donde:
 $T_o = 0.21^\circ\text{C}$
 $Q = 7086.50$
 $T_s = 293\text{ K}$

$\Delta t = 30\text{ minutos}$
 $\Delta t = 0.5\text{ hora}$

Recolección en Laboratorio

Δt , Incremento de Edad (h)	Temperatura ($^\circ\text{C}$)	Δt , Incremento de Edad (h)	T_a , Promedio Temperatura ($^\circ\text{C}$)	Incremento Factor Temperatura-Tiempo ($^\circ\text{C}\cdot\text{h}$)	$M(t)$, Factor Temperatura-Tiempo Acumulado ($^\circ\text{C}\cdot\text{h}$)	Edad Equivalente a 20°C , Incremento h	t_e , Edad Equivalente a 20°C , Acumulado h	Resistencia Cilindros Curados en Laboratorio (psi)
24	25.5	0.5	26.825	13.31	601.93	0.87	37.83	2105
72	21.4	0.5	21.2	10.49	1628.76	0.55	92.69	4475
168	20.9	0.5	20.85	10.32	3583.53	0.54	193.42	5230
336	19.65	0.5	19.575	9.68	6972.02	0.48	366.95	5410
671.5	20.6	0.5	20.6	10.19	13621.73	0.53	703.65	-
672	20.6	0.5	20.6	10.19	13631.92	0.53	704.18	6065

$$T_a = \frac{20.6 + 20.6}{2}$$

$$T_a = 20.6$$

$$M(t) = (T_a - T_o)\Delta t$$

$$M(t) = (20.6 - 0.21) * 0.5$$

$$M(t) = 10.19$$

$$M = \sum (T_a - T_o)\Delta t$$

$$M = 13621.73 + 10.19$$

$$M = 13631.92$$

$$t_e(t) = e^{-Q\left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_s}\right) * \Delta t}$$

$$t_e(t) = e^{-7086.50\left(\frac{1}{20.6+273} - \frac{1}{293}\right) * 0.5}$$

$$t_e(t) = 0.53$$

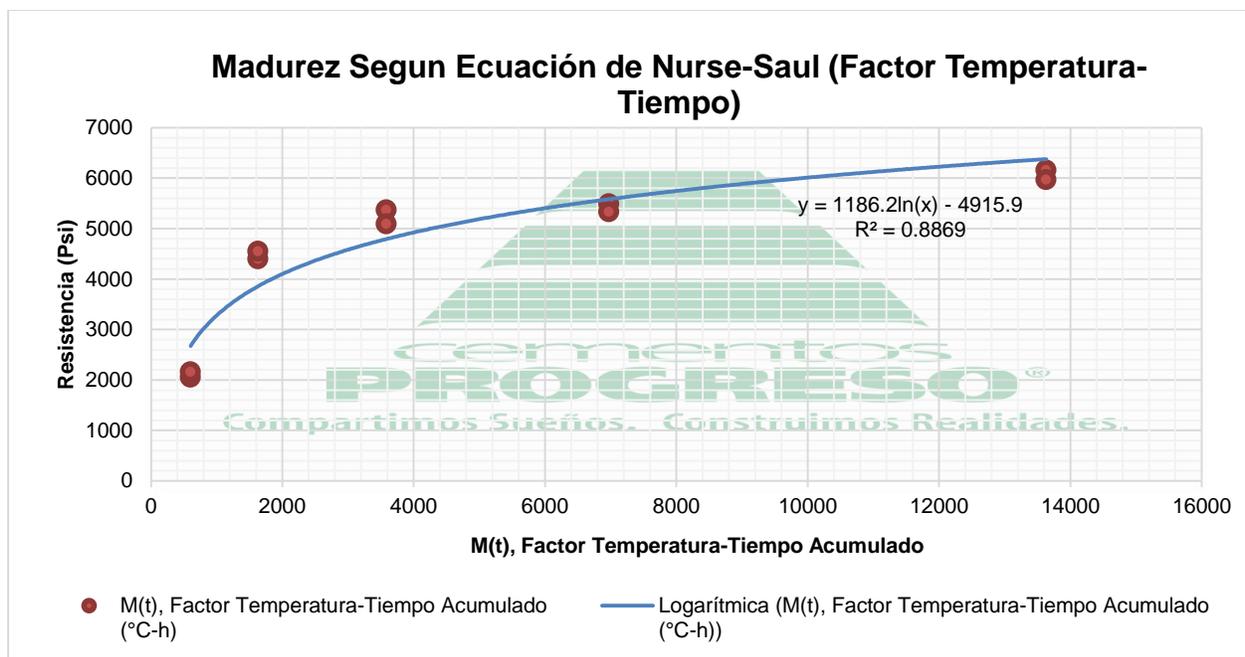
$$t_e = \sum e^{-Q\left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T_s}\right) * \Delta t}$$

$$t_e = 703.7 + 0.53$$

$$t_e = 704.18$$

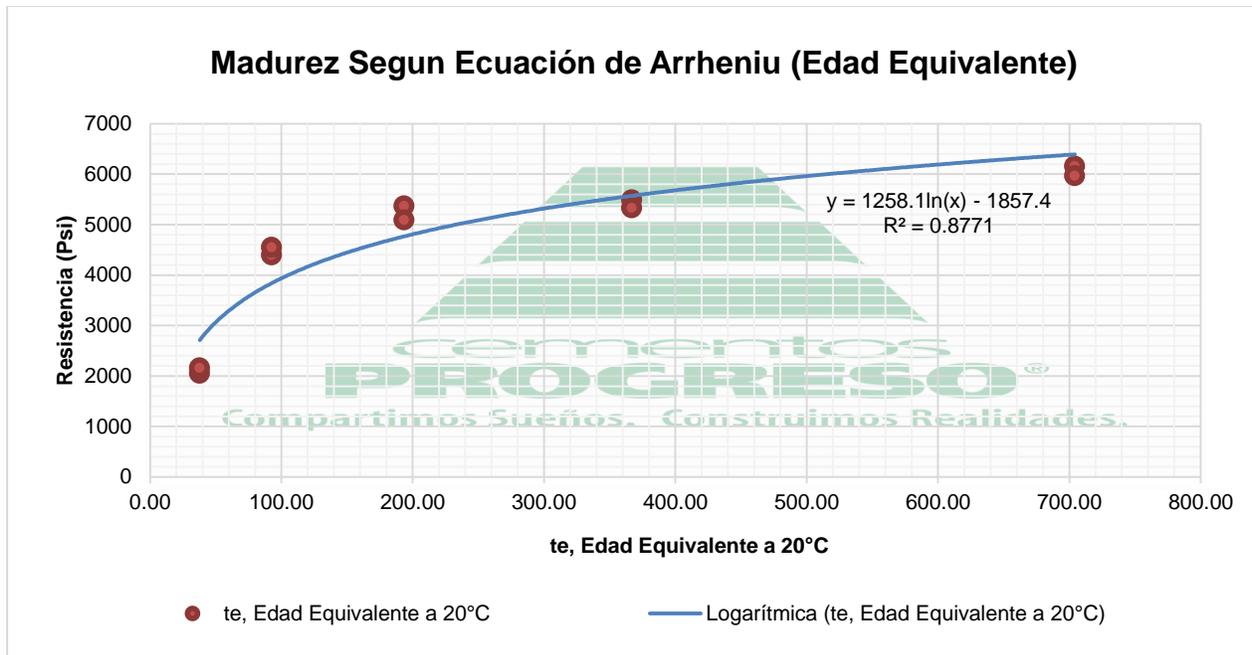
En un gráfico se plotea la resistencia a la compresión promedio como una función del valor promedio del índice de madurez. Se traza la curva que mejor se

ajuste a todos los datos. La curva resultante es la relación resistencia-madurez usada para estimar la resistencia de la mezcla de concreto curada bajo otras condiciones de temperatura. Siendo la relación entre la resistencia a compresión y el factor temperatura-tiempo, la siguiente:



Madurez Según Ecuación de Nurse-Saul (Factor Temperatura-Tiempo)			
Descripción	M(t), Factor Temperatura-Tiempo Acumulado (°C-h)	Edad (Días)	Resistencia Cilindros Curados en Laboratorio (Psi)
VAS	602	1	2050
VAS	602	1	2160
VAS	1629	3	4400
VAS	1629	3	4550
VAS	3584	7	5370
VAS	3584	7	5090
VAS	6972	14	5490
VAS	6972	14	5330
VAS	13632	28	6160
VAS	13632	28	5970

Y la relación entre la resistencia a compresión y la edad equivalente a 20°C, la siguiente:



Madurez Según Ecuación de Arrheniu (Edad Equivalente)			
Descripción	te, Edad Equivalente a 20°C	Edad (Días)	Resistencia Cilindros Curados en Laboratorio (Psi)
VAS	37.83	1	2050
VAS	37.83	1	2160
VAS	92.69	3	4400
VAS	92.69	3	4550
VAS	193.42	7	5370
VAS	193.42	7	5090
VAS	366.95	14	5490
VAS	366.95	14	5330
VAS	704.18	28	6160
VAS	704.18	28	5970

Siendo entonces las funciones de madurez, que responden a las calibraciones para especímenes cilíndricos para la mezcla de concreto utilizada, las siguientes:

- Factor Temperatura-Tiempo

$$y = 1186.2 \ln(x) - 4915.9$$

- Edad Equivalente

$$y = 1258.1 \ln(x) - 1857.4$$

- **Calibración para Especímenes de Vigas**

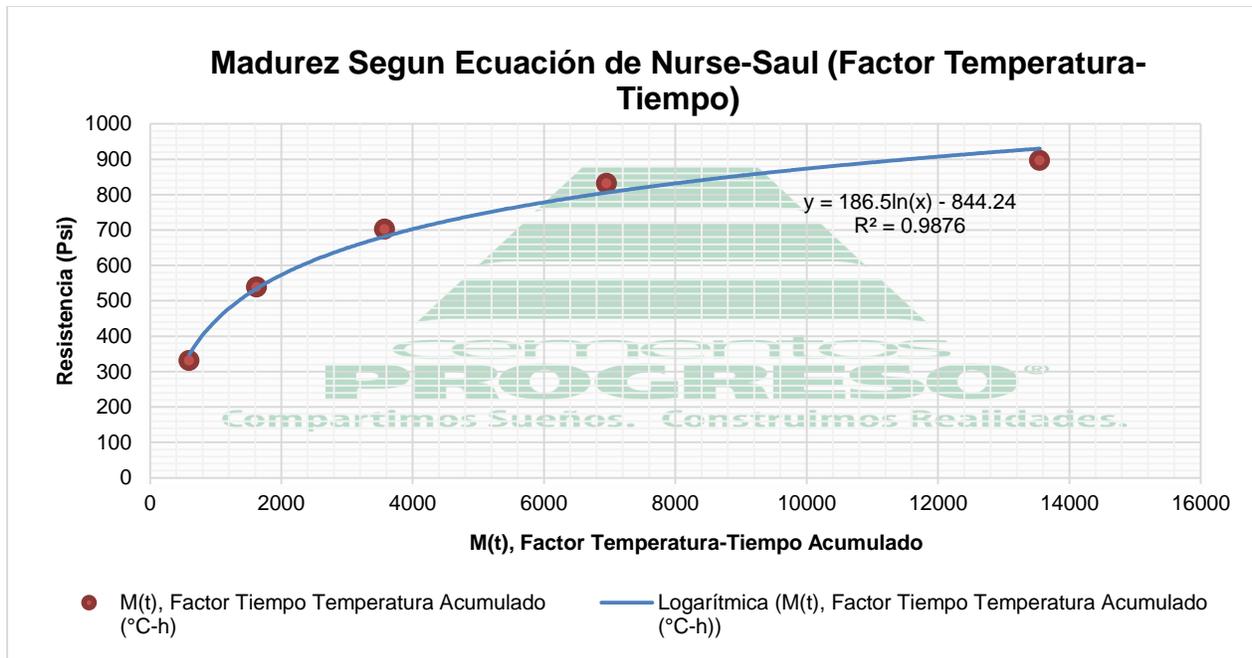
Así como también, la tabla resumen de las pruebas a flexión de las vigas de concreto efectuadas, dando como resultado las siguientes resistencias:

Pruebas a Flexión en Concreto Endurecido		
Edad (Días)	Módulo de Rotura Vigas (kg/cm²)	Resistencia Vigas Curadas en Laboratorio (Psi)
1	23.15	331
3	37.69	538
7	49.18	703
14	58.25	832
28	62.73	896

De la misma manera que se realizaron los cálculos anteriores de los especímenes cilíndricos, también se determinaron los valores para la calibración de las vigas de concreto, con respecto a las ecuaciones (1) y (2), se pudo determinar lo siguiente:

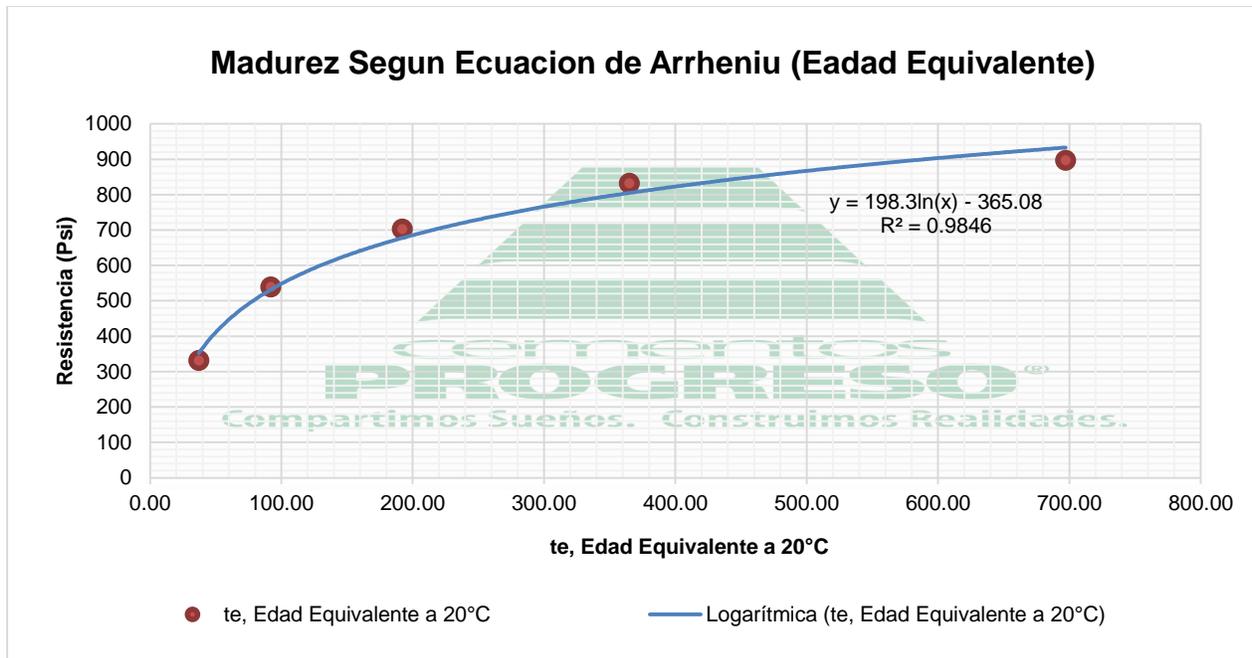
Δt, Incremento de Edad (h)	Temperatura (°C)	Δt, Incremento de Edad (h),	T_a, Promedio Temperatura (°C)	Incremento Factor Temperatura-Tiempo (°C-h)	M(t), Factor Temperatura-Tiempo Acumulado (°C-h)	Edad Equivalente a 20°C, Incremento h	t_e, Edad Equivalente a 20°C, Acumulado h	Resistencia Vigas en Laboratorio (Psi)
24	23.8	0.5	23.55	11.7	597	0.67	37.2	331
72	21	0.5	21.05	10.4	1623	0.55	92.0	538
168	21.3	0.5	21.25	10.5	3574	0.55	192.4	703
336	19.7	0.5	19.65	9.7	6954	0.49	365.2	832
672	20.5	0.5	20.45	10.1	13551	0.52	697.3	896

Siendo la relación entre la resistencia a compresión y el factor temperatura-tiempo de los especímenes de vigas, la siguiente:



Madurez Según Ecuación de Nurse-Saul (Factor Temperatura-Tiempo)			
Descripción	M(t), Factor Tiempo Temperatura Acumulado (°C-h)	Edad (Días)	Resistencia Vigas Curadas en Laboratorio (Psi)
VAS	597	1	331
VAS	1623	3	538
VAS	3574	7	703
VAS	6954	14	832
VAS	13551	28	896

Y la relación entre la resistencia a compresión y la edad equivalente a 20°C, la siguiente:



Madurez Según Ecuación de Arrhenius (Edad Equivalente)			
Descripción	te, Edad Equivalente a 20°C	Edad (Días)	Resistencia Vigas Curadas en Laboratorio (Psi)
VAS	37.24	1	331
VAS	92.02	3	538
VAS	192.36	7	703
VAS	365.21	14	832
VAS	697.33	28	896

Siendo entonces las funciones de madurez, que responden a las calibraciones para especímenes de vigas para la mezcla de concreto utilizada, las siguientes:

- Factor Temperatura-Tiempo

$$y = 186.5 \ln(x) - 844.24$$

- Edad Equivalente

$$y = 198.3 \ln(x) - 365.08$$

4.2.2 Fase de Experimentación en Campo

Estimación de la Resistencia del Concreto en el Sitio de la Obra

Posterior a las pruebas realizadas en laboratorio y teniendo las calibraciones según el factor temperatura-tiempo y la edad equivalente, se procede a la validación en campo colocando los sensores de temperatura en donde será colocado el concreto o bien se pueden introducir dentro del concreto ya colocado, cuando este se encuentra aún en estado fresco. Los sensores de temperatura se colocan de manera que son rodeados por completo de concreto y no queden en contacto con metales embebidos u otros elementos que puedan estar parcialmente expuestos al ambiente externo. Tal como la norma lo indica, si esta metodología se utiliza para decidir el inicio de operaciones críticas de la construcción, los sensores deben ser instalados en lugares de la estructura que sean críticos en términos de las condiciones de exposición y requisitos estructurales.

Los sensores se conectan a los instrumentos de registro de datos de temperatura y se activan tan pronto sea posible. Se usa el mismo valor de temperatura de referencia o de energía de activación que fue utilizado para el cálculo del índice de madurez en la fase de laboratorio.

Cuando se desea estimar la resistencia en campo, en donde se colocaron los sensores de temperatura, se obtiene el índice de madurez a partir de los registros de temperatura, utilizando la relación resistencia-madurez desarrollada con anterioridad. Se lee el valor de resistencia a la compresión o flexión, según se desee, correspondiente al índice de madurez medido.

Para las actividades críticas como apertura al tráfico, remoción de formaletas u otra actividad principal, que están basadas en la resistencia estimada en base a la madurez del concreto, deben realizarse pruebas en especímenes fabricados en campo para la determinación de resistencia, a compresión o flexión, con el objeto de comprobar que las resistencias potenciales sean similares.

En el caso de este proyecto en particular, se colocaron sensores en campo con el fin de investigación a fondo sobre el método y de poder determinar los procedimientos críticos, mejoras o simplemente comprender su funcionamiento, en donde se considera importante mencionar que fueron realizadas pruebas previas de instalación y de desarrollo del método, con el fin de optimizar las colocaciones posteriores.

En esta instalación se colocaron los dispositivos en la estación 0+090 con fecha 01 de Octubre de 2015, a tres alturas diferentes: alta, media y baja. Sujetando sensores se sujetaron en una ménsula de aluminio con protección aislante, engrapadas a la base del pavimento. También se colocó un cuarto sensor con el fin de obtener datos del comportamiento de la temperatura ambiental.

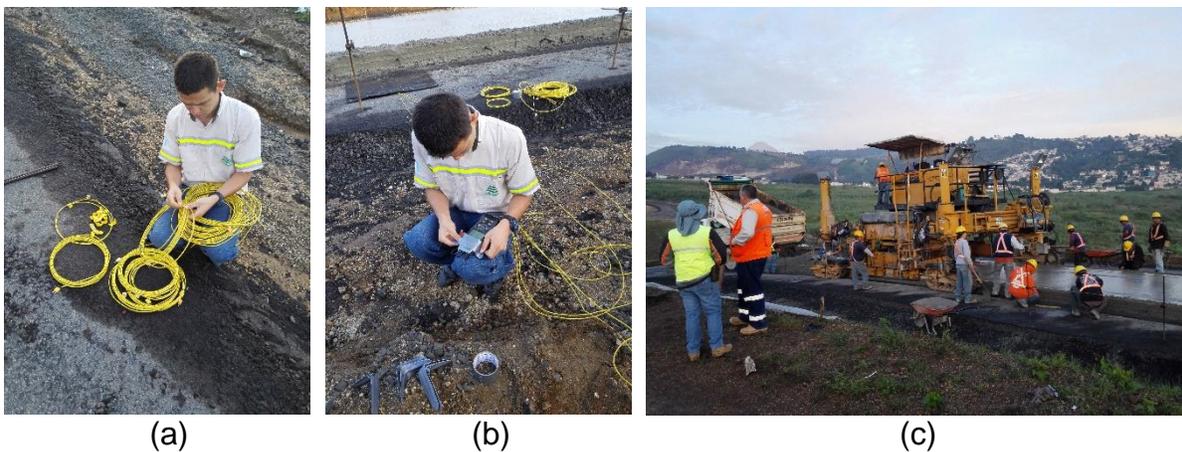
Figura 46: Colocación de los sensores de temperatura a diferentes alturas, en esta ocasión solo se colocó un dispositivo.



Fuente: Propia (2015).

El sensor a altura media se colocó en una posición cercana a donde se realizaría el corte de juntas, para conocer su comportamiento en ese lugar. Colocando los dispositivos de recolección de datos en el interior de un locker asegurado con candado y se colocaron letreros de información para evitar inconvenientes durante el desarrollo del proceso de lecturas.

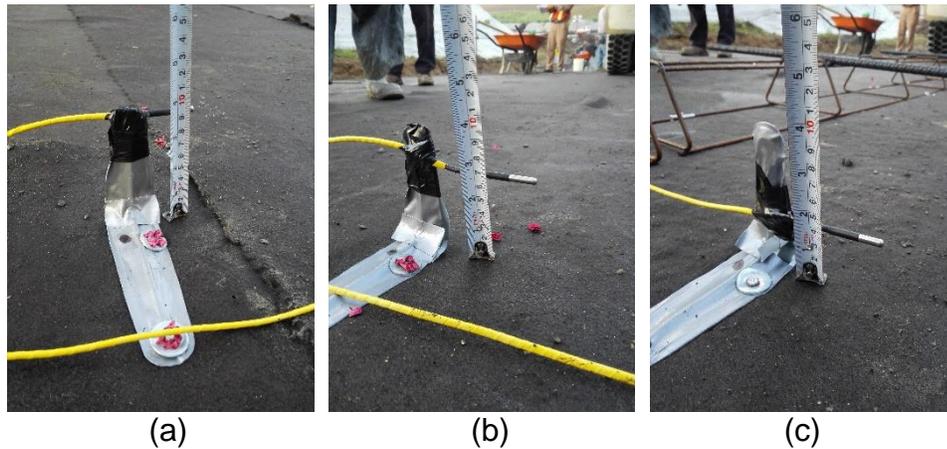
Figura 47: Preparación del equipo previo a la colocación (a), conexión de las termocuplas a los dataloggers (b) y colocación del concreto por encima de los sensores de temperatura (c).



Fuente: Propia (2015).

Como se mencionó con anterioridad, con el fin de evitar las interferencias de los sensores con objetos metálicos o cualquier otro elemento, se dispuso colocar los sensores en mensulas de aluminio forradas con material aislante, tal como se muestra a continuación en las imágenes.

Figura 48: Colocación de los diferentes sensores a las alturas: alta a 10cm de la base (a), media a 7cm (b) y baja a 4cm (c).



Fuente: Propia (2015).

Se mencionó que los dispositivos de registro de datos (dataloggers) conectados a las termocuplas (tipo k) se colocaron en un locker al lado de la pavimentación, con su debida identificación, como de muestra en las siguientes imágenes:

Figura 49: Dispositivo de recolección de datos (datalogger) (a), colocación del locker y datalogger (b) y miembros del equipo de proyecto en la instalación de los sensores (c).

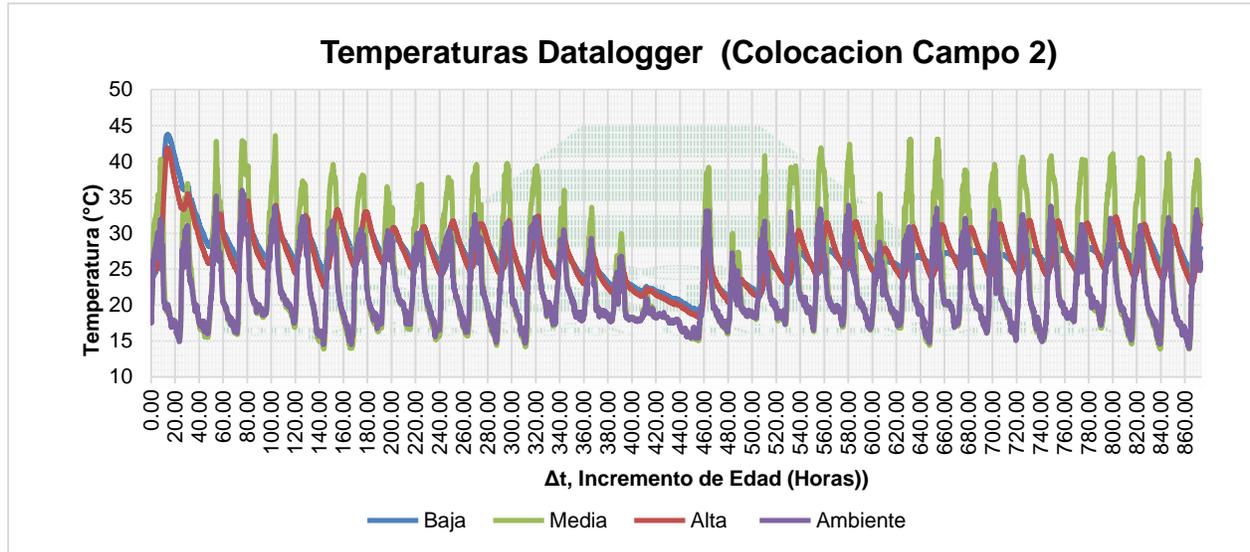


Fuente: Propia (2015).

El corte de juntas de contracción se realizó aproximadamente a las 2:45 p.m., cuando el concreto aproximadamente tenía 8.42 horas de haber sido colocado, estos

datos son muy importantes porque fueron utilizados para la estimación de la resistencia en ese momento.

En esta ocasión se pudieron observar registros de los historiales de las temperaturas con un comportamiento normal esperado, se observan en la siguiente gráfica:



Resumen Temperaturas Datalogger				
Temperaturas	Ubicación Termocupla			
	Baja	Media	Alta	Ambiente
Mínima	17.5	13.9	18.3	14.0
Máxima	43.7	43.6	41.9	36.0
Promedio	26.7	24.0	26.8	22.0

El comportamiento de las temperaturas fue normal debido a los cuidados que se tuvieron en la colocación, así como también en cada una de las descargas de datos que se efectuaron semanalmente. Como se puede notar en la gráfica, la temperatura del sensor a altura alta y baja tienen el mismo comportamiento, a diferencia del sensor colocado a altura media que se comporta similar al sensor conectado a temperatura ambiente, iniciando este comportamiento después de hacer el corte de juntas. Por lo tanto, se debe tener un especial cuidado en la colocación de los sensores, evitando la interferencia con cualquier otro objeto y que no se encuentren en el corte de las juntas, ya que tendrá un comportamiento similar al de la temperatura ambiente y no mostrará las temperaturas reales del concreto.

En la gráfica puede observarse que la temperatura más alta se dió a las 13.42 horas con una temperatura de 43.7°C, luego de la colocación de la pavimentación. El corte tuvo inicio a las 8.42 horas después de la colocación del concreto. Se considera importante mencionar que las temperaturas bajas mostradas en la gráfica anterior,

coinciden con un descenso de temperatura reportado por el INSIVUMEH en el mes de octubre, aproximadamente entre el 18 y 20 de dicho mes.

Como se mencionó, se efectuaron especímenes cilíndricos y de vigas, así como también las pruebas al concreto fresco, con el fin de conocer y comparar el comportamiento del concreto.

Figura 50: Pruebas al concreto fresco y especímenes (a) y especímenes cilíndricos y de vigas recién terminados (b).



Fuente: Propia (2015).

Se muestran a continuación los resultados de las pruebas a compresión efectuadas a los cilindros y las pruebas a flexión efectuadas a las vigas:

**RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS
 NORMA NTG-41017h1 (ENSAYO ACREDITADO)
 SERVICIOS EXTERNOS**

Fecha de Impresión: **14.11.2015**

Cliente: **CHRISTIAN CHIRIZ** Dirección del Cliente: **15AV. 18-01 FINCA LA PEDRERA ZONA 6**
 Obra: **PROYECTO VAS** Dirección de Obra: **MAYABN GOLF VILLA NUEVA**

Laboratorista: **JUAN JOSE PINEDA**

Datos del Especimen

Tipo de Muestra:	Cilindro										
Número del Especimen:	C2302-7	C2302-8	C2302-5	C2302-6	C2302-3	C2302-4	C2302-1	C2302-2	C2302-1	C2302-2	C2302-2
Fecha de Hechura:	01-10-15	01-10-15	01-10-15	01-10-15	01-10-15	01-10-15	01-10-15	01-10-15	01-10-15	01-10-15	01-10-15
Camión Número:	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000	00000
Volumen de Carga (Mts.3):	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Edad del Especimen:	28	28	14	14	7	7	4	4	4	4	4
Especificaciones											
Tipo de Concreto(Resistencia Especificada):	CON.3001										
Tamaño Máximo del Agregado:	3/8	3/8	3/8	3/8	3/8	3/8	3/8	3/8	3/8	3/8	3/8
Asentamiento (Pulgadas - Centímetros):	0.00"	0.00"	0.00"	0.00"	0.00"	0.00"	0.00"	0.00"	0.00"	0.00"	0.00"
Tipo de Fundición:	PAVIMENTO										
Resultados: (Fecha Rotura)											
Área del Especimen (Pulgadas 2):	29-10-15	29-10-15	15-10-15	15-10-15	08-10-15	08-10-15	08-10-15	08-10-15	08-10-15	08-10-15	08-10-15
Peso del Especimen (Libras):	28.27	28.27	28.27	28.27	28.27	28.27	28.27	28.27	28.27	28.27	28.27
Carga Máxima (Libras):	28.88	28.89	29.26	29.39	29.26	29.26	29.26	29.26	29.30	29.26	29.26
Carga Unitaria (PSI):	173607	166483	154637	159811	139145	134961	127922	126141	127922	126141	126141
	6141	5889	5470	5653	4922	4774	4525	4462	4525	4462	4462

Observaciones:

Aire: %
 M.U.: Kg/m³
 Temp: °C

MUESTREO DE CONCRETO REALIZADO POR PERSONAL DE LABORATORIO EN BASE A NORMA NTG-41057
 ELABORACIÓN DE ESPECIMENES DE CONCRETO EN BASE A NORMA NTG-41061, DETERMINACION DE REVENIMIENTO
 EN BASE A NORMA NTG-41052; DETERMINACION DE LA TEMPERATURA DEL CONCRETO EN BASE A NORMA NTG-41053

Jefe de Laboratorio Supervisor de Campo
SGL-CT-CP-IE-27/REV.00

**RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE CILINDROS
NORMA NTG-41017h1 (ENSAYO ACREDITADO)
SERVICIOS EXTERNOS**

Fecha de Impresión: 04.12.2015

Cliente: **CHRISTIAN GHRIZ** Dirección del Cliente: **15AV. 18-01 FINCA LA PEDRERA ZONA 6**

Obra: **PROYECTO VAS** Dirección de Obra: **MAYAN GOLF VILLA NUEVA**

Laboratorista: **JUAN JOSE PINEDA**

Datos del Especimen

Tipo de Muestra:	Viga	Viga	Viga	Viga	Viga
Número del Especimen:	C2303-4	C2303-2	C2303-1	C2303-1	C2303-1
Fecha de Hechura:	01-10-15	01-10-15	01-10-15	01-10-15	01-10-15
Clamión Número:	00000	00000	00000	00000	00000
Volumen de Carga (Mts.3):	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Edad del Especimen:	28	7	4	4	4
Especificaciones					
Tipo de Concreto(Resistencia Especificada):	CON.4003	CON.4003	CON.4003	CON.4003	CON.4003
Tamaño Máximo del Agregado:	3/4	3/4	3/4	3/4	3/4
Asentamiento (Pulgadas - Centímetros):	0.00"	0.00"	0.00"	0.00"	0.00"
Tipo de Fundición:	PAVIMENTO	PAVIMENTO	PAVIMENTO	PAVIMENTO	PAVIMENTO
Resultados: (Fecha Rotura)					
Área del Especimen (Pulgadas 2):	29-10-15	08-10-15	05-10-15	05-10-15	05-10-15
Peso del Especimen (Libras):	27.25	28.09	28.09	433.92	433.92
Carga Máxima (Libras):	65.10	64.82	64.82	64.82	64.82
Carga Unitaria (PSI):	27686	24270	24270	123234	123234
	1016	864	864	284	284

Observaciones:

Aire: %
M.U.: Kg/m³
Temp: °C

[Signature]
Jefe de Laboratorio / Supervisor de Campo

A continuación se muestra un resumen de la estimación de la resistencia a compresión y flexión a ciertas edades:

Donde:

$$T_o = 0.21^{\circ}\text{C}$$

$$Q = 7086.50$$

$$T_s = 293\text{ K}$$

Δt , Incremento de Edad (h)	Temperatura as Altura Baja ($^{\circ}\text{C}$)	Δt , Incremento de Edad (h)	T_a , Promedio Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Incremento Factor Temperatura-Tiempo ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$)	$M(t)$, Factor Tiempo Temperatura Acumulado ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}$)	Edad Equivalente a 20°C , Incremento h	t_e , Edad Equivalente a 20°C , Acumulado h	Calibración Cilindros		Calibración Vigas	
								Resistencia Calculada Grafica Temperatura-Tiempo (Psi)	Resistencia Calculada Edad Equivalente (Psi)	Resistencia Calculada Grafica Temperatura-Tiempo (Psi)	Resistencia Calculada Edad Equivalente (Psi)
0	17.5										
0.083	19.3	0.083	18.40	1.5	1.5	0.07	0.1	-4422.77	-5150.74	-766.71	-884.17
0.167	24.4	0.083	21.85	1.8	3.3	0.10	0.2	-3493.06	-4087.00	-620.53	-716.51
0.250	24.3	0.083	24.35	2.0	5.3	0.12	0.3	-2931.03	-3420.56	-532.17	-611.46
0.333	24.4	0.083	24.35	2.0	7.3	0.12	0.4	-2551.23	-2987.20	-472.46	-543.16
0.417	24.3	0.083	24.35	2.0	9.4	0.12	0.5	-2264.00	-2665.47	-427.30	-492.45
0.500	24.4	0.083	24.35	2.0	11.4	0.12	0.6	-2032.94	-2409.49	-390.97	-452.10
0.583	24.3	0.083	24.35	2.0	13.4	0.12	0.8	-1839.63	-2196.89	-360.57	-418.59
0.667	24.3	0.083	24.30	2.0	15.4	0.12	0.9	-1673.78	-2015.75	-334.50	-390.04
0.750	24.3	0.083	24.30	2.0	17.4	0.12	1.0	-1528.29	-1857.44	-311.62	-365.09
0.833	24.4	0.083	24.35	2.0	19.4	0.12	1.1	-1398.46	-1716.31	-291.21	-342.84
0.917	24.4	0.083	24.40	2.0	21.4	0.12	1.2	-1281.22	-1588.94	-272.78	-322.77
1.000	24.3	0.083	24.35	2.0	23.4	0.12	1.4	-1174.74	-1473.73	-256.04	-304.61
8.333	30.2	0.083	30.10	2.5	210.7	0.19	13.1	1430.74	1383.24	153.61	145.71
8.417	30.4	0.083	30.30	2.5	213.2	0.19	13.3	1444.78	1401.25	155.82	148.54

$\Delta t = 5 \text{ minutos}$
 $\Delta t = \frac{5}{60} = 0.083 \text{ hora}$

$y = 1186.2\text{Ln}(x) - 4915.9$
 $y = 1186.2\text{Ln}(213.2) - 4915.9$
 $y = 1444.78$

$y = 1258.1\text{Ln}(x) - 1857.4$
 $y = 1258.1\text{Ln}(13.3315) - 1857.4$
 $y = 1401.25$

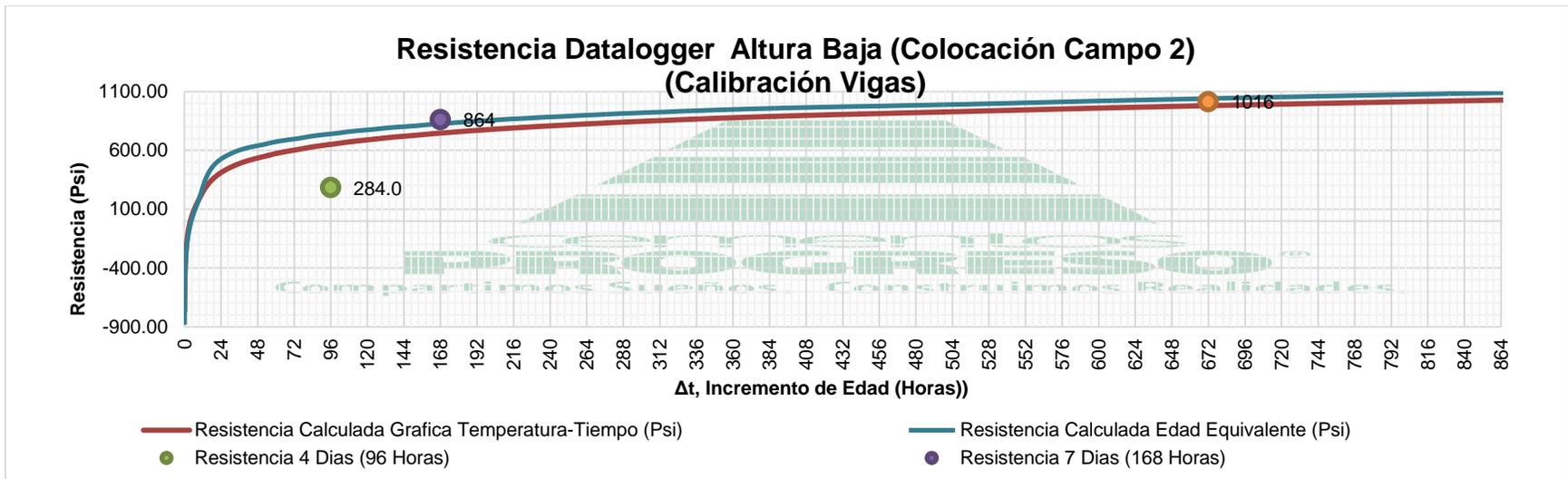
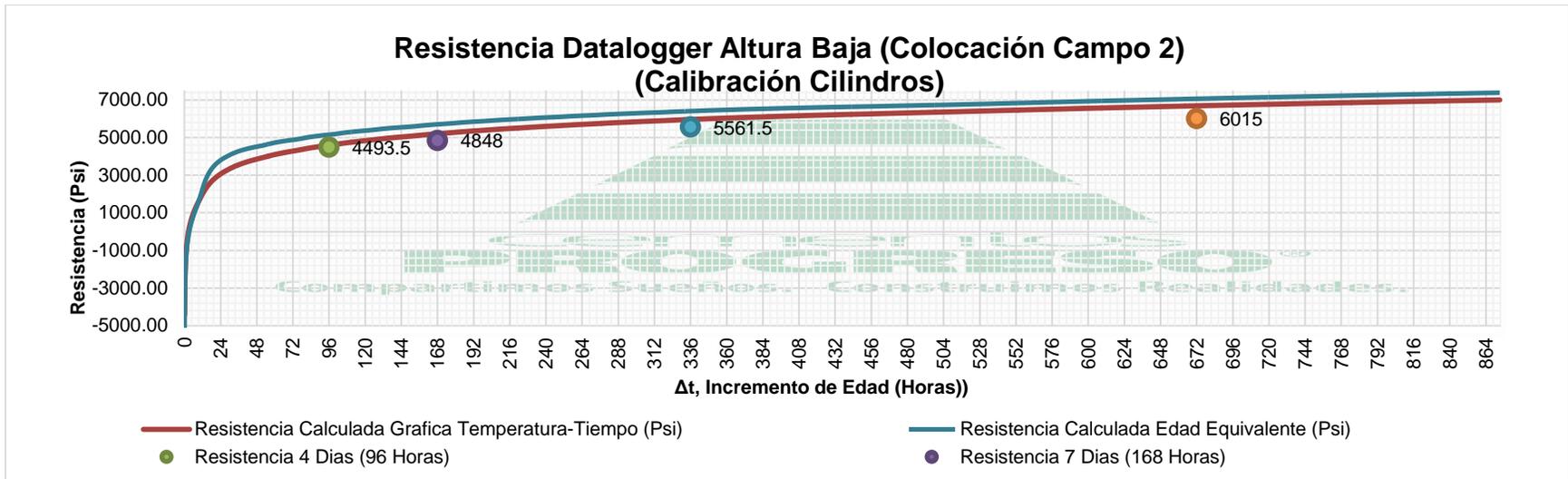
$y = 186.5\text{Ln}(x) - 844.24$
 $y = 186.5\text{Ln}(213.2) - 844.24$
 $y = 155.82$

$y = 198.3\text{Ln}(x) - 365.08$
 $y = 198.3\text{Ln}(13.3315) - 365.08$
 $y = 148.54$

Se presenta la tabla resumen de sensores a altura baja, en la cual se puede observar la resistencia obtenida luego de las pruebas a los especímenes cilíndricos y de vigas curadas en laboratorio y las estimaciones según los índices de madurez de factor temperatura-tiempo y edad equivalente, utilizando las ecuaciones mencionadas con anterioridad:

Tabla Resumen (Temperaturas Altura Baja)							
Edad (Horas)	Edad (Días)	Calibración Cilindros			Calibración Vigas		
		Resistencia Cilindros Curados en Laboratorio (Psi)	Resistencia Calculada Gráfica Temperatura-Tiempo (Psi)	Resistencia Calculada Edad Equivalente (Psi)	Resistencia Vigas Curados en Laboratorio (Psi)	Resistencia Calculada Gráfica Temperatura-Tiempo (Psi)	Resistencia Calculada Edad Equivalente (Psi)
8.42	0.35	-	1444.8	1401.3	-	155.8	148.5
24.00	1.00	-	3068.0	3799.8	-	411.0	526.6
72.00	3.00	-	4284.26	4879.92	-	602.25	696.85
96.00	4.00	4493.50	4595.85	5154.94	284.00	651.24	740.20
168.00	7.00	4848.00	5206.63	5707.49	864.00	747.27	827.29
336.00	14.00	5561.50	5965.47	6409.45	0.00	866.58	937.93
672.00	28.00	6015.00	6691.82	7066.10	1016.00	980.78	1041.43

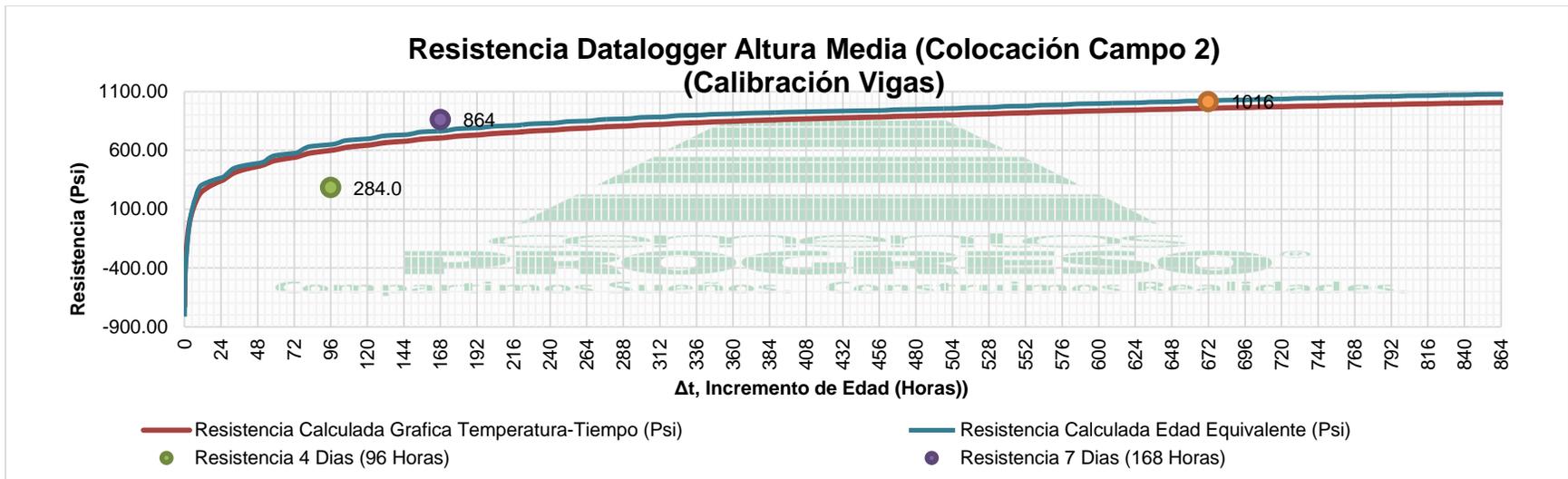
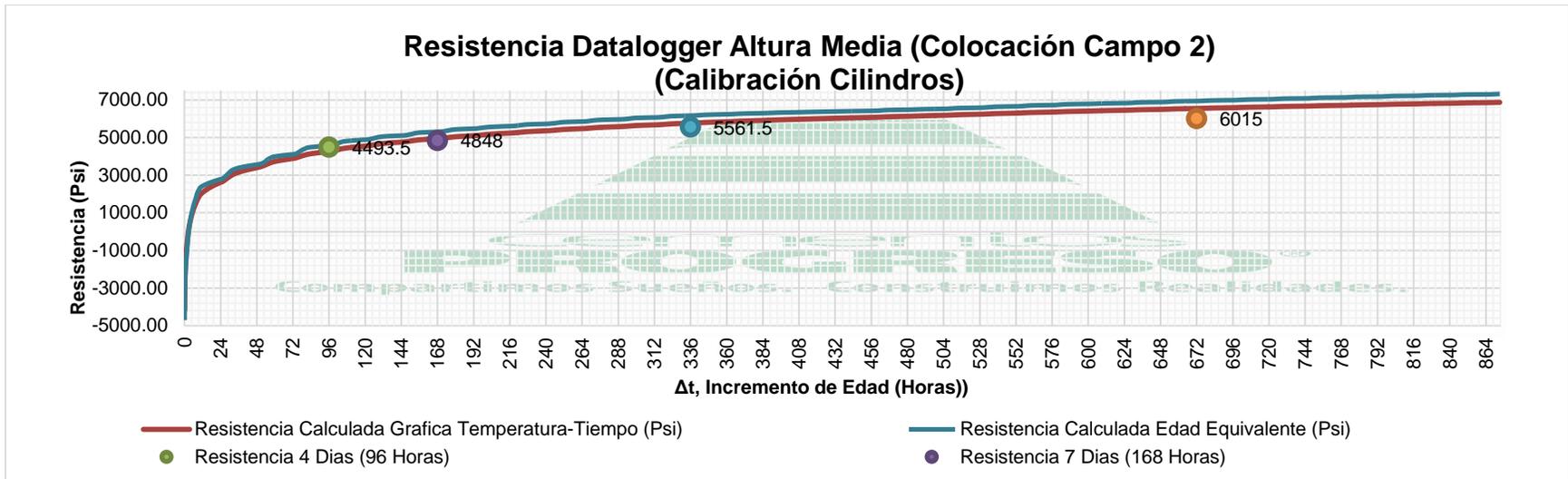
Se muestran las gráficas del comportamiento de dichas estimaciones de resistencia, pudiendo observar el comportamiento similar a las resistencias de las roturas efectuadas en laboratorio:



Se muestran los resultados para la colocación a una altura media, que tuvo el comportamiento de temperatura similar al de la temperatura ambiental, luego de la realización del corte de juntas.

Tabla Resumen (Temperaturas Altura Media)							
Edad (Horas)	Edad (Días)	Calibración Cilindros			Calibración Vigas		
		Resistencia Cilindros Curados en Laboratorio (Psi)	Resistencia Calculada Gráfica Temperatura-Tiempo (Psi)	Resistencia Calculada Edad Equivalente (Psi)	Resistencia Vigas Curados en Laboratorio (Psi)	Resistencia Calculada Gráfica Temperatura-Tiempo (Psi)	Resistencia Calculada Edad Equivalente (Psi)
8.42	0.35	-	1681.4	2023.3	-	193.0	246.6
24.00	1.00	-	2619.8	2786.9	-	340.6	366.9
72.00	3.00	-	3891.15	4111.13	-	540.45	575.67
96.00	4.00	4493.50	4268.46	4580.82	284.00	599.77	649.70
168.00	7.00	4848.00	4941.87	5306.03	864.00	705.65	764.01
336.00	14.00	5561.50	5767.80	6170.29	0.00	835.50	900.23
672.00	28.00	6015.00	6548.82	6944.84	1016.00	958.30	1022.32

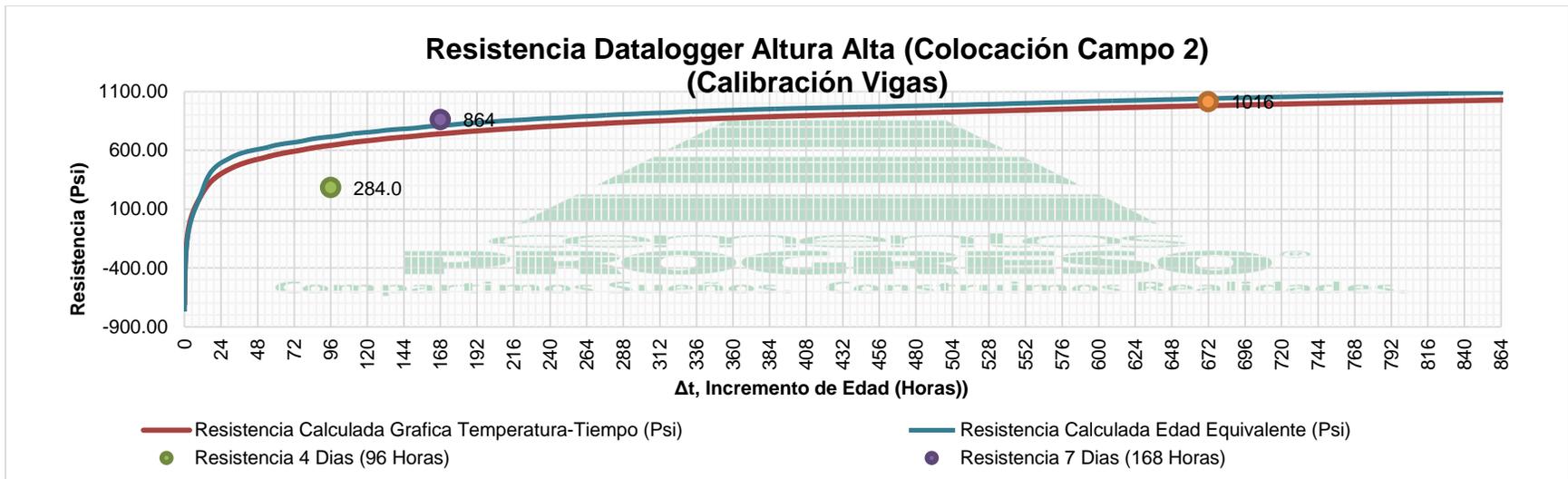
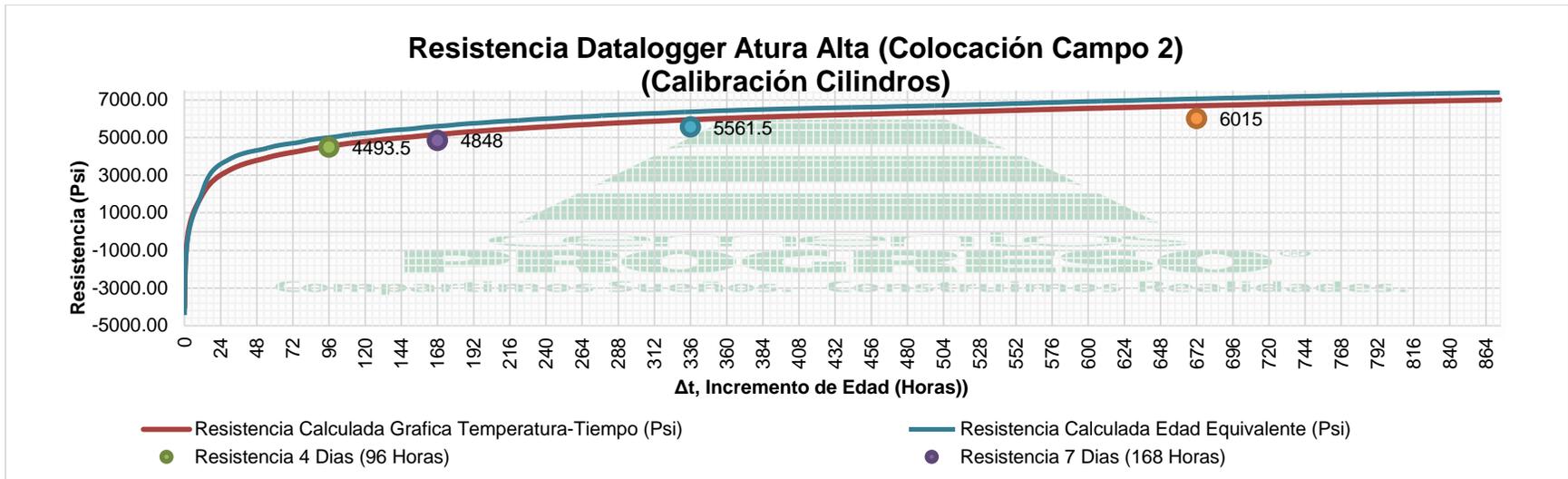
Se muestra el comportamiento de las gráficas de las resistencias potenciales en laboratorio y las estimadas:



Se muestra el comportamiento de los resultados para altura alta de la colocación de los sensores de temperatura:

Tabla Resumen (Temperaturas Altura Alta)							
Edad (Horas)	Edad (Días)	Calibración Cilindros			Calibración Vigas		
		Resistencia Cilindros Curados en Laboratorio (Psi)	Resistencia Calculada Gráfica Temperatura-Tiempo (Psi)	Resistencia Calculada Edad Equivalente (Psi)	Resistencia Vigas Curados en Laboratorio (Psi)	Resistencia Calculada Gráfica Temperatura-Tiempo (Psi)	Resistencia Calculada Edad Equivalente (Psi)
8.42	0.35	-	1448.2	1399.0	-	156.4	148.2
24.00	1.00	-	3006.8	3591.1	-	401.4	493.7
72.00	3.00	-	4221.35	4701.29	-	592.36	668.69
96.00	4.00	4493.50	4542.21	5004.50	284.00	642.81	716.48
168.00	7.00	4848.00	5168.52	5604.86	864.00	741.28	811.11
336.00	14.00	5561.50	5953.06	6373.02	0.00	864.63	932.19
672.00	28.00	6015.00	6691.34	7063.37	1016.00	980.71	1041.00

Se muestran las comparaciones de resistencia en las graficas siguientes:

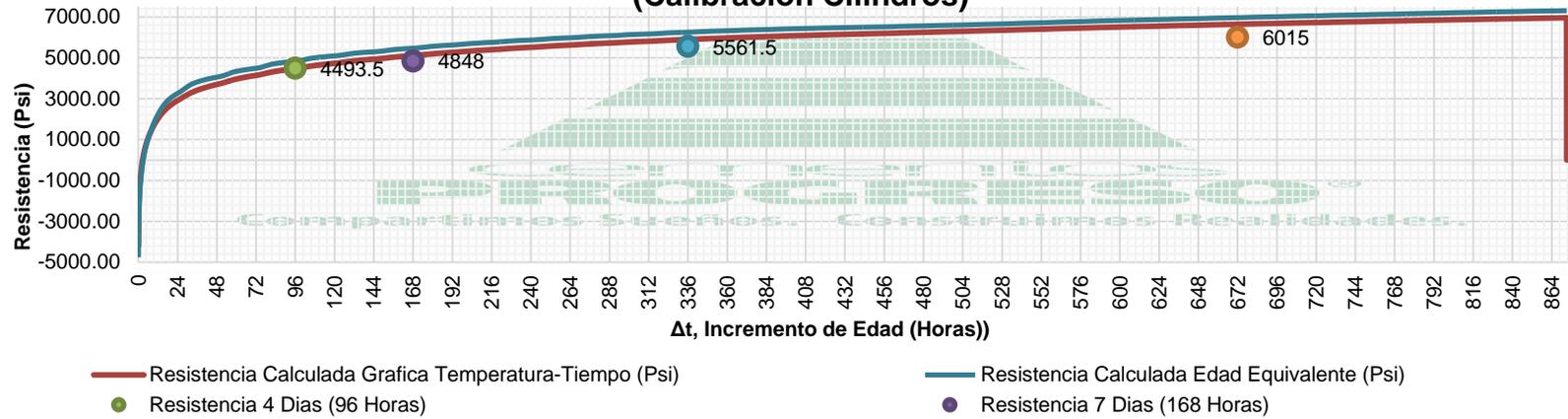


Luego de los cálculos efectuados para cada una de las alturas, se hizo un promedio de las temperaturas obtenidas para los tres niveles, con el fin de obtener una comparación que involucrara cada uno de los puntos en donde fueron colocados los sensores.

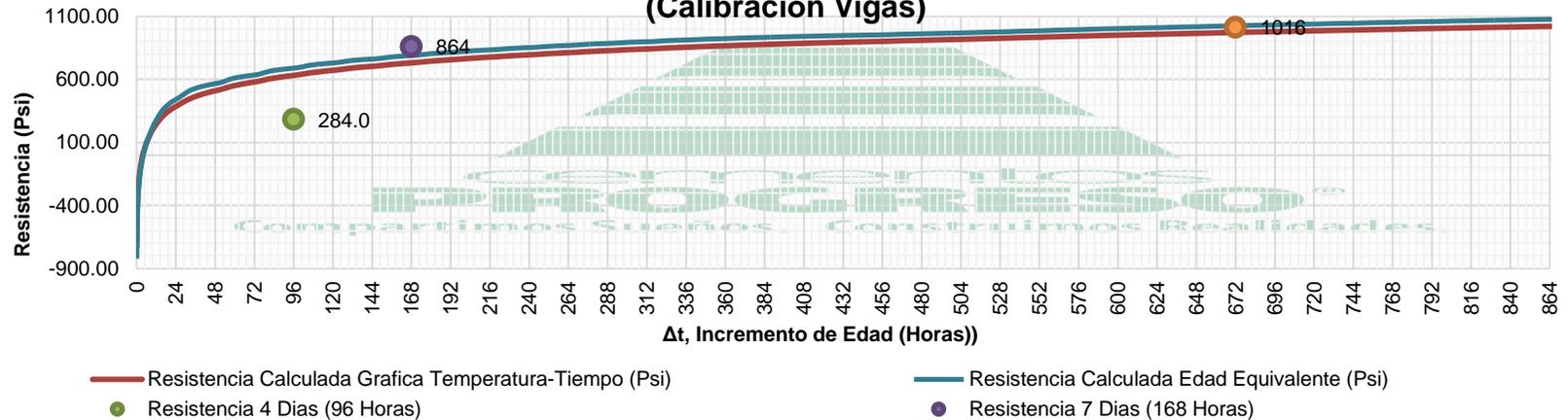
Tabla Resumen (Temperaturas Promedio)							
Edad (Horas)	Edad (Días)	Calibración Cilindros			Calibración Vigas		
		Resistencia Cilindros Curados en Laboratorio (Psi)	Resistencia Calculada Gráfica Temperatura-Tiempo (Psi)	Resistencia Calculada Edad Equivalente (Psi)	Resistencia Vigas Curados en Laboratorio (Psi)	Resistencia Calculada Gráfica Temperatura-Tiempo (Psi)	Resistencia Calculada Edad Equivalente (Psi)
8.42	0.35	-	1530.1	1598.7	-	169.2	179.7
24.00	1.00	-	2914.1	3263.2	-	386.8	442.0
72.00	3.00	-	4144.37	4491.16	-	580.26	635.57
96.00	4.00	4493.50	4477.27	4837.80	284.00	632.60	690.21
168.00	7.00	4848.00	5111.30	5471.96	864.00	732.28	790.16
336.00	14.00	5561.50	5898.82	6256.64	0.00	856.10	913.84
672.00	28.00	6015.00	6645.88	6969.97	1016.00	973.56	1026.28

Se observa el comportamiento en los graficos mostrados a continuacion:

Resistencia Datalogger Temperaturas Promedio (Colocación Campo 2) (Calibración Cilindros)



Resistencia Datalogger Temperaturas Promedio (Colocación Campo 2) (Calibración Vigas)

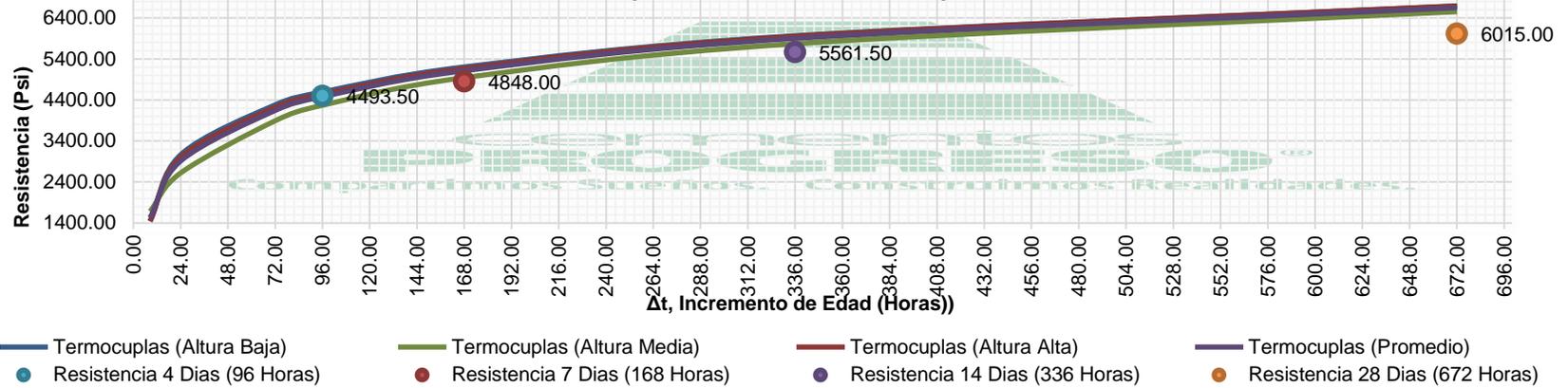


Para finalizar con el estudio se realizó una gráfica comparativa de las resistencias obtenidas en laboratorio luego de las pruebas a compresión, con las estimadas para el factor temperatura-tiempo y edad equivalente para cada una de las alturas y el promedio.

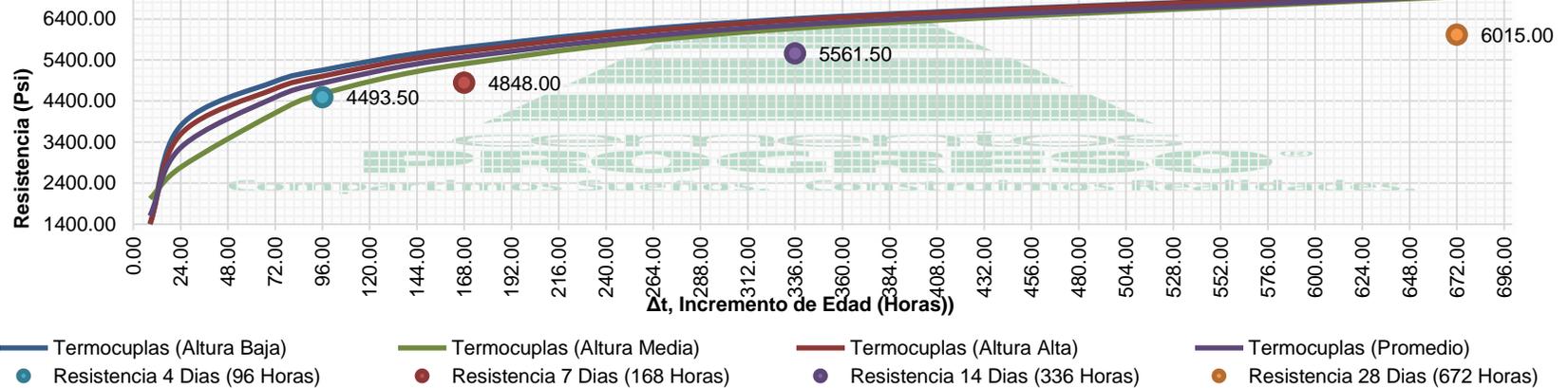
Tabla Comparación Resúmenes Calibración Cilindros (Colocación Campo 2)										
Edad (Horas)	Edad (Días)	Resistencia Cilindros Curados en Laboratorio (Psi)	Termocuplas (Altura Baja)		Termocuplas (Altura Media)		Termocuplas (Altura Alta)		Termocuplas (Promedio)	
			Resistencia Estimada Factor Tiempo-Temperatura (Psi)	Resistencia Estimada Edad Equivalente (Psi)	Resistencia Estimada Factor Tiempo-Temperatura (Psi)	Resistencia Estimada Edad Equivalente (Psi)	Resistencia Estimada Factor Tiempo-Temperatura (Psi)	Resistencia Estimada Edad Equivalente (Psi)	Resistencia Estimada Factor Tiempo-Temperatura (Psi)	Resistencia Estimada Edad Equivalente (Psi)
8.42	0.35	-	1444.78	1401.25	1681.41	2023.31	1448.20	1398.95	1530.08	1598.65
24.00	1.00	-	3068.00	3799.84	2619.77	2786.86	3006.80	3591.10	2914.13	3263.20
72.00	3.00	-	4284.26	4879.92	3891.15	4111.13	4221.35	4701.29	4144.37	4491.16
96.00	4.00	4493.50	4595.85	5154.94	4268.46	4580.82	4542.21	5004.50	4477.27	4837.80
168.00	7.00	4848.00	5206.63	5707.49	4941.87	5306.03	5168.52	5604.86	5111.30	5471.96
336.00	14.00	5561.50	5965.47	6409.45	5767.80	6170.29	5953.06	6373.02	5898.82	6256.64
672.00	28.00	6015.00	6691.82	7066.10	6548.82	6944.84	6691.34	7063.37	6645.88	6969.97

Se observa el comportamiento similar de las estimaciones de resistencia para alturas baja y alta y una resistencia menor en la altura media debido que el comportamiento se acerca al de la temperatura ambiente. Se muestra a continuación el comportamiento de las resistencias de las gráficas, tanto para factor temperatura-tiempo, como para edad equivalente.

Comparaciones Factor Temperatura-Tiempo (Colocacion Campo 2) (Calibracion Cilindros)



Comparaciones Edad Equivalente (Colocacion Campo 2) (Calibracion Cilindros)

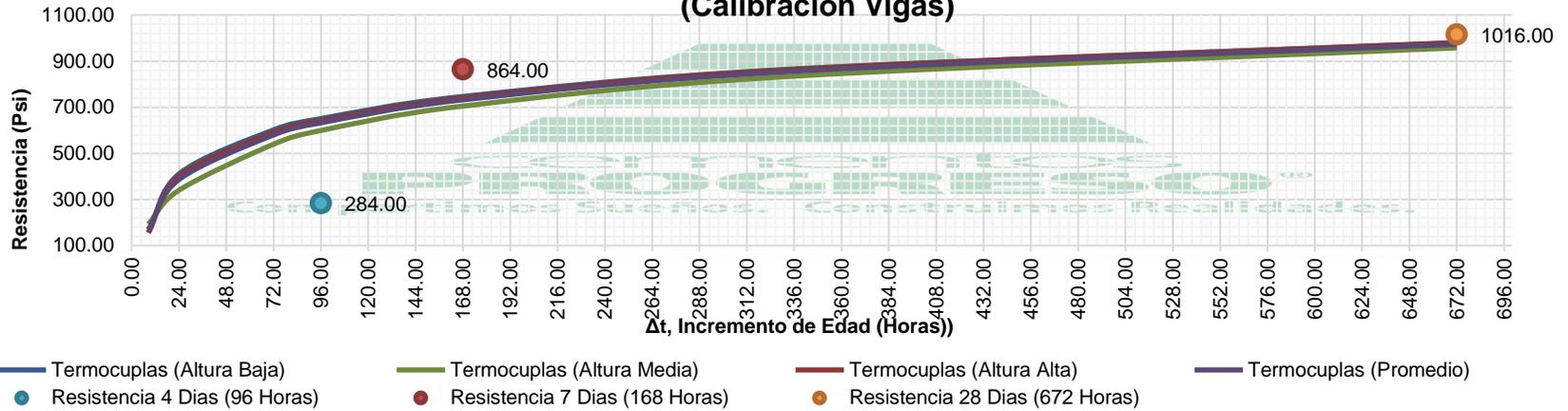


Se muestran los resultados de las resistencias potenciales y estimadas para los especímenes de vigas, en la gráfica a continuación:

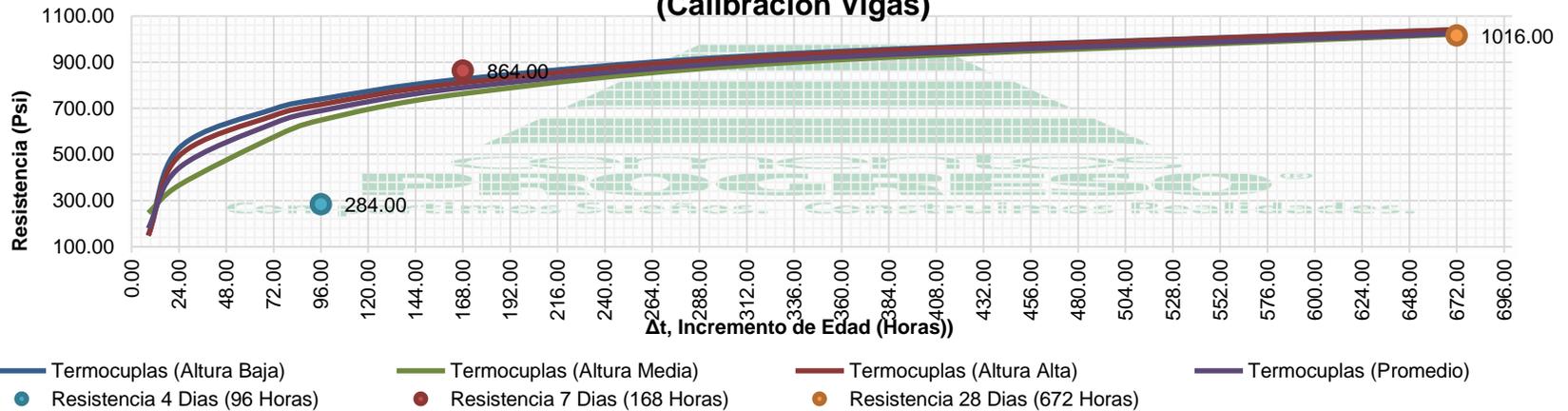
Tabla Compasión Resúmenes Calibración Vigas (Colocación Campo 2)										
Edad (Horas)	Edad (Días)	Resistencia Vigas Curadas en Laboratorio (Psi)	Termocuplas (Altura Baja)		Termocuplas (Altura Media)		Termocuplas (Altura Alta)		Termocuplas (Promedio)	
			Resistencia Estimada Factor Tiempo-Temperatura (Psi)	Resistencia Estimada Edad Equivalente (Psi)	Resistencia Estimada Factor Tiempo-Temperatura (Psi)	Resistencia Estimada Edad Equivalente (Psi)	Resistencia Estimada Factor Tiempo-Temperatura (Psi)	Resistencia Estimada Edad Equivalente (Psi)	Resistencia Estimada Factor Tiempo-Temperatura (Psi)	Resistencia Estimada Edad Equivalente (Psi)
8.42	0.35	-	155.82	148.54	193.02	246.59	156.35	148.18	169.23	179.66
24.00	1.00	-	411.03	526.61	340.55	366.94	401.40	493.71	386.83	442.02
72.00	3.00	-	602.25	696.85	540.45	575.67	592.36	668.69	580.26	635.57
96.00	4.00	284.00	651.24	740.20	599.77	649.70	642.81	716.48	632.60	690.21
168.00	7.00	864.00	747.27	827.29	705.65	764.01	741.28	811.11	732.28	790.16
336.00	14.00	0.00	866.58	937.93	835.50	900.23	864.63	932.19	856.10	913.84
672.00	28.00	1016.00	980.78	1041.43	958.30	1022.32	980.71	1041.00	973.56	1026.28

Se observa el comportamiento de las resistencias en las siguientes graficas:

Comparaciones Factor Temperatura-Tiempo (Colocación Campo 2) (Calibración Vigas)



Comparaciones Edad Equivalente (Colocación Campo 2) (Calibración Vigas)



En cada una de las alturas se puede observar que los resultados presentados representan actividades críticas, como las 8.42 horas que es el horario de inicio del corte de juntas en la pavimentación, presentando una resistencia aproximada de 1,400 psi de resistencia a compresión y de 150 psi de resistencia a flexión.

Las demás parámetros mostrados son los ensayos de rotura de los especímenes, con para obtener resistencias potenciales a 1, 3, 7, 14 y 28 días de curado, a manera de comprobación de la exactitud del método.

Rangos de Tiempos Actividades Críticas (Horas)				
Temperatura	Baja	Media	Alta	Promedio
Inicio Corte	8.42	8.42	8.42	8.42
Fin Corte	8.83	8.83	8.83	8.83
3000Psi (EE)	15.42	28.00	16.58	19.33
3000Psi (TT)	22.75	31.33	23.92	25.92
500Psi (EE)	21.42	51.58	24.83	30.83
500Psi (TT)	38.67	56.17	41.00	44.83

Para la apertura al tránsito de este proyecto se encontró que los 3,000 Psi fueron alcanzados a una edad entre 28 y 31 horas en resistencia a compresión y los 500 psi de resistencia a flexión se alcanzaron entre 51 y 56 horas después de colocado el concreto.

4.2.3 Estimación de Costos para la Realización del Proyecto

La estimación de costos que se presenta a continuación se muestra con el fin de contar con una idea aproximada sobre el costo en el que podría incurrirse para el desarrollo de un proyecto similar, incluyendo ensayos de laboratorio y campo, así como colocación de dispositivos en campo. Aunque, es importante mencionar que, en esta oportunidad, se realizaron ensayos adicionales a los estrictamente necesarios, tal el caso de la caracterización de cementos. Además, se ha cargado en la estimación de costos de este proyecto, el dispositivo de recolección de datos, pero es claro que este equipo en particular puede ser utilizado en proyectos adicionales y no es exclusivo de este.

Actividades Principales	Cantidad	Precio Unitario	Sub Total
Fase de Laboratorio			
Caracterización de Cemento (Análisis Químico)	1	Q1,500.00	Q1,500.00
Caracterización de Cemento (Análisis Físico)	1	Q2,150.00	Q2,150.00
Caracterización de Cemento (Residuo Insoluble)	1	Q250.00	Q250.00
Ensayo Completo Agregado Grueso (Agregado ¾" y 3/8")	2	Q700.00	Q1,400.00
Ensayo Completo Agregado Fino (Arena Triturada)	1	Q750.00	Q750.00
Hechura, Diseño y Evaluación de Mezcla	2	Q2,000.00	Q4,000.00
Determinación de Tiempos de Fraguado	3	Q480.00	Q1,440.00
Resistencia a la Compresión de Cubos	54	Q40.00	Q2,160.00
Dispositivo de Recolección de Datos (Datalogger DT4947SD)	1	Q3,200.00	Q3,200.00
Cable con Termocupla Tipo K (Costo por Metro Lineal)	6	Q66.00	Q396.00
Hechura y Curado de Especímenes de Ensayo (Cilindros)	12	Q65.00	Q780.00
Hechura y Curado de Especímenes de Ensayo (Vigas)	6	Q75.00	Q450.00
Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos	10	Q70.00	Q700.00
Resistencia a la Flexión del Concreto (Vigas)	5	Q80.00	Q400.00
Fase de Campo			
Cable con Termocupla Tipo K (Costo por Metro Lineal)	20	Q66.00	Q1,320.00
Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos	8	Q90.00	Q720.00
Resistencia a la Flexión del Concreto (Vigas)	4	Q120.00	Q480.00
Total Proyecto			Q22,096.00

4.3 DISCUSIÓN

Descripción General de la Práctica

Sabemos que como característica principal del método, los procedimientos realizados serán válidos en la medida que se utilice la misma dosificación de los elementos que componen la mezcla de concreto a estudiarse, tanto en laboratorio como en obra. Esta metodología resulta óptima para proyectos de colocación de concreto en grandes volúmenes, en donde no exista un cambio significativo en la formulación del mismo, tal es el caso del proyecto Vía Alternativa del Sur (VAS).

Para desarrollar el trabajo fue necesario conocer a profundidad el funcionamiento del método, los alcances y sus limitaciones, bajo la perspectiva de que aporte tendría para futuros proyectos en Guatemala y que tan innovador puede ser para el país. El método se presentó a los encargados del proyecto, con el fin de obtener los permisos para la ejecución de los estudios en campo y un apoyo por parte del equipo de proyecto. Luego se procedió a la obtención del equipo y herramientas requeridas, se realizó el muestreo de los materiales en la planta concretera del proyecto Vía Alternativa del Sur (VAS), con el fin de replicar exactamente el concreto en laboratorio.

Para la fase de laboratorio se procedió a la caracterización de cada una de las materias primas, como fue detallado con anterioridad, con equipo y laboratorios certificados y personal capacitado en el tema. Se hizo un estudio de las condiciones de exposición a la temperatura a la que puede estar sometido el concreto y habiéndolas determinado, se procedió a obtener los tiempos de fraguado del concreto a las temperaturas establecidas, como sigue:

Temperatura (°C)	Tiempo de Fraguado Inicial (Horas)	Tiempo de Fraguado Final (Horas)
Máxima 32°C	7:20	8:21
Media 23°C	9:35	10:21
Mínima 8°C	14:14	17:17

Con esto se procedió a la determinación de la temperatura de referencia y la energía de activación, en esta fase se realizan una serie de especímenes cúbicos de 50mm (2 pulgadas), con una calendarización exacta de los tiempos de rotura y un control especial de estos, para que el estudio sea representativo. De la misma manera, se requiere de la elaboración de especímenes cilíndricos y de vigas, con el objeto de conocer el comportamiento del historial de temperaturas y las resistencias que presenta el concreto. En donde se muestra el valor más alto en la temperatura es a una edad alrededor de las 7 horas, con una temperatura de 30.6°C para cilindros y 31.1°C para vigas. Con esta información se trazan las curvas de calibración, tanto para factor temperatura-tiempo como para la edad equivalente, que serán las utilizadas para la estimación de las resistencias del concreto colocado en campo.

Las funciones de resistencia-madurez determinadas en la etapa de calibración de la mezcla de concreto serán válidas para el diseño de mezcla utilizado, siempre y cuando se mantengan sin variar las condiciones y características de los componentes del concreto.

Siendo las funciones de madurez, que responden a las calibraciones para especímenes cilíndricos para la mezcla de concreto utilizada, las siguientes:

- Factor Temperatura-Tiempo

$$y = 1186.2 \ln(x) - 4915.9$$

- Edad Equivalente

$$y = 1258.1 \ln(x) - 1857.4$$

Y las funciones de madurez, que responden a las calibraciones para especímenes de vigas para la mezcla de concreto utilizada, las siguientes:

- Factor Temperatura-Tiempo

$$y = 186.5 \ln(x) - 844.24$$

- Edad Equivalente

$$y = 198.3 \ln(x) - 365.08$$

Con la fase de laboratorio concluida y con los datos requeridos para la validación del método en el proyecto, se procedió a la colocación de equipos en campo para la obtención de los historiales de temperatura en obra.

Se colocaron de nuevo sensores en campo, en la estación 0+090 del tramo, en tres diferentes posiciones de altura, colocados esta vez en ménsulas de aluminio con un aislante para evitar interferencias. Se determinó que los sensores a baja altura y alta tenían comportamiento similar, a diferencia del colocado a media altura colocado en las cercanías del lugar donde fue realizado el corte de juntas que presentaba un comportamiento similar al de la temperatura ambiente.

A continuación se discutirán los resultados basándonos en las hipótesis planteadas al inicio de este trabajo.

Discusión en base a las preguntas planteadas en la hipótesis

- ¿Es posible implementar una nueva metodología para la determinación de la resistencia del concreto para el proyectos de construcción con concreto hidráulico en Guatemala?

Si es posible implementar una nueva metodología para la estimación de la resistencia, en este caso utilizando la madurez del concreto como insumo.

Para lograr esto, es necesario contar con el equipo, instalaciones y personal capacitado para realizarlo adecuadamente y con resultados confiables. Además, se recalca que la metodología proporcionará una estimación de resistencia adecuada siempre y cuando los estudios en laboratorio se realicen en un diseño de mezcla de concreto que sea igual a la que se utilizará en el proyecto a estudiar, esto incluye utilizar las mismas materias primas. Cualquier cambio en materiales o diseño, puede influir en proporcionar estimaciones incorrectas, lo que puede generar riesgos en la ejecución del proyecto.

- ¿Se puede conocer el periodo en el cual el concreto alcanza la resistencia especificada para la apertura rápida al tránsito de una pavimentación?

Para este proyecto en particular, si se pudo establecer un periodo en el cual el concreto alcanza la resistencia de apertura al tránsito. Esto puede ser comprobado en las gráficas de resistencias estimadas que se generaron como resultado del proyecto, que además, concuerdan con los resultados de cilindros y vigas elaborados en campo y ensayados en laboratorio, tal como el método lo establece.

En relación a la resistencia especificada, vale la pena mencionar que en Guatemala no existen parámetros de resistencia para la apertura rápida al tránsito, únicamente se especifica que hay que esperar 7 días por temas de curado efectivo del concreto. Sin embargo, a nivel internacional y específicamente en los Departamentos de Tránsito en diferentes Estados de Estados Unidos, establecen como resistencia mínima de apertura al tránsito de 3,000 psi a compresión y 500 psi a flexión. Estos valores fueron seleccionados en este proyecto como parámetros de referencia. Estos criterios de apertura al tránsito pueden variar de Estado a Estado o de País a País, dependiendo de diferentes circunstancias y las necesidades de cada proyecto. Sin embargo, pareció adecuado tomar este criterio, utilizando ampliamente.

En este estudio se encontró que la edad a la que se alcanzaron los 3,000 psi de resistencia a la compresión está comprendida entre las 28 y las 31 horas después de haberse colocado el concreto. Por otro lado, los 500 psi de resistencia a la flexión se alcanzaron entre las 51 y las 56 horas después de colocado el concreto. En este caso quedará a criterio del ingeniero de obra el seleccionar la edad adecuada para la apertura al tránsito, si se quiere estar del lado conservador, se puede esperar hasta 50 horas para abrir al tránsito para que las condiciones del concreto sean mejores, pero si se elige el criterio de abrir a las 30 horas, también es aceptable, según recomendaciones internacionales que han sido probadas. Sin embargo, es importante tener claro que el proceso de curado del concreto debe seguir por lo menos hasta que se cumplan 7 días

después de la colocación, por lo tanto, se deberán tomar las medidas pertinentes para proteger el concreto de la evaporación de agua (mantener húmedo el concreto, seguir colocando membranas de curado o cubrirlo mientras el tráfico no esté circulando).

Otro tema a tener en cuenta es que la edad a la que se alcanza la resistencia de 3,000 psi a compresión o 500 psi a flexión, son exclusivas de este proyecto en particular. Otros proyectos, con diferente ubicación, a diferentes condiciones ambientales y con materiales y dosificaciones de materiales distintos, se comportarán de manera diferente y no es realista pensar que las resistencias estimadas serán iguales que las obtenidas en este proyecto.

- ¿De llegar a conocer el comportamiento de la madurez del concreto en este proyecto, será posible determinar un rango de resistencia óptima para el corte de juntas de contracción en una pavimentación?

Es muy atrevido afirmar que con el estudio realizado se pudo determinar un rango óptimo de resistencia para esta tarea, sobre todo porque la actividad de corte de juntas sigue siendo una actividad empírica que depende mucho de la experiencia, conocimiento y destreza de los operadores de corte. Lo que si podemos afirmar, es que para este proyecto el corte se inició, en promedio, a las 8.42 horas de colocado el concreto, con una resistencia aproximada de 1,400 psi a compresión y de 150 psi a flexión. Si esta resistencia es la óptima para cortar las juntas en el concreto, es difícil de asegurar, pero para este proyecto en particular parece ser la resistencia adecuada, porque los cortes ejecutados se realizaron de buena manera y no hubo evidencia de desportillamiento o fisuras de contracción en otros sitios de las losas. Esto nos indica que los cortes se hicieron en el momento adecuado, cuando el concreto tenía alrededor de 1,400 psi de resistencia a la compresión. No se puede generalizar esto para otros proyectos, y se deberá confirmar con estudios similares en dichos proyectos.

**MARCO V: CONCLUSIONES
Y RECOMENDACIONES**

5.1. CONCLUSIONES

- Cada uno de los componentes del concreto influye en su comportamiento, por lo que el cambio en la procedencia o dosificación de los mismos, cambiará las propiedades del mismo. Por ello se considera importante mencionar que el procedimiento realizado y los datos obtenidos con el mismo, son exclusivos para el concreto colocado en el proyecto Vía Alternativa del Sur, en el tramo 0+090, con las dosificaciones de ese diseño de mezcla en particular.
- De los historiales de temperatura en laboratorio se observó que el valor más alto en la temperatura del concreto sucedió aproximadamente a las 7 horas con una temperatura de 30.6°C para cilindros y 31.1°C para vigas, a diferencia de los colocados en campo que presentaron la temperatura más alta a las 13.42 horas con una temperatura de 43.7°C. Por tanto se observa que en el concreto influirán también los factores ambientales en la ganancia de resistencia.
- Se aprendió que la ubicación y la atención a los equipos de monitoreo es vital para el éxito del método, ya que los elementos metálicos y otros elementos extraños pueden causar interferencia proporcionando registros erróneos de las condiciones de temperatura en que se encuentra el concreto. Es importante que el personal de obra esté informado de la importancia de las tareas que se ejecutarán en campo para el desarrollo del método y de los equipos instalados, porque de lo contrario las lecturas se pueden ver alteradas por manipulación involuntaria del equipo por parte del personal.
- Como una de las termocuplas que se colocó dentro del concreto quedó precisamente en la misma posición en que se cortó la junta de contracción del pavimento, se pudo observar el comportamiento térmico que presenta el concreto posterior al corte de la junta. Como se esperaba, el corte de la junta tiene gran incidencia en la temperatura interna del concreto en esa zona, tanto que el comportamiento de temperaturas resultó ser muy similar a la temperatura del ambiente en todo momento después de ejecutado el corte.
- Como se mencionó anteriormente, especificaciones y recomendaciones internacionales, especialmente de los Departamentos de Transporte de diferentes Estados en Estados Unidos, proponen una resistencia mínima de alrededor de 3000 psi a compresión y de 500 psi a flexión para permitir la apertura al tránsito vehicular en un pavimento. En este proyecto estos valores se alcanzaron entre las 28 y las 31 horas para la resistencia a compresión y entre las 51 y 56 horas para la resistencia a flexión.
- El corte de juntas de contracción se ejecutó, en promedio, a las 8.42 horas después de haberse colocado el concreto. Bajo las estimaciones del método, el concreto tenía una resistencia alrededor de 1400 psi a la compresión y 150 psi a la flexión. Antes del proyecto no se tenía una idea de la magnitud de la resistencia del concreto en ese momento crucial, conocer esto era precisamente

uno de los objetivos del proyecto. Se recalca que este comportamiento fue específicamente para el proyecto Vía Alternativa del Sur (VAS), con el diseño de mezcla de concreto utilizado en ese momento.

- El método de estimación de resistencia por madurez del concreto, es un método innovador en Guatemala, que requiere personal capacitado, tanto a nivel de laboratorio como en campo, pero es claro que puede traer muchos beneficios en proyectos de pavimentación, como el proyecto VAS, asegurando la apertura rápida al tráfico con bajo riesgo de deterioro del concreto.
- Si bien es cierto que el concreto ha alcanzado la resistencia esperada para su apertura al tránsito, estimada según el método de madurez, no se deben descuidar las condiciones idóneas de curado por lo menos durante los primeros 7 días, de lo contrario, el concreto puede no contar con las características de desempeño para las que fue diseñado.

5.2. RECOMENDACIONES

- Se considera importante indicar que el presente proyecto tiene el fin de proporcionar conocimiento del método de madurez por medio de su implementación en el proyecto de pavimentación Vía alterna del Sur (VAS), por lo cual se recomienda no generalizar los resultados en otras pavimentaciones. Ya que este estudio únicamente pretende servir como una guía de utilización de la metodología y abrir el camino para futuras investigaciones en otros proyectos de pavimentación y otras aplicaciones.
- Para evitar que los elementos metálicos y otros elementos extraños causen interferencia generando registros erróneos de las condiciones en que se encuentra el concreto, se recomienda planificar adecuadamente la ubicación, dispositivos y protección que se utilizarán para los sensores de temperatura y los equipos de registro, tal como se hizo en la segunda colocación, con ayuda de ménsulas de aluminio con protección aislante.
- Por el comportamiento de temperatura del concreto, medida con la termocupla ubicada debajo del corte de juntas, que fue similar a la temperatura del ambiente, se recomienda tomar en cuenta que si los sensores de temperatura se acercan mucho al área de corte de juntas, podrán generar datos erróneos que no servirán para hacer una buena estimación de resistencia utilizando la metodología.
- Se recomienda a la industria de la construcción en general, que este método de la madurez se utilice a mayor escala en proyectos similares con la finalidad de que llegue a ser un método de uso rutinario en proyectos de gran envergadura y no solo en proyectos de pavimentación con concreto hidráulico, sino también en otras aplicaciones importantes como la remoción rápida de las formaletas en las edificaciones de todo tipo y en proyectos de post-tensión.

MARCO VI: REFERENCIAS

6.1. REFERENCIAS

- Aguilar, O. Rodríguez, E. Sermeño, M. Martín, J. (2009). *Determinación de la Resistencia del Concreto a Edades Tempranas Bajo la Norma ASTM C1074, en Viviendas de Concreto Colocadas en el Sitio*. Tesis Inedita. Universidad de El Salvador, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela de Ingeniería Civil. El Salvador.
- Carino, N.J. Lew, H.S. (2001). *The Maturity Method: From Theory to Application*. American Society of Civil Engineers. Reston: Peter Chang.
- Department of Transit (DOT's) of Iowa. (2014). *Standard Specifications for Public Improvements. Cedar Rapids Metropolitan Area, Portland Cement Concrete Pavement, Section 02700*, United States of America.
- Halvorsen, G. (2015) *Juntas en las Construcción de Concreto (ACI-224.3R-95), Adaptación al español por Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto*. Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto (IMCYC). Mexico.
- Kosmatka, S. Kerkhorff, B. Panarese, W. Tanesi. Jussara. *Diseño y control de mezclas de concreto, boletín de ingeniería eb201*. (1ª. Ed.) Estados Unidos: Portland Cement Association.
- Kosmatka, S. H; Panarese, W. (1998) *Design and Control of Concrete Mixtures*. (12a. Ed.) Portland Cement Association (PCA). Estados Unidos de America.
- Kosmatka, S. Panarese, W. (1992) *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. México, Traducción IMCYC, Portland Cement Association (PCA) (13ª. Ed.) Mexico.
- K. Wight, J. (2005) *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S-05) y Comentario, Versión en español y en sistema métrico Es un Estándar del ACI, Producido por el Comité 318*. Instituto Americano del Concreto (American Concrete Institute, ACI). Estados Unidos
- Mechura, V. (2011). *Aplicación del Ensayo de Madurez a Pavimentos de Hormigón*. Tesis Inedita. Universidad Tecnología Nacional, Facultad Regional La Plata, Centro de Investigaciones Viales, Área de Estructuras y Materiales de Construcción. La Plata, Argentina.
- Mendizábal, J. (2013). *Megaproyectos Sensores Electrónicos Aplicados a la Ingeniería Civil, Prueba No Destructiva del Concreto: Método de Madurez Aplicado a Concreto Convencional*. Trabajo Inedito. Universidad Del Valle de Guatemala, Facultad de Ingeniería. Ciudad de Guatemala, Guatemala.

- Norma Técnica Guatemalteca. (2014). *Practica para la Estimación de la Resistencia del Concreto por el Método de la Madurez*. COGUANOR NTG 41042 (ASTM C1074-11). Guatemala.
- P. Fahl, T. *Concrete Principles*. (1ª. Ed.) American Technical Publishers, Inc. Estados Unidos de America.
- Salazar, A. (2014) *Guía para el Diseño y Construcción de Pavimentos Rígidos*. México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. (IMCYC), (2ª. Ed.). Mexico