



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL

APLICACIÓN DEL CONCEPTO DE MADUREZ EN PAVIMENTOS URBANOS DE HORMIGÓN

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

PAULINA VALESKA GUZMÁN TAPIA

PROFESOR GUÍA

ADOLFO OCHOA LLANGATO.

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

JACQUES BORNAND ARAYA

EDGARDO GONZALEZ LIZAMA

SANTIAGO DE CHILE

2020

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERA CIVIL
POR: Paulina Valeska Guzmán Tapia
FECHA: 23/12/2020
PROFESOR GUÍA: Adolfo Ochoa Llangato

APLICACIÓN DEL CONCEPTO DE MADUREZ EN PAVIMENTOS URBANOS DE HORMIGÓN

La aceptación de obras de pavimentación con hormigón, de acuerdo a la resistencia requerida, en particular para proyectos de pavimentación urbana que deben ser aprobados por el Servicio de Vivienda y Urbanización SERVIU de cada región de Chile, es realizada mediante la extracción y evaluación de testigos de hormigón. Esto implica un ensayo destructivo que demora un tiempo, a veces excesivo, para obtener un resultado que asegure una apertura a tránsito y correspondiente aceptación de pavimentos urbanos. Es por esta razón que es necesario un método no destructivo, predictivo y práctico más eficiente para obtener la resistencia del hormigón a edades tempranas y que sea representativo de las condiciones reales de la obra. En este trabajo de investigación se analizó el método de madurez como herramienta para optimizar los tiempos de apertura a tránsito de pavimentos urbanos de hormigón tipo SERVIU, a partir de la experiencia y resultados obtenidos en un proyecto de pavimentación urbana en Santiago, en coordinación con dos contratistas participantes del proyecto, y sus respectivas empresas proveedoras de hormigón.

El método de Madurez estudia el efecto del historial de temperatura interna del hormigón producto de la reacción de sus componentes y la influencia de la temperatura ambiente sobre la resistencia del hormigón. Este método permite estimar la resistencia in situ del hormigón, mediante una relación única entre el índice de madurez y el desarrollo de resistencia del hormigón, y su uso es específico para una mezcla determinada, por ello, cada vez que cambie alguna proporción de sus materiales, se debe estudiar si esta tendría efectos en la relación o en caso contrario desarrollar una nueva relación de índice de madurez y resistencia. Como primera etapa se elaboró una curva característica para cada contratista, mediante los resultados de tiempo vs temperatura y la resistencia a compresión de los cilindros, y posteriormente se colocaron los sensores de temperatura embebidos en el hormigón, para registrar el comportamiento de la temperatura y realizar un perfil de temperatura vs tiempo, en 5 sectores para contratista 1 y 6 sectores para contratista 2, con lo cual fue posible estimar la resistencia a compresión en cada sector, mediante la aplicación de la función de madurez propuesta por Nurse-Saul.

Con esto fue posible obtener los tiempos en los cuales se alcanzó la resistencia objetivo del proyecto, correspondiente a 34 MPa. Para el caso del contratista 1 esto se alcanzó, en promedio, a los 5 días, y para el contratista 2 a los 3 días en promedio. Considerando como requisito un 75% de resistencia final, como límite de aceptación, se podría realizar la apertura a tránsito al tercer día para contratista 1 y al segundo día para el contratista 2. Lo cual es una considerable disminución respecto al periodo habitual de 28 días para este efecto. Finalmente, se realizó una comparación entre este método y el ensayo de testigos, donde se obtuvieron diferencias de 30% para el contratista 1 y de 14% para el contratista 2, con estos resultados se puede validar el uso y concepto de madurez, con una precisión suficiente, como método complementario a los métodos de aceptación del proyecto, de manera de aportar a la hora de tomar decisiones con rapidez, como lo es la apertura a tránsito, minimizando los tiempos del proyecto y costos del mismo.

DEDICATORIA

A mis padres, Carmen y Sergio.
Por entregarlo todo y más.

...nunca es demasiado tarde.

AGRADECIMIENTOS

A mis profesores,

Jacques Bornand, por la ayuda, la paciencia y entrega en el desarrollo de este trabajo.

Adolfo Ochoa, por el interés en sus alumnos, y darnos un empujón más allá de lo académico, su presencia y preocupación fue de gran ayuda para culminar este proceso.

Edgardo González, por su interés en este trabajo y en el término del proceso académico.

Y a todos los que me han dado energía y ánimos para terminar, sobre todo a Carlos por su apoyo en todas las formas posibles y estar siempre presente.

TABLA DE CONTENIDO

CAPITULO 1: INTRODUCCION	1
1.1 Descripción General.....	1
1.2 Descripción de la investigación	3
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo General.....	4
1.3.2 Objetivos Específicos.....	4
1.4 Metodología	4
CAPITULO 2: ANTECEDENTES GENERALES	6
2.1 Antecedentes.....	6
2.1.1 Diseño de pavimentos	6
2.1.2 Ensayos control de calidad	6
2.1.3 Dificultades ensayo Flexo-tracción	7
2.2 Resistencia a la compresión del hormigón	7
2.3 Método de madurez del hormigón	10
2.3.1 Antecedentes Históricos	10
2.3.2 Aplicación Técnica.....	12
2.3.3 Experiencia en Chile	12
CAPITULO 3: MARCO TEORICO	14
3.1 Concepto de Madurez del Hormigón.....	14
3.2 Modelos para determinar la madurez del hormigón.....	14
3.2.1 Modelo de Nurse-Saul	15
3.2.2 Modelo de Rastrup	16
3.2.3 Modelo de Arrhenius	17
3.2.4 Modelo holandés madurez ponderada.....	17
3.2.5 Modelo de Guo.....	18
3.3 Estimación de la resistencia a la compresión del hormigón a partir del conocimiento de su madurez	18
3.4 Normativa vigente para el uso del método de madurez del hormigón.....	20
3.4.1 Consideraciones ASTM C1074	20
3.4.2 Consideraciones NCh3565	20
3.5 Equipos para medición de la madurez del hormigón.....	21
3.6 Procedimiento para desarrollar la curva madurez-resistencia.....	23

3.7 Procedimiento para estimar la resistencia a la compresión del hormigón a partir de su madurez, in situ.	23
3.8 Ventajas y limitaciones del método de madurez	24
3.8.1 Ventajas de usar la madurez del hormigón.....	24
3.8.2 Limitaciones del método de madurez del hormigón	24
3.9 Resumen de modelos a utilizar	25
CAPITULO 4: METODOLOGÍAS Y EJECUCIÓN DE ENSAYOS	26
4.1 Metodología utilizada	26
4.1.1 Caracterización de hormigones.....	26
4.1.2 Instrumentación in-situ.....	27
4.1.3 Monitoreo de datos.....	27
4.1.4 Extracción de testigos.....	27
4.1.5 Ensayo en laboratorio	28
4.2. Ejecución de ensayos	28
4.2.1 Generalidades	28
4.2.2 Contratistas.....	28
4.2.3 Tipo de hormigón.....	28
4.2.4 Modelo utilizado	29
4.2.5 Instrumentación in-situ.....	34
4.2.6 Extracción de testigos.....	40
4.2.7 Ensayo de testigos	40
4.2.8 Cronograma de instrumentaciones y ensayos.....	40
CAPITULO 5: RESULTADOS	43
5.1 Instrumentaciones	43
5.1.1 Perfil de temperaturas.....	43
5.1.2 Seguimiento Madurez	49
5.2 Evaluación de resistencia a través del método de madurez.....	55
5.2.1 Madurez Objetivo.....	55
5.2.2 Tiempos medidos para alcanzar resistencia objetivo	56
5.3 Evaluación de resistencia a través de testigos	57
5.3.1 Contratista 1	57
5.3.2 Contratista 2	58
5.4 Evaluación comparativa con testigos de concreto	58

5.4.1 Contratista 1	58
5.4.2 Contratista 2	59
5.5 Análisis de resultados	60
CAPITULO 6: COMENTARIOS Y CONCLUSIONES	62
6.1 Uso del método de madurez en pavimentos urbanos de hormigón	62
6.2 Consideraciones para la implementación del método	63
6.3 Continuidad de estudios	65
GLOSARIO DE TÉRMINOS	66
BIBLIOGRAFIA	68
ANEXO 1	70
DATOS CONFECCION CURVA MADUREZ-RESISTENCIA	70
1.1 Contratista 1	70
1.1.1 Datos Madurez.....	70
1.1.2 Datos Resistencia a compresión.....	75
1.2 Contratista 2	75
1.2.1 Datos Madurez.....	75
1.2.2 Datos Resistencia a compresión.....	80
ANEXO 2	81
DATOS INSTRUMENTACIONES	81
2.1 Contratista 1	81
2.1.1 Datos Madurez.....	81
2.2 Contratista 2	90
2.2.1 Datos Madurez.....	90

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: <i>Resultados caracterización Contratista 1</i>	30
Tabla 2: <i>Resultados caracterización Contratista 2</i>	31
Tabla 3: <i>Tiempo en que se alcanza resistencia objetivo Contratista 1</i>	56
Tabla 4: <i>Tiempo en que se alcanza resistencia objetivo Contratista 2</i>	57
Tabla 5: <i>Resultados ensayo de compresión testigos Contratista 1</i>	57
Tabla 6: <i>Resultados ensayo de compresión testigos Contratista 2</i>	58
Tabla 7: <i>Comparativo resistencias Contratista 1</i>	58
Tabla 8: <i>Comparativo resistencias Contratista 2</i>	59
Tabla 9: <i>Datos madurez Contratista 1</i>	70
Tabla 10: <i>Resultados Compresión cilindros Contratista 1</i>	75
Tabla 11: <i>Datos madurez Contratista 2</i>	75
Tabla 12: <i>Resultados Compresión cilindros Contratista 2</i>	80
Tabla 13: <i>Datos Instrumentación I01 Contratista 1</i>	81
Tabla 14: <i>Datos Instrumentación I02 Contratista 1</i>	83
Tabla 15: <i>Datos Instrumentación I03 Contratista 1</i>	85
Tabla 16: <i>Datos Instrumentación I04 Contratista 1</i>	86
Tabla 17: <i>Datos Instrumentación I05 Contratista 1</i>	88
Tabla 18: <i>Datos Instrumentación C01 Contratista 2</i>	90
Tabla 19: <i>Datos Instrumentación C02 Contratista 2</i>	91
Tabla 20: <i>Datos Instrumentación C03 Contratista 2</i>	92
Tabla 21: <i>Datos Instrumentación C04 Contratista 2</i>	93
Tabla 22: <i>Datos Instrumentación C05 Contratista 2</i>	95
Tabla 23: <i>Datos Instrumentación C06 Contratista 2</i>	96

INDICE DE GRAFICOS

Gráfico 1: <i>Dispersión de datos madurez-resistencia Contratista 1</i>	31
Gráfico 2: <i>Dispersión de datos madurez-resistencia Contratista 2</i>	32
Gráfico 3: <i>Curva de Madurez versus Resistencia para Contratista 1</i>	32
Gráfico 4: <i>Curva de Madurez versus Resistencia para Contratista 2</i>	33
Gráfico 5: <i>Perfil de Temperaturas Instrumentación 01 Contratista 1</i>	44
Gráfico 6: <i>Perfil de Temperaturas Instrumentación 02 Contratista 1</i>	44
Gráfico 7: <i>Perfil de Temperaturas Instrumentación 03 Contratista 1</i>	45
Gráfico 8: <i>Perfil de Temperaturas Instrumentación 04 Contratista 1</i>	45
Gráfico 9: <i>Perfil de Temperaturas Instrumentación 05 Contratista 1</i>	46
Gráfico 10: <i>Perfil de Temperaturas Instrumentación 01 Contratista 2</i>	46
Gráfico 11: <i>Perfil de Temperaturas Instrumentación 02 Contratista 2</i>	47
Gráfico 12: <i>Perfil de Temperaturas Instrumentación 03 Contratista 2</i>	47
Gráfico 13: <i>Perfil de Temperaturas Instrumentación 04 Contratista 2</i>	48
Gráfico 14: <i>Perfil de Temperaturas Instrumentación 05 Contratista 2</i>	48
Gráfico 15: <i>Perfil de Temperaturas Instrumentación 06 Contratista 2</i>	49
Gráfico 16: <i>Seguimiento Madurez Instrumentación 01 Contratista 1</i>	49
Gráfico 17: <i>Seguimiento Madurez Instrumentación 02 Contratista 1</i>	50
Gráfico 18: <i>Seguimiento Madurez Instrumentación 03 Contratista 1</i>	50
Gráfico 19: <i>Seguimiento Madurez Instrumentación 04 Contratista 1</i>	51
Gráfico 20: <i>Seguimiento Madurez Instrumentación 05 Contratista 1</i>	51
Gráfico 21: <i>Seguimiento Madurez Instrumentación 01 Contratista 2</i>	52
Gráfico 22: <i>Seguimiento Madurez Instrumentación 02 Contratista 2</i>	52
Gráfico 23: <i>Seguimiento Madurez Instrumentación 03 Contratista 2</i>	53
Gráfico 24: <i>Seguimiento Madurez Instrumentación 04 Contratista 2</i>	53
Gráfico 25: <i>Seguimiento Madurez Instrumentación 05 Contratista 2</i>	54
Gráfico 26: <i>Seguimiento Madurez Instrumentación 06 Contratista 2</i>	54
Gráfico 27: <i>Madurez Objetivo Contratista 1</i>	55
Gráfico 28: <i>Madurez Objetivo Contratista 2</i>	56
Gráfico 29: <i>Comparativo resistencias Madurez vs Testigos</i>	59

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: <i>Concepto de Madurez</i>	14
Figura 2: <i>Modelo de Nurse-Saul</i>	15
Figura 3: <i>Sensor de madurez (data logger)</i>	21
Figura 4: <i>Sensor de madurez inalámbrico</i>	22
Figura 5: <i>Dispositivo Intellirock, y conexión con sensor</i>	22
Figura 6: <i>Posición terminales Sensor Instrumentación I01</i>	34
Figura 7: <i>Posición terminales Sensor Instrumentación I02</i>	35
Figura 8: <i>Posición terminales Sensor Instrumentación I03</i>	35
Figura 9: <i>Posición terminales Sensor Instrumentación I04</i>	36
Figura 10: <i>Posición terminales Sensor Instrumentación I05</i>	36
Figura 11: <i>Colocación y Posición terminales Sensor Instrumentación C01</i>	37
Figura 12: <i>Colocación y Posición terminales Sensor Instrumentación C02</i>	37
Figura 13: <i>Colocación y Posición terminales Sensor Instrumentación C03</i>	38
Figura 14: <i>Posición terminales Sensor Instrumentación C04</i>	38
Figura 15: <i>Posición terminales Sensor Instrumentación C05</i>	39
Figura 16: <i>Colocación y Posición terminales Sensor Instrumentación C06</i>	39
Figura 17: <i>Extracción de testigos sensor instrumentación C01</i>	40
Figura 18: <i>Cronograma de instrumentaciones y ensayos Contratista 1</i>	41
Figura 19: <i>Cronograma de instrumentaciones y ensayos Contratista 2</i>	42

CAPITULO 1: INTRODUCCION

1.1 Descripción General

La infraestructura vial de un país, tanto urbana como interurbana, es un factor fundamental para su progreso, crecimiento productivo y adecuada calidad de vida de sus habitantes, otorga conectividad terrestre para transporte de personas y de carga, permitiendo realizar actividades productivas, de servicios, distracción y turística.

La red vial interurbana de Chile, en el año 2019 poseía cerca de 86.000 km enrolados, de los cuales aproximadamente 20.000 Km se encontraban pavimentados [1].

En la década de los 80, cerca del 80% de las rutas importantes de la red vial del país eran construidas en base a hormigón, convirtiendo a Chile en un referente en el tema de hormigón para pavimentos, generando información que se utilizó para mejorar métodos de diseños y base de datos para la industria mundial, pero en el inicio de la década del 2000, la situación cambió, incrementándose el uso de asfalto para la pavimentación de la red vial interurbana sobre el uso de hormigón.

Para ese entonces, la construcción de un pavimento de asfalto tenía menor costo que uno de hormigón, pero no así el costo de mantención. Dado lo primero, los proyectos tendieron a darle mayor importancia al valor inicial del proceso constructivo que al ciclo de vida y posteriores mantenciones. Situación que cambió para el 2005, tanto por los conflictos mundiales (Guerra en el Medio Oriente) como al mayor consumo de hidrocarburos de las grandes potencias (China e India), aumentando el costo de los combustibles y los derivados del petróleo, derivando a que la construcción de pavimentos de asfalto se encareciera, y la construcción de pavimentos de hormigón volviera a tomar importancia.

En lo que se refiere a pavimentos urbanos, a nivel país la tendencia es el uso de asfalto, pero en la Región Metropolitana la construcción con hormigón ha aumentado debido a la implementación gradual de la Red Metropolitana de Movilidad. Producto de que tanto la frecuencia como la regularidad de buses han ido aumentando significativamente, ha generado a que los buses mayoritariamente articulados provoquen daños considerables en las vías de circulación construidas en base a asfalto. Es por esto que las vías del tipo Troncal o corredores se han ido reconstruyendo en base a hormigón.

Frente a este contexto, ha sido necesario optimizar las metodologías de diseño del hormigón, así también como el aumento de tecnología aplicada, para mejorar la competitividad económica del hormigón frente al asfalto [2], tanto en la construcción como en su mantenimiento.

Esta optimización e innovación no sólo han aportado a la reducción de costos de construcción, también ha generado un aumento en la velocidad con la que se realizan los procesos constructivos. Y es aquí, donde es necesario conocer el comportamiento de la resistencia del hormigón, principalmente a edades tempranas, de manera de asegurar el cumplimiento de las especificaciones requeridas por el proyecto y las normas vigentes.

Actualmente, la normativa chilena establece como metodología de control de resistencia mecánica de hormigón, la rotura de probetas, ya sea por resistencia a la compresión o a la flexo-tracción, de acuerdo al parámetro de aceptación que se requiera, utilizando muestras de hormigón en estado fresco, mediante ensayos de probetas en laboratorio, controlando la resistencia potencial del hormigón colocado en la estructura respecto a la resistencia especificada para cada tipo de proyecto.

Estas probetas, son sometidas a condiciones ideales de temperatura y humedad, poseen diferente geometría que el elemento hormigonado, su volumen es pequeño pero con mayor área superficial, por lo cual retienen poco calor en comparación al elemento hormigonado y es así que se producen evoluciones de resistencia distintas. Debido a esto, los valores de resistencia obtenidos (resistencia potencial) varían en función a la resistencia real de la estructura, siendo estos resultados no representativos de las condiciones reales a las cuales está sometida la estructura

Otro método utilizado corresponde a la determinación de la resistencia por medio de la extracción de testigos, que si bien muestra las condiciones reales a las cuales está sometido el hormigón, es un procedimiento destructivo. Además, las recomendaciones de la norma chilena consideran que el tiempo entre extracción y ensayo de estos es de 5 a 7 días, lo que lo hace un procedimiento de difícil ejecución para proyectos en que estos resultados se requieran a edades tempranas. [3] [4]

Es por esta razón que es necesario un método no destructivo, predictivo y práctico más eficiente para obtener la resistencia del hormigón a edades tempranas y que sea representativo de las condiciones reales de la obra. Un método adecuado a utilizar puede ser el Método de Madurez

El método de Madurez, estudia el efecto del historial de temperatura interna del hormigón producto de la mezcla de sus materiales y la influencia de la temperatura ambiente sobre la resistencia del hormigón. El método de Madurez permite estimar la resistencia in situ del hormigón, mediante una relación única entre el índice de madurez y el desarrollo de resistencia del hormigón, utilizando dispositivos de registro de temperatura. Su uso es específico para una mezcla de hormigón, por ello, cada vez que cambie alguna proporción de sus materiales, se debe desarrollar una nueva relación entre el índice de madurez y resistencia.

El método de Madurez permite estimar cuando la resistencia in situ del hormigón ha alcanzado la resistencia de diseño, permitiendo que los procesos de construcción se programen de una manera más eficiente.

En el caso particular de pavimentos de hormigón, la resistencia puede ser evaluada mediante vigas ensayadas a flexo-tracción y/o testigos de hormigón endurecido ensayados a compresión, en ambos casos la duración para obtener los resultados de los ensayos es extensa, llegando hasta los 28 días. El hormigón utilizado en este tipo de proyectos en general, son potenciados por las premezcladoras, es decir varían las características del hormigón, obteniendo como resultado un incremento de la resistencia desde edades tempranas, esto para garantizar que se llegue a la resistencia operacional al ser pavimentos urbanos tipo SERVIU. Sin embargo esta mejora en el aumento de la resistencia es desaprovechada al esperar los tiempos usuales de los controles que se realizan, es decir, esperar la obtención de resultados a 28 días para la recepción final del proyecto.

El presente trabajo de Título estudia la aplicación del concepto de madurez del hormigón a pavimentos urbanos tipo SERVIU, a partir de la experiencia y resultados obtenidos en un proyecto de pavimentación urbana en Santiago, de manera de validar el uso y concepto de madurez como método complementario a los métodos de aceptación del proyecto, y en consecuencia aportar a la hora de tomar decisiones con rapidez, como la apertura a tránsito, optimizando así los tiempos de trabajo. Se explican los procedimientos para obtener la madurez y determinar la relación con la resistencia del hormigón de acuerdo a revisión bibliográfica del tema, el proceso de monitoreo de dispositivos para registrar los datos y evolución de la temperatura, se exponen los resultados obtenidos y análisis de tiempos de obtención de resistencia especificada, de acuerdo al hormigón utilizado. Finalmente, se realiza una comparación de resultados mediante el ensayo de testigos, extraídos en los distintos sectores de los pavimentos instrumentados, con el objeto de validar el método.

1.2 Descripción de la investigación

El interés y enfoque por implementar el método de madurez ha sido adoptado por el Ministerio de Obras Públicas (MOP), en sus contratos de pavimentos de hormigón interurbanos, lo cual ha generado importantes ahorros en los tiempos de puesta en marcha y en la flexibilidad de la construcción. En el contexto de vías urbanas, la introducción de esta metodología ha sido más lenta [5].

Es por ello que, en común acuerdo con el Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile (ICH) y en conjunto con el Servicio de Vivienda y Urbanismo Metropolitano (SERVIU), se desarrolló una experiencia práctica de un proyecto de pavimentación urbano de hormigón del SERVIU Metropolitano.

El proyecto en el cual se tomaron datos, corresponde a la pavimentación del Corredor Vicuña Mackenna, que en su totalidad se extiende entre Av. Matta por el Norte y Vicente Valdés por el Sur, donde se intervinieron cerca 8,4 kilómetros, en ansias de mejorar la conectividad y accesibilidad intercomunal, aumentando los promedios actuales de viaje de los buses [6]. Beneficiando así, a 60 mil usuarios del transporte público de superficie diariamente con esta infraestructura, dedicada al transporte público, incluida en el Plan de mejoramiento de Transantiago.

De esta manera, y en coordinación con los dos contratistas participantes del proyecto, y sus respectivas empresas proveedoras de hormigón, además del Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación de Estructuras y Materiales (IDIEM) de la Universidad de Chile, se desarrollaron las actividades necesarias para la implementación del método de madurez, la extracción de testigos a distintas edades y los ensayos de laboratorio correspondientes.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

El objetivo del estudio es evaluar y validar el método de madurez en pavimentos urbanos de hormigón tipo SERVIU, como método complementario a los métodos de aceptación de este tipo de proyectos.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Obtener curvas características de Madurez-Resistencia para el hormigón a utilizar.
- Estimar in-situ y en tiempos reales el índice de madurez a edades tempranas y resistencia a compresión para un pavimento urbano de hormigón.
- Establecer si, por medio del método de Madurez del hormigón es posible determinar la resistencia óptima en el cual el hormigón está apto para la apertura rápida a tránsito en un proyecto de pavimentación urbano.

1.4 Metodología

El desarrollo de este trabajo de título contempla las siguientes etapas:

- a. Revisión bibliográfica orientada a la recopilación de antecedentes. Correspondiente a la revisión de normas nacionales e internacionales, papers sobre el método de madurez, y diversos textos referentes al tema.
- b. Caracterización de hormigones. Obtener las respectivas curvas de Madurez – Resistencia del proveedor de hormigón, de cada contratista involucrado en la experiencia.
- c. Instrumentación in-situ. Ubicación de los sensores en los distintos sectores de medición.

- d. Monitoreo de datos. Monitoreo de la resistencia desarrollada mediante el método de madurez en los distintos sectores que se encuentran ubicados los sensores.
- e. Extracción de testigos y ensayo en laboratorio. Extracción de dos testigos a distintas edades, en los distintos sectores que se encuentran ubicados los sensores. Ensayos de testigos en laboratorio.
- f. Análisis y validación de resultados
 - i. Evaluación de la resistencia a través de la madurez: Mediante los datos de temperatura obtenidos in situ, se determina la resistencia para cada uno de los sectores instrumentados, utilizando la curva de madurez correspondiente, realizando comparación con la resistencia especificada de cada hormigón.
 - ii. Evaluación de la resistencia a través de testigos: Mediante los resultados de ensayo de testigos, se analizan diferencias entre los métodos para verificar y validar el método de madurez.
- g. Comentarios y conclusiones.

CAPITULO 2: ANTECEDENTES GENERALES

2.1 Antecedentes

El hormigón es el material de construcción fundamental con el cual se diseñan y elaboran diversos proyectos de construcción para el desarrollo de ciudades y su infraestructura, como son edificios, carreteras, represas hidráulicas, etc. Es una mezcla heterogénea, compuesta por un material aglomerante (cemento), agregados inertes (áridos), agua y eventualmente aditivos y/o adiciones. Estos materiales, debidamente dosificados y mezclados, permiten al hormigón desarrollar sus propiedades por hidratación del cemento, proporcionando resistencia y durabilidad a las estructuras [7].

Se presentan dos estados esenciales de esta mezcla, el estado plástico o fresco (inicial), y el estado endurecido (final). El hormigón fresco posee propiedades relevantes como: trabajabilidad, consistencia, homogeneidad, masa específica o densidad; mientras que entre las propiedades más importantes en el hormigón endurecido se tiene: permeabilidad, dureza, retracción, velocidad de fraguado y resistencia a los esfuerzos de compresión, tracción, y flexión. [8]

2.1.1 Diseño de pavimentos

Para el diseño de pavimentos de hormigón o pavimentos rígidos, se utilizan teorías basadas en la resistencia a la flexo-tracción, debido a que, en el caso ideal, cuando una carga actúa sobre el centro de la losa, se produce una flexión de la misma de manera que los máximos esfuerzos se localizan en la cara inferior de ella.

2.1.2 Ensayos control de calidad

El ensayo de resistencia a la flexo-tracción de vigas o probetas prismáticas (150x150x530 mm) se utiliza como control de calidad, de acuerdo a las consideraciones de ensayo establecidas por NCH1038:77 Hormigón – Ensayo de tracción por flexión. Además, en el Manual de Pavimentación y Aguas Lluvias, del Servicio de Vivienda y Urbanismo (SERVIU), del año 2008, se estipula que deberán ejecutarse la extracción de testigos para determinar el espesor de pavimento y la resistencia a compresión a los 28 días. Teniendo este último resultado, se obtiene la resistencia característica a flexo-tracción, utilizando el valor de conversión 7,8 indicado por el manual [9]. Adicionalmente, el SERVIU de la Región Metropolitana dio a conocer la versión actualizada del Manual de Pavimentación y Aguas Lluvias (año 2020), rectificando capítulos e introduciendo nuevos conceptos, debido a las modificaciones a la normativa vigente, estableciendo que la resistencia del hormigón para pavimentos se controlará a la compresión cilíndrica teniendo en cuenta que el Grado de Hormigón para vías del tipo Expresa, Troncal y Colectora es G35. [10]

2.1.3 Dificultades ensayo Flexo-tracción

En particular, existen una serie de dificultades en el momento de la evaluación para este ensayo, como por ejemplo:

- Son extremadamente sensibles a la preparación, manipulación y procedimiento de curado.
- Las vigas son muy pesadas, llegan a pesar entre 26-30 kg (sin contar el peso del molde utilizado, el cual alcanza un valor entre 35-40 kg), lo que dificulta su transporte, y es necesario de una mayor cantidad de técnicos en obra, esto encarece los costos de control de calidad.
- Son susceptibles a ser dañadas cuando se manipulan y transportan desde el lugar de la obra hasta el laboratorio, donde serán ensayadas.
- Realizar el ensayo a la flexión, en condiciones secas arroja un resultado más bajo. Las vigas deben ser bien curadas y deben ser ensayadas en condiciones húmedas.
- Considerando los diversos inconvenientes experimentales, existe una elevada variabilidad de los resultados de los ensayos de resistencia a flexo-tracción.

En muchos proyectos viales con pavimentos de hormigón se recurre al ensayo de resistencia a la flexo-tracción, pero debido a las dificultades mencionadas y al hecho de que tanto la tipificación habitual para hormigones como el control de calidad en obra se basan en la resistencia a compresión, el cual es un ensayo más sencillo y menos costoso, la tendencia ahora es migrar hacia el ensayo de resistencia a compresión y así poder calificar la calidad de los pavimentos de hormigón, mediante la correlación entre compresión y flexo-tracción, o mediante la actualización de la normativa vigente que establece que la resistencia del hormigón para pavimentos se controlará a la compresión cilíndrica.

2.2 Resistencia a la compresión del hormigón

La resistencia a la compresión, es la característica mecánica principal del hormigón, utilizando sus valores como parámetro para diseño de diversas estructuras. La resistencia del hormigón se encuentra influenciada por muchos factores tanto internos como externos, como por ejemplo:

- a) Relación o razón agua-cemento (A/C): factor de gran influencia, tanto en la porosidad de la pasta de cemento. Por lo tanto, cuanto la relación agua/cemento es alta, hay mayor porosidad, lo que vuelve la matriz de la pasta de cemento más débil y se obtienen un hormigón menos resistente. En cambio a menor razón A/C, se obtiene un hormigón de mayor resistencia, siendo directamente relacionada con la calidad y la cantidad de cemento presente. [11]
- b) Contenido de cemento: La proporción y características del cemento dentro de la mezcla tienen una gran influencia en la resistencia del hormigón a cualquier edad. Es así como a mayor contenido de cemento se puede obtener una mayor resistencia y a menor contenido la resistencia del hormigón va a ser menor.
- c) Curado del hormigón: El proceso de curado tiene como función principal evitar la pérdida de agua necesaria para el fraguado de la mezcla de hormigón, brindándole condiciones adecuadas de humedad y temperatura, de manera que permita al hormigón desarrollar las propiedades de resistencia y durabilidad para las que ha sido diseñado
- d) Temperatura ambiente: influye aumentando la temperatura interna del hormigón, la cual puede generar diversos problemas de desarrollo de resistencia a edades tempranas y posteriores, si no se tienen los cuidados e inspecciones adecuadas.

Es así, que una vez realizada la mezcla de hormigón, el cemento y el agua entran en contacto produciendo varias reacciones químicas, lo cual provoca el fraguado y endurecimiento de la mezcla. Mientras ocurren estas reacciones dependen de muchos factores, entre ellos la temperatura que experimenta el hormigón debido a la hidratación del cemento, dado que la hidratación es un proceso exotérmico, provocando el aumento de temperatura interna del hormigón durante el fraguado y endurecimiento. La temperatura es una variable muy influyente no sólo sobre la tasa de evaporación del agua de mezclado, sino también, sobre las características físicas de los agregados y la velocidad de hidratación del cemento.

Dicha velocidad de hidratación del cemento aumenta de manera proporcional con la temperatura, por lo tanto, la resistencia del hormigón se ve afectada por la velocidad de hidratación, ya que aumenta con la edad, pero depende de las condiciones de humedad y temperatura dentro del mismo. He ahí la importancia del curado en forma continua desde que el hormigón es colocado hasta que alcance la resistencia requerida.

Con todo lo descrito se observa que la resistencia del hormigón no sólo depende de sus componentes sino también del entorno en el que se encuentra y es proporcional a la hidratación del cemento, la cual se ve influenciada por la relación agua/cemento de la mezcla, el tipo de curado y de las condiciones ambientales.

Al diseñar un hormigón, se espera obtener un desempeño mecánico deseado, tomando en cuenta varios aspectos, como los ya mencionados, relación agua/cemento, tamaño máximo del agregado, humedad, así también el asentamiento requerido, absorción de los agregados, etc., este diseño es empírico por lo cual en obra debe hacerse un seguimiento acabado, requiriendo cierto número de muestras que se ensayaran a edades establecidas.

Comúnmente, la resistencia a la compresión se evalúa a través de ensayos directos de probetas moldeadas. Estas probetas, que son sometidas a ensayo y control de calidad, se elaboran y curan cumpliendo los requerimientos y procedimientos indicados en la norma chilena NCh1037:2009 “Hormigón – Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas”, es decir, son mantenidas en condiciones controladas hasta la edad de ensayo.

En los proyectos de construcción, se toman muestras cada cierta frecuencia de hormigonado, obteniendo los resultados, normalmente, a 7 y 28 días. Es decir, se debe esperar esta cantidad de días para obtener los resultados de ensayos de resistencia, de manera de asegurarse que el hormigón haya alcanzado la resistencia necesaria para continuar con las actividades de construcción en donde se encuentre el hormigón de la muestra ensayada.

También es posible obtener la resistencia del hormigón mediante la extracción de testigos, cuando sea necesario o se indique en las especificaciones del proyecto; este es un método destructivo, siendo muy importante determinar el lugar correcto de extracción de los testigos. Los requerimientos y procedimientos se encuentran en las normas: NCh1171/1:2012 “Hormigón – Testigos de hormigón endurecido – Parte 1: Extracción y ensayo” y NCh1171/2 “Hormigón – Testigos de hormigón endurecido – Parte 2: Evaluación de resultados de resistencia mecánica”.

Pero al igual que las muestras de hormigón fresco, es necesario mantener a los testigos en condiciones ideales de laboratorio, además de realizar actividades previas (inspección visual, mediciones geométricas, corte, esbeltez, planeidad en sus caras) de modo prepararlos para ser ensayados entre los 5 y 7 días siguientes a la fecha de extracción, o en caso contrario a las edades establecidas entre las partes involucradas [3]. Es decir, se debe esperar un tiempo para obtener los resultados y luego evaluar la resistencia obtenida, determinando así, el proceso a seguir en el elemento que fue extraído el testigo, que en el caso más desfavorable puede ser la destrucción del mismo.

Es entonces que cabe recalcar la necesidad de determinar la resistencia real a compresión de hormigón en una estructura con mayor confiabilidad, es aquí donde entra el método de madurez. Este método, puede indicar directamente la resistencia en el lugar, se podrá conocer la resistencia en tiempo real, inclusive a una edad temprana, dado que la madurez puede leerse continuamente.

2.3 Método de madurez del hormigón

2.3.1 Antecedentes Históricos [12]

El método de la madurez es una técnica que se remonta a estudios realizados por investigadores ingleses a fines de la década de los años 40 y principios de los años 50; por McIntosh (1949) sobre los métodos de curado acelerado; Nurse, 1949 y Saul, 1951. Donde se identificó la gran influencia de la temperatura sobre la evolución de la resistencia del hormigón. Durante esa época se dedujo que la temperatura del hormigón estaba directamente relacionada con la cantidad de hidratos que se generan en la hidratación del cemento y estos, a su vez, con la resistencia del mismo. De esta forma aparece el concepto de madurez que se funda en el historial de temperaturas internas del hormigón; este concepto utiliza el principio de que la resistencia del hormigón está directamente relacionada con la edad y el desarrollo de su temperatura, desde el inicio de la medición hasta el tiempo para el cual se desea estimar dicha resistencia.

Posteriormente, en los años sesenta, investigadores daneses del Instituto de Tecnología de Dinamarca, P. Fresleben, Hansen y J. Pedersen, realizaron un modelo matemático y termodinámico en el que relacionaban la resistencia y la madurez del hormigón. Un modelo que resultaba más conveniente que los métodos que se utilizaban anteriormente, entendiéndose como madurez del hormigón la velocidad con la que se hidrata el cemento, proceso mediante el cual este componente se convierte en el agente aglomerante de la mezcla.

Luego, el método de madurez tomó mayor profundización a causa de un derrumbamiento progresivo en un segmento de un edificio de varios niveles en construcción, en el condado de Fairfax, Virginia, Estados Unidos, ocurrido el 2 de marzo de 1973. Producto de este suceso, fallecieron 14 obreros y 34 resultaron heridos. Fue entonces cuando el Departamento Nacional de Estándares (NBS, National Bureau of Standards) solicitó a la Administración Ocupacional de la Seguridad y Sanidad (OSHA, Occupational Safety and Health Administration) asistencia técnica para determinar la causa del colapso de la estructura.

El reporte concluyó, que la causa más probable del colapso fue el descimbre prematuro, presentando esfuerzos de corte que excedían la capacidad de soporte del hormigón, el cual se cree que tenía una edad de cuatro días. Durante este periodo, la temperatura promedio, era de aproximadamente 7 °C. Los investigadores se encontraron con dificultades para realizar una estimación confiable de la resistencia del hormigón en obra, a la hora del colapso, dado que a bajas temperaturas el hormigón adquiere resistencia lentamente. Esto, incrementó el interés sobre el concepto, en ese entonces innovador, de determinación de la resistencia del hormigón in-situ, por medio del método de madurez, sometido a condiciones de temperaturas variables.

Más tarde, ocurrió otro incidente, a causa de un desplome en la construcción de una torre de enfriamiento en la Isla de Willow, Virginia Occidental, Estados Unidos, el 27 de abril de 1978, 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 poca resistencia del hormigón para soportar las cargas aplicadas durante la construcción. En el momento de la falla, el hormigón tan sólo tenía un día de edad y había sido expuesto a una temperatura ambiente promedio menor a los 10 °C.

Esta falla convenció los investigadores del NBS que era urgente la necesidad de estándares para estimar la resistencia del concreto in-situ durante las construcciones. Fue entonces que el equipo de NBS comenzó con el estudio profundo del método de madurez. Las investigaciones de NBS propusieron las bases para el desarrollo del primer estándar en el mundo en la aplicación del método de madurez. Como resultado, la NBS identificó el método de la madurez como una alternativa viable para estimar la resistencia del hormigón sometido a diferentes temperaturas de curado. Esto, a su vez, condujo a la creación de la primera norma en el mundo (American Society for Testing and Materials, ASTM C1074) en 1987 para estimar la resistencia del concreto a través del método de madurez.

Todo este avance tuvo lugar gracias a las investigaciones en las Universidades de Wisconsin, Iowa, Otawa y China, realizadas por Malhotra, Carino, Cornell y Guo Cheng Juo, respectivamente, entre otras, las cuales han permitido corroborar la importancia del concepto de madurez y control térmico en la planeación y desarrollo racional de proyectos de construcción.

En la actualidad, el método de madurez es muy utilizado en la industria de la construcción, en múltiples aplicaciones e investigaciones a nivel mundial entre las que destacan:

- El control de Pavimentos de hormigones en el Estado de Iowa, Michigan, Indiana, Texas, New York y Washington en los Estados Unidos desde 1989.

- Control del hormigón en construcción de líneas del metro de Kioto y la reconstrucción en Kobe, Japón desde 1990 (Aoki construction).

- Reconstrucción del puente Webbers Falls en Oklahoma. El Puente Webbers, sobre el río Arkansas, el cual se derrumbó el 26 de mayo de 2002 después de ser golpeado por una embarcación. El puente fue reconstruido y reabierto al tráfico el 29 julio, a sólo 47 días después del episodio. El método de madurez jugó un papel fundamental en medir el tiempo de remoción del encofrado para columnas de soporte y otros elementos de la subestructura. En algunos casos, el desencofrado era posible en un tiempo de tan sólo 13 horas.

2.3.2 Aplicación Técnica

El método de madurez tiene particulares ventajas frente a otros métodos para estimar la resistencia de hormigón en obra. Los demás métodos, tanto los destructivos como los no destructivos, presentan ciertos inconvenientes:

- En el caso de los métodos destructivos muchos de ellos no pueden ser usados en obra cuando el hormigón se encuentra a temprana edad, lo cual no es muy factible tomando en consideración que en una obra mientras más rápido se pueda estimar la resistencia de la estructura, más rápido se podrá poner en servicio.
- Para los métodos no destructivos, uno de los principales inconvenientes es que los especímenes recuperados por los laboratorios son mantenidos bajo condiciones ideales, a una temperatura y humedad constante, lo cual al final no será capaz de entregar datos cien por ciento reales, sino que por el contrario, estos resultados difieren a los que se obtienen realmente en obra y su objetivo es diferente.

Una interesante ventaja frente a los demás métodos, es que el método de madurez trabaja con el perfil de temperaturas real de la estructura de hormigón a la hora de estimar la resistencia, esto optimiza el proceso de construcción gracias a una información de resistencias más precisas en tiempo real, permitiendo mejorar la productividad en obra; de la misma manera es aplicable a nuevos métodos de sistemas constructivos y a la producción de elementos prefabricados. Sólo por dar un ejemplo, los resultados más precisos que ofrece el método de madurez permiten entre otras cosas programar con gran precisión el momento indicado para trabajos críticos tales como el desencofrado, pos-tensado, corte de juntas en el caso de pavimentos, apertura al tráfico, retiro de protecciones en clima frío, izaje, etc.

2.3.3 Experiencia en Chile

Se considera que el uso del método de madurez en Chile, fue realizado por primera vez en el año 1981 en la Central Antuco, debido a la necesidad de acelerar el desmolde del recubrimiento de túneles, reduciendo los costos de construcción en aproximadamente US\$2.000.000. [2][13]

Posteriormente se utilizó en la construcción de dovelas de la línea 5 del Metro de Santiago, desmoldando a 16 hr de colocado el hormigón. También es utilizado en proyectos de centrales hidroeléctricas y proyectos mineros [13].

La Dirección de Vialidad en conjunto con el Ministerio de Obras Públicas (MOP), detectaron la oportunidad del uso del método de madurez para agilizar la apertura a tránsito en los contratos de pavimentación de hormigón y es así que, a partir de agosto del año 2012, entra en vigencia el Instructivo de Nuevas Tecnologías y Especificaciones Técnicas de Pavimentos de Hormigón de la Dirección de Vialidad (ORD N° 9371), en el cual en el Anexo 3, define el concepto de madurez y el

procedimiento a seguir. Uno de los primeros proyectos donde se indica en sus bases, que el control de resistencias en los pavimentos de hormigón debe ser por el método de madurez es el contrato de Reposición Ruta 60-CH sector Juncal-Portillo, ubicado en la provincia de Los Andes, Región de Valparaíso del 2013 [14].

Luego, en la actualización de la Norma NCh170: “Hormigón requisitos generales” del año 2016, se incorpora el concepto de madurez, incorporando criterios para el desmolde y descimbre temprano de elementos estructurales de hormigón

Durante los años 2017 y 2018, el Ministerio de Vivienda y Urbanismo se encontraba en revisión el anteproyecto de norma “Hormigón - Estimación de la Resistencia Mecánica Método de la Madurez”, que es una adaptación de la norma norteamericana ASTM 1074. Actualmente, la norma se encuentra aprobada y vigente con la nomenclatura NCh3565:2018.

A la fecha, se ha adoptado el uso del método de madurez por parte del MOP en sus contratos de pavimento de hormigón, con resultados satisfactorios, generando ahorro en los tiempos de puesta en marcha, y además otorgando una flexibilidad en la construcción [15].

CAPITULO 3: MARCO TEORICO

3.1 Concepto de Madurez del Hormigón

El concepto de madurez del hormigón está fundamentado, en que la resistencia del hormigón se encuentra directamente relacionada a la edad y temperatura que experimenta. El método de madurez, provee una aproximación relativamente simple para estimar la resistencia a compresión del hormigón a edad temprana in-situ, basado en el historial de temperatura del elemento hormigonado durante el tiempo de curado, para un determinado diseño de mezcla.

El supuesto en el método de madurez, asume que dos muestras de hormigón, de un mismo diseño de mezcla, que poseen la misma madurez, tendrán la misma resistencia, a pesar de que cada una puede haber sido expuesta a condiciones diferentes de curado. Lo anterior se expone en la figura 1, donde se puede observar dos muestras, en el caso de bajas temperaturas toma más tiempo que en el caso de altas temperaturas para alcanzar la madurez. En este caso $M1 = M2$ y, de acuerdo al principio que asume este método, en ese instante las dos muestras poseen la misma resistencia, aun cuando hayan sido sometidas a temperaturas de curado distintas en el tiempo.

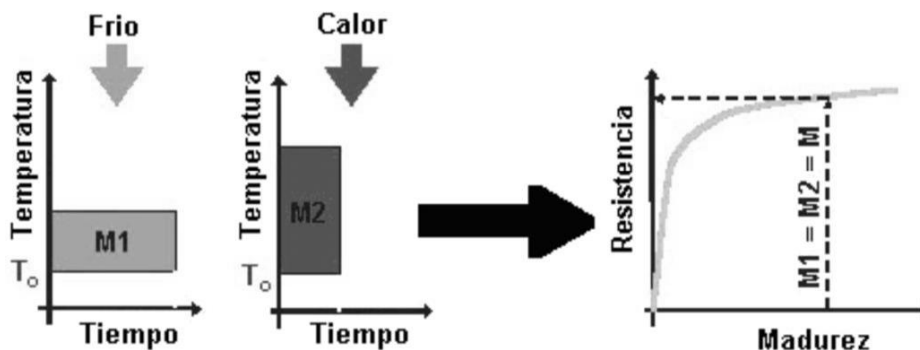


Figura 1: Concepto de Madurez. [165]

3.2 Modelos para determinar la madurez del hormigón

Desde las primeras investigaciones, realizadas a partir de la década de los 40, se han propuesto numerosas funciones de madurez. Estos estudios, partieron investigando un procedimiento que explicara los efectos combinados del tiempo y temperatura sobre el desarrollo de resistencia bajo temperaturas de curado elevadas

A continuación, se revisan algunos de los modelos propuestos para determinar la madurez del hormigón.

3.2.1 Modelo de Nurse-Saul

La función de madurez de Nurse-Saul fue desarrollada en 1951, y toma los conceptos propuestos por McIntosh, quien fue el primero en notar que el desarrollo de la resistencia a compresión del hormigón se encuentra relacionada con el tiempo de curado y su historial de temperatura, luego de realizar investigaciones sobre los efectos de curado de vapor en el desarrollo de la resistencia. Nurse y Saul proponen el siguiente modelo para calcular la madurez, que se basa en una sumatoria acumulada del producto de la temperatura y el tiempo, respecto a una temperatura datum T_0 :

$$M = \sum (T_a - T_0)\Delta t \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

M = Madurez del hormigón – Factor tiempo temperatura a la edad t ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{hr}$)

T_a = Temperatura promedio del hormigón durante el intervalo de tiempo Δt ($^{\circ}\text{C}$)

T_0 = Temperatura Datum ($^{\circ}\text{C}$)

Δt = Intervalo de Tiempo

Este concepto de madurez, se basa en una función lineal entre la temperatura y la ganancia de resistencia, gráficamente se toma el área bajo la curva de temperatura como el índice de madurez basado en la Ecuación 1, y se puede expresar de la siguiente manera:

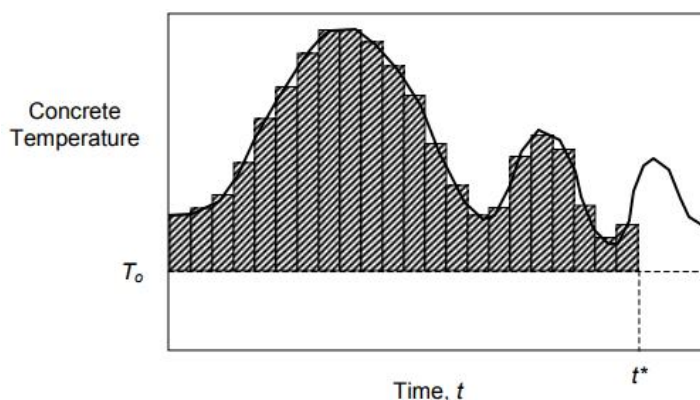


Figura 2: Modelo de Nurse-Saul. [16]

La temperatura datum T_0 corresponde a la temperatura por debajo de la cual ya no se produce desarrollo de la resistencia, o también la temperatura bajo la cual empieza el proceso de endurecimiento del hormigón.

3.2.2 Modelo de Rastrup

La ecuación 1, asume que la tasa de desarrollo de la resistencia es una función lineal de la temperatura, y se puede utilizar para relacionar un historial de curado de temperatura-tiempo dado a una edad equivalente de curado a una temperatura de referencia de la siguiente manera:

$$t_{eq} = \frac{\sum_0^t (T - T_0) \Delta t}{(T_r - T_0)} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

t_{eq} : Edad equivalente (horas).

T : Temperatura promedio del hormigón en el intervalo Δt (°C).

T_0 : Temperatura datum (°C).

T_r : Temperatura de curado constante bajo la cual se espera alcanzar la misma madurez que el historial de temperatura del concreto bajo investigación (°C).

t : Tiempo del proceso de endurecimiento del hormigón (horas o días).

El concepto de edad equivalente, originalmente introducido por Rastrup en 1954, como una alternativa para representar los efectos combinados de temperatura y tiempo sobre el desarrollo de la resistencia, representa la duración del periodo de curado a una temperatura de referencia T_r que daría como resultado la misma madurez como el periodo de curado a otras temperaturas. Rastrup, utilizando este concepto y basado en un axioma de la fisicoquímica que establece que la velocidad de reacción es doble si la temperatura a la que ocurre es incrementada por 10°C [13], propuso la siguiente ecuación:

$$t_{eq} = \sum 2^{(T-T_r)/10} \Delta t \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

t_{eq} : Edad equivalente (horas).

T_r : Temperatura de referencia (°C).

3.2.3 Modelo de Arrhenius

En 1977, Freisleben Hansen y Pedersen propusieron un nuevo modelo, basado en el concepto de edad equivalente y en la ecuación de Arrhenius, la cual relaciona el efecto de la temperatura en el índice de una reacción química. Matemáticamente su expresión está dada por:

$$t_{eq} = \sum_0^t e^{-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right)} \cdot \Delta t \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

t_{eq} : Edad equivalente (horas).

T : Temperatura promedio del hormigón en el intervalo Δt (°K).

T_r : Temperatura de referencia (°K)

e : Numero de Euler (2,718).

E_a : Energía de activación (J/mol)

R : Constante de los gases (8.314 J/mol K).

La energía de activación corresponde a la mínima energía que se requiere para empezar el proceso de endurecimiento del hormigón. Freisleben Hansen y Pedersen recomendaron usar los siguientes valores para poder determinarla:

- $T_c < 20^\circ\text{C}$: $E_a = 33500 + 1470(20 - T_c)$ (J/mol)
- $T_c \geq 20^\circ\text{C}$: $E_a = 33500$ (J/mol)

Donde T_c corresponde la a temperatura de curado del hormigón (°C) y E_a a la energía de activación (J/mol)

3.2.4 Modelo holandés madurez ponderada

En 1979, Papadakis y Bresson propusieron el método de la madurez ponderada, la cual puede ser expresada de la siguiente manera:

$$M_w = \sum_0^t t \cdot T \cdot C^n \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

M_w : Madurez ponderada (°C-hr)

t : Tiempo del proceso de endurecimiento del hormigón (horas o días).

T : Temperatura promedio del hormigón durante el intercalo de tiempo ©

C : Constante que depende del tipo de cemento

n : Parámetro dependiente de la temperatura

Como el modelo de Nurse-Saul, la madurez ponderada corresponde al área bajo la curva, la cual puede ser subdividida en franjas horizontales correspondientes a los intervalos de temperatura en el proceso de endurecimiento, pero la diferencia radica, en que este modelo toma en cuenta los factores C y n_k que corresponden a la influencia del cemento en la madurez y la influencia del tipo de cemento utilizado, respectivamente. Estos valores han sido estudiados y estandarizados por investigaciones holandesas. [17]

3.2.5 Modelo de Guo

En el año 1989, Guo Cheng propuso un modelo cuadrático para determinar la madurez del hormigón, mediante la siguiente expresión:

$$M = \sum_0^t (T + 10)(T + 20)\Delta t \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:

M : Madurez propuesto por Guo.

t : Tiempo del proceso de endurecimiento del hormigón (horas o días).

T : Temperatura promedio del hormigón en el intervalo de tiempo Δt .

3.3 Estimación de la resistencia a la compresión del hormigón a partir del conocimiento de su madurez

Estudiados los diferentes modelos para poder determinar la madurez del hormigón, es necesario establecer una relación entre la resistencia del hormigón con su madurez.

Existen varias funciones que fueron propuestas para poder modelar la curva madurez versus resistencia, sin embargo, solamente 3 son típicamente usadas [16]:

i. Función exponencial

$$S = S_u e^{-(\tau/M)^a} \quad \text{(Ecuación 7)}$$

Donde:

S : Resistencia a compresión del hormigón (kg/cm²).

S_u : Resistencia a la compresión limite (kg/cm²).

M : Madurez o índice de madurez (°C-hr).

τ : Constante de tiempo característica (°C-hr).

a : Parámetro de forma.

ii. Función logarítmica

$$S = a + b \log(M) \quad \text{(Ecuación 8)}$$

Donde:

S : Resistencia a compresión del hormigón (kg/cm²).

M : Madurez o índice de madurez (°C-hr).

a, b : Constantes dependientes del hormigón utilizado

iii. Función hiperbólica

$$S = S_u \frac{k(M - M_0)}{1 + k(M - M_0)} \quad \text{(Ecuación 9)}$$

Donde:

S : Resistencia a compresión del hormigón (kg/cm²).

S_u : Resistencia a la compresión limite (kg/cm²).

M : Madurez o índice de madurez (°C-hr).

M_0 : Índice de madurez cuando se asume que la resistencia empieza a desarrollarse (°C-hr)

k : Pendiente inicial de la curva madurez v/s resistencia (1/hr)

3.4 Normativa vigente para el uso del método de madurez del hormigón

La norma internacional que rige este método es ASTM C1074-19 “Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method”, y actualmente Chile cuenta con una norma nacional que regula la aplicación del método de madurez; NCh3565:2018 “Hormigón – Estimación de Resistencia Mecánica – Método de la Madurez”, que corresponde a una adaptación de la ASTM C1074-11.

Además, en la actualización de la norma NCh170:2016 se integró este concepto, permitiendo el uso del método de la madurez para la determinación de la resistencia en terreno del hormigón, basado en la norma ASTM C1074.

3.4.1 Consideraciones ASTM C1074

La norma ASTM C1074 considera el método de Nurse-Saul y el método de Arrhenius, descritos en 3.2.1 y 3.2.3 respectivamente, como métodos válidos para determinar la función de Madurez. La (Ecuación 1) y la (Ecuación 4) fueron incorporadas desde la primera versión de esta norma (ASTM, 1989). Recomendando valores para la Temperatura Datum T_0 y entregando procedimientos de laboratorio para determinar la Energía de Activación de un determinado cemento, de manera de aplicar adecuadamente la (Ecuación 4).

3.4.2 Consideraciones NCh3565

La actual norma chilena, NCh3565 incluyó el uso del método de Nurse-Saul, como método para determinar la función de Madurez, debido a la simpleza en su uso en comparación con el método de Arrhenius, que requiere de mediciones más complejas en laboratorio.

Otras consideraciones entregadas por esta norma, es la utilización de una Temperatura Datum T_0 recomendada igual a 0°C , y en casos muy especiales o con fines de estudio, se recomienda un valor distinto considerando la metodología de ASTM C1074.

Además, esta norma indica el modo en que se debe calcular la relación Resistencia-Madurez (Curva de calibración), para ello indica utilizar la función logarítmica (Ecuación 8). También entrega requisitos adicionales, como la exactitud de la curva de correlación ($r^2 > 0,95$), rango de edad de interés y procedimiento de verificación de la Curva de Calibración en el tiempo, según la desviación de la resistencia con respecto a los valores iniciales de calibración.

Entre sus alcances, se definen aquellos procesos donde puede utilizarse como un criterio válido de estimación de resistencia a la compresión, los cuales se enumeran a continuación:

- Aserrado de juntas
- Descimbre y desmolde
- Retiro de protecciones térmicas en tiempo frío
- Apertura a tránsito de pavimentos
- Pre y post tensado de elementos

3.5 Equipos para medición de la madurez del hormigón

Dado que la madurez depende solo del historial de temperatura durante el tiempo de curado del hormigón, los equipos para determinar estos parámetros pueden ser los básicos, simples y de fácil uso, como un termómetro y un reloj, registrando la temperatura y tiempo, para luego calcular manualmente el índice de madurez. Pero este método consume mucho tiempo y resulta inexacto

Actualmente, en el mercado existe una variabilidad de instrumentos para determinar madurez, que han evolucionado desde los sistemas manuales hasta sistemas electrónicos avanzados. Estos últimos, capaces de registrar simultáneamente la temperatura y el tiempo, almacenando todos los datos a través de una memoria interna, entregando el índice de madurez mediante el uso de un sensor de madurez, un lector y un software para la transferencia de datos desde el lector a un computador.

Los sensores utilizados, corresponden a termocuplas, las cuales son embebidas o incrustadas en el hormigón, y emplean cables (Figura 3) que se conectan al lector o dispositivo de registro de datos externa (Madurimetro). También existen los sensores inalámbricos (Figura 4), que actúan de la misma manera, excepto que tienen la capacidad de poder comunicarse con el lector de manera inalámbrica. Ambos pueden medir la madurez directamente del hormigón, en cualquier momento, ya que son capaces de almacenar estos datos por largos periodos de tiempo, gracias a que contienen baterías de larga duración con memoria interna. Estos, cumplen con los requerimientos de normas internacionales como nacionales.



Figura 3: Sensor de madurez (data logger).



Figura 4: Sensor de madurez inalámbrico.

Los lectores o madurímetros, se usan para establecer un traspaso de información con los sensores embebidos, el usuario sólo debe conectar los cables del sensor al dispositivo en el caso de cables, o conectarse por bluetooth en el caso de los sensores inalámbricos. Y utilizarlo tanto para ver y/o descargar la información de madurez y temperatura. El intervalo de tiempo será de 1 h o menos, y los datos pueden ser descargados en cualquier momento. Programados para calcular la madurez ya sea por la ecuación de Nurse-Saul o la ecuación de Arrhenius.

Algunos de estos dispositivos son:

- IntelliROCK II distribuido por Nomadics Construction Labs
- The System 4101 Concrete Maturity Meter distribuido por Humboldt Manufacture Company
- The Command Center distribuida por The Transtec Group



Figura 5: Dispositivo Intellirock, y conexión con sensor.

3.6 Procedimiento para desarrollar la curva madurez-resistencia

De acuerdo a lo establecido en la NCh3565, el modo práctico para establecer la relación Resistencia-Madurez, sigue los siguientes pasos:

- i. Para una dosificación determinada de hormigón, se confeccionan a lo menos 15 probetas cilíndricas, de acuerdo a lo establecido en NCh1017 y NCh1018.
- ii. Para obtener el registro de temperaturas del hormigón en el tiempo, se utilizarán 2 de estas probetas, ambas monitoreadas con sensores de temperatura ubicados, como mínimo, a ± 15 (mm) desde el centro de los ejemplares. Los sensores deben tener una precisión de ± 1 ($^{\circ}\text{C}$).
- iii. Curar las probetas según lo indicado en NCh1017 y NCh1018.
- iv. Realizar los ensayos de resistencia a compresión según NCh1037, a lo menos en cinco edades que incluyan el período en estudio, al día 1, 3, 7, 14 y 28. Ensayar dos probetas por cada edad y calcular el promedio. Si la diferencia entre resultados de resistencia a compresión de las dos probetas es superior a un 10% de su resistencia promedio, se debe ensayar otra probeta y calcular el promedio con las tres resistencias.
- v. Para cada edad de ensayo, se debe registrar el grado de madurez de cada probeta instrumentada. Calcular el grado de madurez a esa edad como el promedio de ambos resultados.
- vi. Graficar los valores promedio de resistencia a la compresión y el grado de madurez. Ajustar una curva por medio de análisis de regresión que represente dichos puntos y verificar su validez mediante métodos estadísticos (Ecuación 8).

3.7 Procedimiento para estimar la resistencia a la compresión del hormigón a partir de su madurez, in situ.

Para poder estimar la resistencia a la compresión del hormigón a partir del conocimiento de su madurez, se realizarán los siguientes pasos [18]:

- i. Colocar los sensores en el elemento estructural de modo que, al momento de hormigonar, quede embebido y su ubicación no se altere. En caso de no ser posible colocar el sensor previo al hormigonado, introducir éste, tan pronto como sea posible en el hormigón fresco.
- ii. Iniciar el registro de datos tan pronto como sea posible. Usar el mismo valor de Temperatura Datum considerado en la determinación de la curva Madurez-Resistencia.

- iii. Determinar el grado de madurez a través de lectura directa del instrumento (madurímetro) o calcular según la (Ecuación 2) considerando el registro de temperaturas.
- iv. Estimar la resistencia mecánica a la compresión utilizando la relación Madurez-Resistencia, determinada anteriormente.

3.8 Ventajas y limitaciones del método de madurez

3.8.1 Ventajas de usar la madurez del hormigón

- Este método puede ser usado, principalmente, para estimar la resistencia a la compresión del hormigón utilizado en obra, evaluada en tiempo real, de manera no destructiva. Lo cual permite supervisar continuamente la resistencia del hormigón mejorando el nivel de confiabilidad en la verificación del cumplimiento de especificaciones técnicas. Esto, resulta útil para tomar decisiones y dar inicio de actividades de construcción crítica.
- El número probetas para los ensayos destructivos puede disminuir, reduciendo así los costos de control de calidad y tiempo de preparación.
- La construcción expedita, puede resultar en optimización de tiempos de trabajo, agilizando la construcción y horas hombre, lo que resulta en bonificaciones al constructor.
- Se invierte menos tiempo esperando los resultados del laboratorio.

3.8.2 Limitaciones del método de madurez del hormigón

- El hormigón debe estar mantenido en condiciones que permita la hidratación del cemento.
- El método necesita ser apoyado por otros ensayos para la obtención de la resistencia del hormigón.
- El método, como cualquier otro, no toma en cuenta malas prácticas constructivas en el hormigón.
- No considera las fuentes que producen variabilidad para una determinada dosificación de hormigón, como son los materiales que lo componen, confección, temperatura al momento del hormigonado y tiempo de traslado a obra, entre otras.

Cabe resaltar que la calibración que se realiza para obtener los valores de madurez, es de uso exclusivo para elementos con el mismo diseño de mezcla de hormigón. Para cualquier variación, es necesario modificar también la calibración que se haya realizado.

3.9 Resumen de modelos a utilizar

De acuerdo a lo modelos descritos anteriormente, para la realización de este estudio se utilizará el modelo de Nurse-Saul (Ecuación 1), y la función exponencial (Ecuación 8) para estimar la resistencia a la compresión a partir del conocimiento del índice de madurez. Su aplicación y resultados se explican en detalle en el capítulo 4 y capítulo 5, respectivamente.

CAPITULO 4: METODOLOGÍAS Y EJECUCIÓN DE ENSAYOS

4.1 Metodología utilizada

Para la realización y desarrollo del presente trabajo, es necesario realizar una serie de actividades tanto previas como durante la colocación del hormigón, además de actividades posteriores y en dependencias de un laboratorio. Debido a que el estudio, así como el método de madurez, busca reflejar las condiciones reales en que se encuentran desarrollando en la obra para este tipo de trabajos, se requiere realizar las siguientes actividades:

1. Caracterización de hormigones
2. Instrumentación in-situ
3. Monitoreo de datos
4. Extracción de testigos
5. Ensayo en laboratorio

Los procedimientos habituales para las actividades 1, 2 y 3 son explicados en el capítulo 3 (subcapítulos 3.6 y 3.7), establecidos en la norma chilena NCh3564:2018. Sin embargo, las ejecuciones de estas actividades, para efecto de esta investigación, fueron realizadas durante el segundo semestre de 2017, año en que la norma antes mencionada aún se encontraba en estudio, por lo cual se utilizó la norma ASTM C1074 como referencia técnica.

4.1.1 Caracterización de hormigones

Como primer paso, es necesario establecer en laboratorio la relación resistencia-madurez de la dosificación de hormigón a utilizar en terreno, registrando la temperatura a las edades para las cuales se necesita determinar la resistencia del hormigón de manera de confeccionar una curva característica de la mezcla, que relaciona la resistencia con la madurez. Para ello, se realiza una toma de probetas cilíndricas, que se curan en condiciones estándar, a excepción de las primeras horas, en donde las probetas se curan en la obra, y posteriormente son ensayadas en laboratorio.

El procedimiento para establecer esta relación, para este estudio, se detalla a continuación:

- 1.- Tomar una muestra de 19 probetas de hormigón, según lo indicado NCh1017 y NCh1018.
- 2.- Instrumentar una de las probetas con un sensor de madurez, ubicado en el centro de la probeta, para monitorear su temperatura en el tiempo de manera inmediata.

3.- Curar las muestras según lo indicado en NCh1017 y NCh1018.

4.- Ensayar las 18 probetas restantes, para evaluar su resistencia a la compresión según NCh1037. Se ensayan dos probetas por cada edad, calculando el promedio de las resistencias obtenidas. Las edades de ensayo consideradas son: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 14 y 28 días.

5.- Para cada edad de ensayo, se debe registrar el índice de madurez de cada probeta instrumentada.

6.- Graficar los valores promedio de resistencia a la compresión y el índice de madurez. Se debe ajustar una curva por medio de análisis de regresión que represente dichos puntos y verificar su validez mediante métodos estadísticos.

4.1.2 Instrumentación in-situ

Luego de obtener la curva de caracterización de la mezcla de hormigón a utilizar, es posible realizar las instrumentaciones in-situ en distintos sectores de interés, con sensores que son embebidos en el hormigón, capaces de monitorear y registrar la temperatura de éste.

Y una vez que los sensores son introducidos en el hormigón fresco tan pronto como éste fue colocado, se conectan a los instrumentos de medición de la madurez, y se activan los dispositivos de registro de temperatura. Se utiliza el mismo valor de temperatura de referencia o datum, que se usó para el cálculo del índice de madurez durante el desarrollo de la relación resistencia-índice de madurez, descrita anteriormente.

4.1.3 Monitoreo de datos

Cuando se desee estimar la resistencia en los sectores de colocación de los sensores, se debe leer el valor del índice de madurez indicado en el instrumento de medición, y utilizando la relación resistencia-madurez encontrada, es posible conocer el valor de la resistencia a la compresión correspondiente al índice de madurez medido. Y así, es posible monitorear en tiempo real la resistencia del hormigón a través de la correlación explicada anteriormente.

4.1.4 Extracción de testigos

Con el objetivo de analizar la resistencia obtenida a través del método de madurez, se realiza una comparación respecto a la resistencia obtenida por el ensayo de testigos.

La extracción de testigos se realiza mediante una broca diamantada de 4 pulgadas, que es lubricada con agua para generar la perforación y extracción de las muestras desde los sectores instrumentados. Para esto, el equipo se ancla al pavimento de

hormigón y se procede a realizar la extracción. Una vez obtenida la muestra, esta es llevada a laboratorio para ser cortada (de acuerdo a lo dispuesto en norma chilena NCh1171/1:2012 Hormigón - Testigos de hormigón endurecido - Parte 1: Extracción y ensayo). Para posteriormente proceder a preparar la superficie mediante el rectificado de esta, lo que genera una superficie lisa en las caras del testigo además de dejarlas paralelas y así no generar esfuerzos no deseados al momento de ensayar la muestra.

4.1.5 Ensayo en laboratorio

Previo a realizar el ensayo, se registra el peso y las dimensiones de cada testigo (diámetro y altura). El ensayo se realiza mediante una prensa de compresión, obteniéndose la carga máxima y la resistencia nominal. Luego, en base a las dimensiones del testigo se calcula la resistencia real a compresión, estos resultados son corregidos para ser expresados en probeta cilíndrica de 15x30 cm, de acuerdo a lo dispuesto en norma chilena NCh1171/1:2012 Hormigón - Testigos de hormigón endurecido - Parte 1: Extracción y ensayo

4.2. Ejecución de ensayos

4.2.1 Generalidades

Se explicarán las consideraciones utilizadas en la aplicación del método de madurez para la ejecución de los ensayos en un proyecto de pavimento urbano ubicado en la ciudad de Santiago, correspondiente a la pavimentación del Corredor Vicuña Mackenna, de acuerdo a la metodología anteriormente detallada. Además, se presentarán los datos y resultados obtenidos para la caracterización de la curva Madurez-Resistencia obtenida.

4.2.2 Contratistas

Para el estudio se acordó trabajar con dos contratistas independientes que tuvieran además un suministro de hormigón de proveedores y plantas de premezclado diferentes, de modo que se pudiera verificar si los resultados que cada contratista obtuviera eran consistentes en el tiempo respecto de quien les suministraba el hormigón.

El primer contratista corresponde a Icafal Ingeniería y Construcción S.A., con su proveedor de hormigón Ready Mix S.A., mientras que el segundo contratista corresponde a la empresa Ingeniería Y Servicios Con Pax S.A, con su proveedor de hormigón Hormigones Bicentenario S.A., a los cuales llamaremos de aquí en adelante Contratista 1 y Contratista 2 respectivamente.

4.2.3 Tipo de hormigón

Para el caso de pavimentos, los hormigones se clasifican principalmente por su resistencia a la flexión, ya que estos se encuentran sometidos al tránsito vehicular,

y someten al pavimento a estas solicitaciones. Se encuentran diseñados para tal efecto y en general la resistencia de estos se encuentra sobreestimada, se habla de hormigones potenciados, principalmente por dos razones: al ser pavimentos SERVIU son inspeccionados por una tercera parte y se debe garantizar que llegue a la resistencia operacional; por otro lado, son ensayados a través testigos, y todo lo que involucra extracción, preparación y ensayo tiene asociado un error, el cual se busca disminuir al potenciarlos. Además se debe considerar variables del tipo transporte desde la planta a la obra, que pueden afectar en la variabilidad del resultado.

El hormigón utilizado por cada contratista, con su respectiva nomenclatura, es:

- Contratista 1: HF50(80)40-06RMED
- Contratista 2: HF0.50(90)40+06CVM

La resistencia de diseño para los hormigones de cada contratista se encuentra dada por su resistencia a flexión HF5,0; es decir resistencia especificada f_t 5 MPa.

Para determinar la Resistencia a la Compresión cúbica normal (20x20 cm) a los 28 días de edad, se tomó la resistencia a la flexotracción del proyecto multiplicado por el factor de conversión SERVIU 7,8 [19]. Por lo que, la resistencia especificada es de 39 MPa para probeta cúbica normal, o de 34 MPa para probetas cilíndricas normales de 15x30 cm. De acuerdo a las consideraciones y metodología de trabajo para este estudio, es esta última la resistencia especificada del proyecto.

Como referencia, en el año 2019 se publicó una investigación que relaciona la resistencia a la compresión cilíndrica con la resistencia a la flexo-tracción, específicamente para hormigones de la región metropolitana, permitiendo especificar un hormigón para pavimentos directamente por compresión cilíndrica sin tener que utilizar un factor de correlación. De acuerdo a los resultados de dicha investigación, para el caso de este estudio, la resistencia equivalente a compresión cilíndrica para una resistencia a flexo-tracción de 5,0 MPa corresponde a G35, es decir 35 MPa. [20]. Adicionalmente, como se mencionó en 2.1.2, debido a las modificaciones de la normativa vigente, se ha establecido que la resistencia del hormigón para pavimentos como el utilizado en este estudio es G35. [10]

4.2.4 Modelo utilizado

4.2.4.1 Resistencia a compresión

De acuerdo a lo descrito en 3.4, las ecuaciones que se son consideradas en la norma ASTM C1074 – A.1, son las ecuaciones de Nurse-Saul, descrita en 3.2.1 y de Arrhenius descrita en 3.2.3.

Aun cuando la ecuación de Arrhenius es una mejor representación de la función temperatura-tiempo, sobre todo cuando se esperan grandes variaciones en la temperatura del hormigón y por ende, más precisa; la ecuación de Nurse-Saul ha

sido ampliamente utilizada, principalmente debido a su simplicidad con resultados favorables [17]. Como se mencionó anteriormente, la norma chilena NCh3565:2018, sólo considera la ecuación de Nurse-Saul para obtener el índice de madurez. Y es esta última, la que se utilizó en el estudio de este trabajo.

4.2.4.2 Temperatura datum o de referencia

La temperatura de datum o de referencia representa la temperatura a la cual el hormigón comienza a ganar resistencia y, es específica para cada diseño de mezcla. La norma ASTM C1074 – A.1 proporciona un procedimiento estándar para encontrar la temperatura de referencia.

Una estimación práctica de la temperatura de referencia, sugerida por estudios previos, está entre 0 °C y -10 °C. En Chile el valor para el datum de temperatura recomendado es 0° para las regiones con temperaturas cálidas la mayoría del año y de -10° para regiones del extremo sur.

Para la realización de las curvas de caracterización y las posteriores instrumentaciones in-situ de este estudio, se utilizó una Temperatura Datum, igual a 0°C, la cual también es la temperatura recomendada en la norma NCh3565.

4.2.4.3 Caracterización de hormigones

Para cada uno de los contratistas del proyecto, en conjunto con su respectivo proveedor de hormigón, se tomó una muestra de 19 probetas que fueron ensayadas e instrumentadas conforme a lo descrito en el punto 4.1.1.

A continuación, se muestran el resumen de los resultados de la resistencia en probeta cilíndrica obtenidos para cada contratista. Además se presentan las conversiones correspondientes para resistencia en probeta cúbica de 20 cm, y resistencia a la flexo-tracción, de manera ilustrativa de acuerdo al factor correspondiente.

Contratista 1:

Tabla 1: Resultados caracterización Contratista 1.

Edad		Madurez (°C x h)	Resistencia	Resistencia	Resistencia
Días	Horas (h)		Promedio Cil (MPa)	Promedio Cub (MPa)	Promedio FT (MPa)
1	24	315	8,8	11,0	1,4
2	48	790	24,8	29,8	3,8
3	72	1252	28,4	33,4	4,3
4	96	1684	32,0	37,0	4,7
5	120	2109	34,8	39,8	5,1
6	144	2517	35,5	40,5	5,2
7	168	2925	38,2	43,2	5,5
14	336	5787	40,9	45,9	5,9
28	672	11499	47,0	52,0	6,7

Contratista 2:

Tabla 2: Resultados caracterización Contratista 2.

Edad		Madurez (°C x h)	Resistencia	Resistencia	Resistencia
Días	Horas (h)		Promedio Cil (MPa)	Promedio Cub (MPa)	Promedio FT (MPa)
1	24	336	11,6	14,5	1,9
2	48	754	24,5	29,5	3,8
3	72	1194	29,6	34,6	4,4
4	96	1624	34,1	39,1	5,0
5	120	2083	39,4	44,4	5,7
6	144	2539	42,2	47,2	6,0
7	168	2995	44,2	49,2	6,3
14	336	5901	46,8	51,8	6,6
28	672	11613	47,4	52,4	6,7

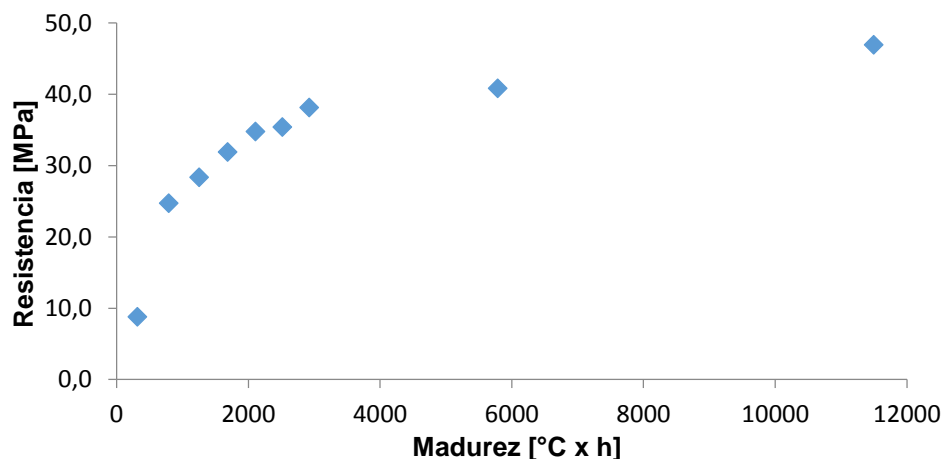
4.2.4.4 Estimación curva madurez-resistencia

Una vez obtenidos los resultados de los ensayos a compresión y madurez, es posible trazar un gráfico entre la resistencia promedio en probeta cilíndrica y la madurez obtenida, y de esta manera conocer la relación madurez-resistencia.

Esta relación, es establecida mediante un análisis de regresión, como fue señalado en el punto 3.3. Al observar los gráficos 1 y 2, correspondientes al contratista 1 y contratista 2 respectivamente, es posible notar que el diagrama de dispersión muestra una clara tendencia logarítmica, por lo cual se utilizará una regresión no lineal de función logarítmica para determinar la ecuación del índice de madurez que se ajuste a los datos.

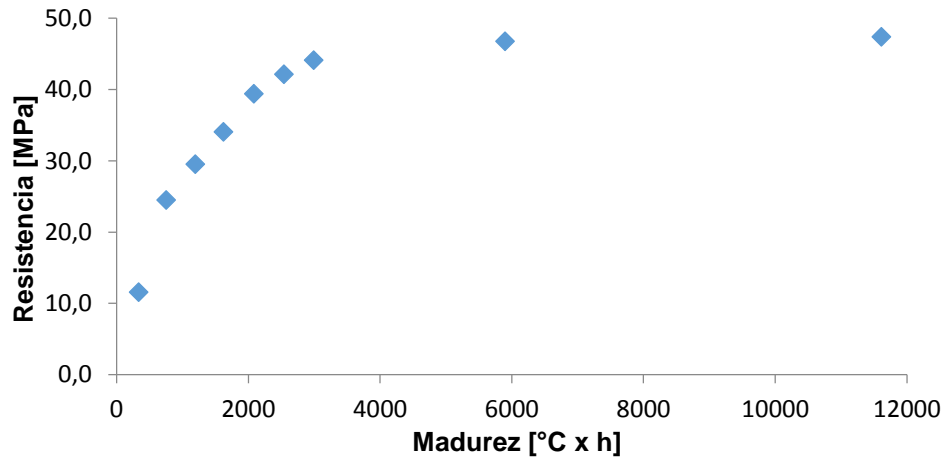
Contratista 1:

Gráfico 1: Dispersión de datos madurez-resistencia Contratista 1



Contratista 2:

Gráfico 2: Dispersión de datos madurez-resistencia Contratista 2



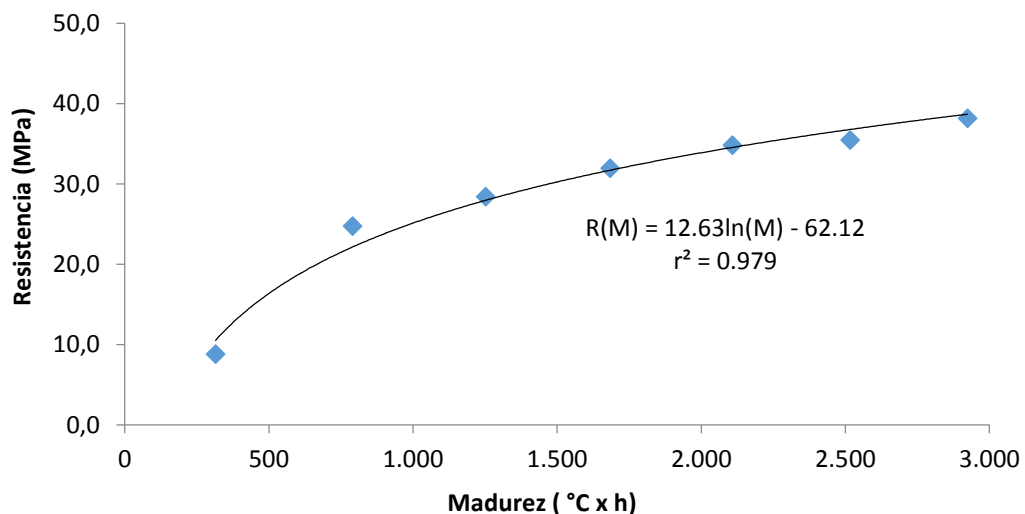
4.2.4.5 Curva Característica

Finalmente, mediante un análisis de los datos, la curva de caracterización se realizó con los resultados obtenidos hasta los 7 días, dado que durante este periodo de tiempo el hormigón presenta una gran generación de resistencia, incluso superando la resistencia de diseño para cada contratista, lo que permite trazar una mejor curva de tendencia.

A continuación, se muestra los gráficos con las curvas de madurez-resistencia obtenidas para cada contratista y su proveedor de hormigón correspondiente. Además se establece la ecuación característica para cada caso.

a. Contratista 1:

Gráfico 3: Curva de Madurez versus Resistencia para Contratista 1



Así se tiene que la ecuación con la que se estimará la resistencia a la compresión:

$$R(M) = 12,63 \ln M - 62,12 \quad (\text{Ecuación 10})$$

Siendo:

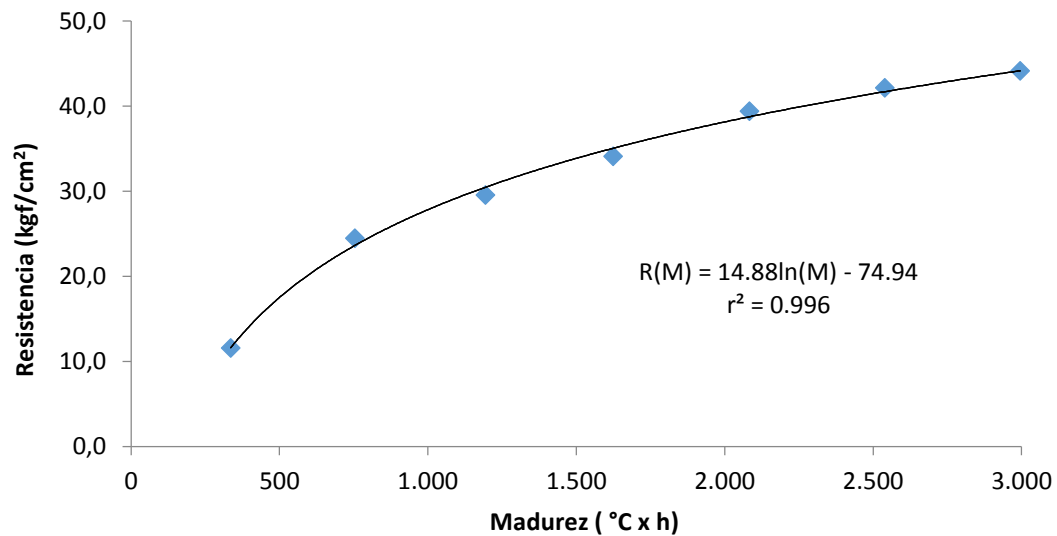
R : Resistencia a la compresión

M : Índice de Madurez

Y su factor de correlación r^2 igual a 0.979.

b. Contratista 2

Gráfico 4: Curva de Madurez versus Resistencia para Contratista 2



En este caso, la ecuación con la que se estimará la resistencia a la compresión es:

$$R(M) = 14,88 \ln M - 74,94 \quad (\text{Ecuación 11})$$

Siendo:

R : Resistencia a la compresión

M : Índice de Madurez

Y su factor de correlación r^2 igual a 0.996.

4.2.5 Instrumentación in-situ

Se realizaron una serie de instrumentaciones a lo largo del Corredor Vicuña Mackenna; en el caso del contratista 1 se instrumentaron 5 sectores de interés, mientras que con el contratista 2 se instrumentaron 6 sectores de interés. Luego de instrumentarlos, se fueron visitando constantemente para recolectar los datos de cada sensor embebido.

En las figuras que se muestran a continuación, se señalan los lugares que fueron instrumentados para cada contratista, destacándose en círculo rojo el punto donde quedan los cables terminales del sensor que son utilizados para poder recolectar datos. Los sensores no pueden ser visualizados directamente dado que quedan embebidos en el hormigón, pero se encuentran ubicados aproximadamente 0,5 m de lejanía de los terminales hacia el interior del paño hormigonado.

4.2.5.1 Instrumentaciones Contratista 1

- Instrumentación I01: Sector Av. Vicuña Mackenna 1687



Figura 6: Posición terminales Sensor Instrumentación I01

- Instrumentación I02: Sector Av. Vicuña Mackenna Oriente con calle Prado



Figura 7: Posición terminales Sensor Instrumentación I02

- Instrumentación I03: Sector Av. Vicuña Mackenna Poniente con calle Prado



Figura 8: Posición terminales Sensor Instrumentación I03

- Instrumentación I04: Sector Av. Vicuña Mackenna Oriente con calle Rodrigo de Araya



Figura 9: Posición terminales Sensor Instrumentación I04

- Instrumentación I05: Sector Av. Vicuña Mackenna Poniente con calle Zañartu



Figura 10: Posición terminales Sensor Instrumentación I05

4.2.5.2 Instrumentaciones Contratista 2

- Instrumentación C01: Sector Av. Vicuña Mackenna con calle El Pinar



Figura 11: Colocación y Posición terminales Sensor Instrumentación C01

- Instrumentación C02: Sector Av. Vicuña Mackenna Poniente salida metro frente a sede Universidad Santo Tomas



Figura 12: Colocación y Posición terminales Sensor Instrumentación C02

- Instrumentación C03: Sector calle El Pinar con Av. Vicuña Mackenna, salida metro hacia el Oriente.



Figura 13: Colocación y Posición terminales Sensor Instrumentación C03

- Instrumentación C04: Sector Av. Departamental con Av. Vicuña Mackenna



Figura 14: Posición terminales Sensor Instrumentación C04

- Instrumentación C05: Sector Av. Departamental detrás de bencinera



Figura 15: Posición terminales Sensor Instrumentación C05

- Instrumentación C06: Sector Av. Departamental con calle Sandino



Figura 16: Colocación y Posición terminales Sensor Instrumentación C06

4.2.6 Extracción de testigos

Para cada contratista, se extrajeron 2 testigos en cada sector instrumentado, a distintas edades por cada sector desde que comenzó el monitoreo de datos, de manera de analizar las diferencias que se obtienen entre el método de madurez y la evaluación directa a través de testigos. Dado esto, metodología que se siguió no considero los plazos indicados en la norma NCh1171-1, pues los testigos fueron extraídos en los plazos en que se llegaba a cierta madurez.



Figura 17: Extracción de testigos sensor instrumentación C01

4.2.7 Ensayo de testigos

Los ensayos de compresión de testigos, así como la preparación de estos, se realizaron de acuerdo a lo expresado en el punto 4.1.5 y 4.1.4 respectivamente, en las dependencias del Laboratorio de Hormigones del Centro de Investigación, Desarrollo e Innovación de Estructuras y Materiales IDIEM dependiente de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, exceptuando por la fecha de ensayo de estos, los cuales se realizaron durante el mismo día de extracción, fuera de los plazos recomendados por norma NCh1171-1:2012 (ensayos 5 a 7 días después de la extracción).

4.2.8 Cronograma de instrumentaciones y ensayos

Tanto las instrumentaciones como las extracciones y ensayos de testigos, fueron realizados en distintos días, para tener una comparación más real de cada caso. A continuación, se presenta el cronograma de instrumentaciones y ensayos de testigos para cada contratista.

Contratista 1:

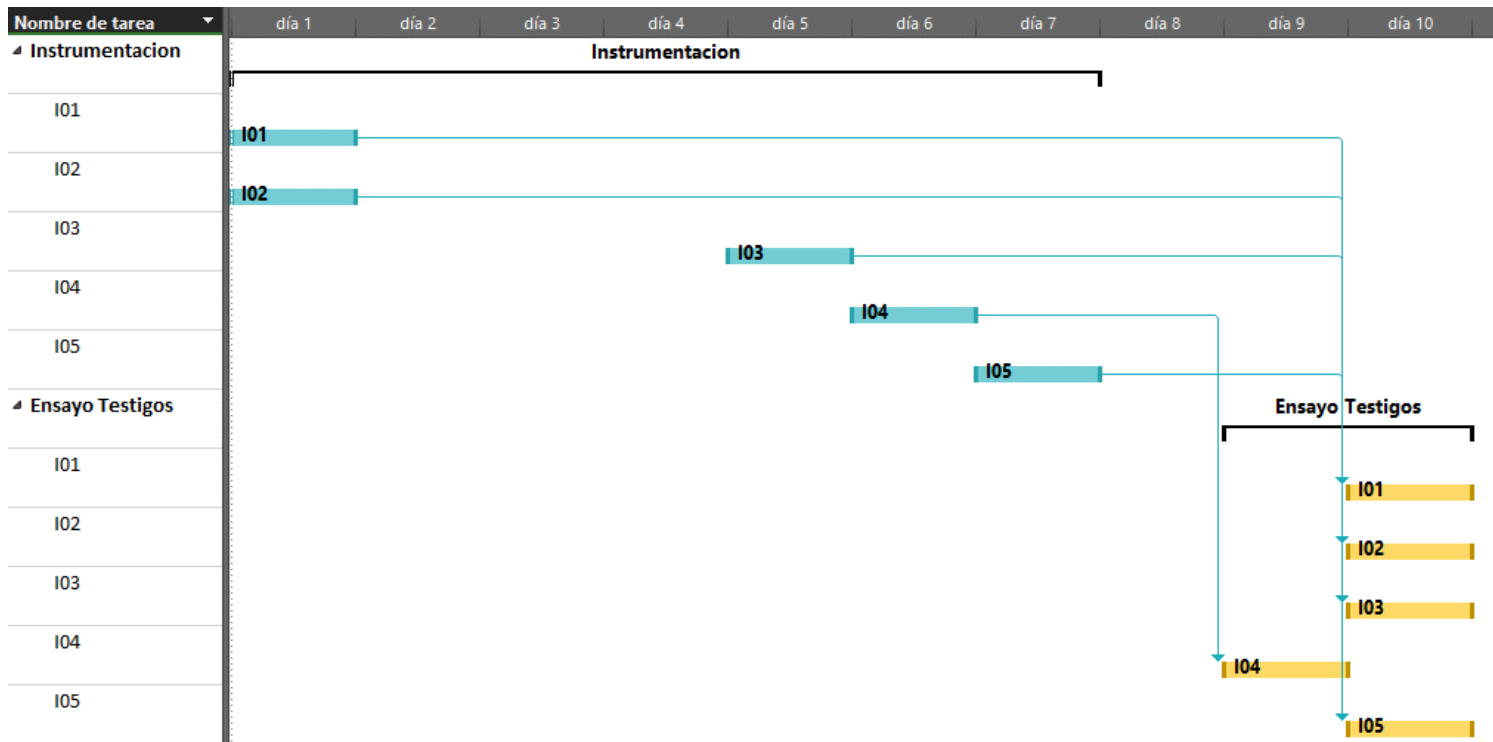


Figura 18: Cronograma de instrumentaciones y ensayos Contratista 1

Contratista 2:

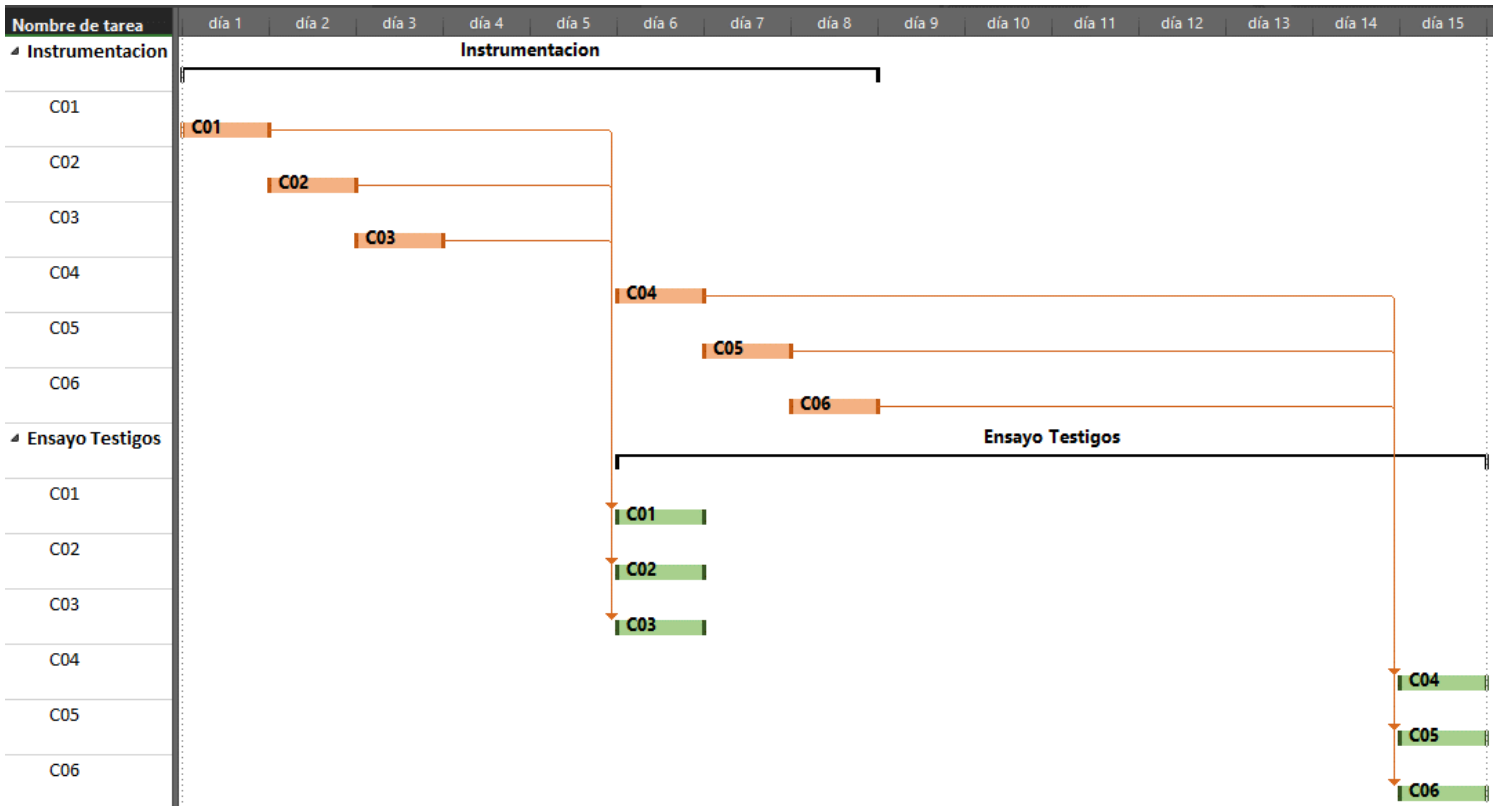


Figura 19: Cronograma de instrumentaciones y ensayos Contratista 2

CAPITULO 5: RESULTADOS

5.1 Instrumentaciones

Acorde a los monitoreos realizados, se obtienen los datos de temperatura en función del tiempo para cada sector instrumentado. Además del registro de madurez correspondiente.

A continuación, se presentan los gráficos de los resultados obtenidos para cada contratista. Primero se muestra el perfil de temperatura para cada sector instrumentado, y posteriormente se presenta la madurez obtenida.

Las tablas de los datos para la realización de estos gráficos se encuentran en el punto 2.1 y 2.2 de Anexo 2.

5.1.1 Perfil de temperaturas

Tanto para el contratista 1 como para el contratista 2, se observa que los perfiles de temperaturas oscilan de la misma manera; en la primera etapa de la curva, la temperatura se incrementa por efecto de la hidratación del cemento, debido a la reacción exotérmica producida por la adición de agua alcanzando en ese momento el máximo valor de temperatura. Luego de que este proceso ocurre, el hormigón presenta variaciones de temperatura, en gran medida por la temperatura ambiental entre otros factores. Las temperaturas máximas graficadas fluctúan entre los 24 °C y los 33 °C.

Importante destacar, que las mediciones se realizaron a mediados del periodo invernal, durante el mes de agosto, con valores de temperaturas mínimas variando entre 1 °C a 9 °C, y temperaturas máximas desde 8 °C a 21 °C en el tiempo que se registraron los valores con los sensores.

5.1.1.1 Contratista 1: Como se señaló anteriormente, para este contratista se instrumentaron 5 sectores.

Gráfico 5: Perfil de Temperaturas Instrumentación 01 Contratista 1

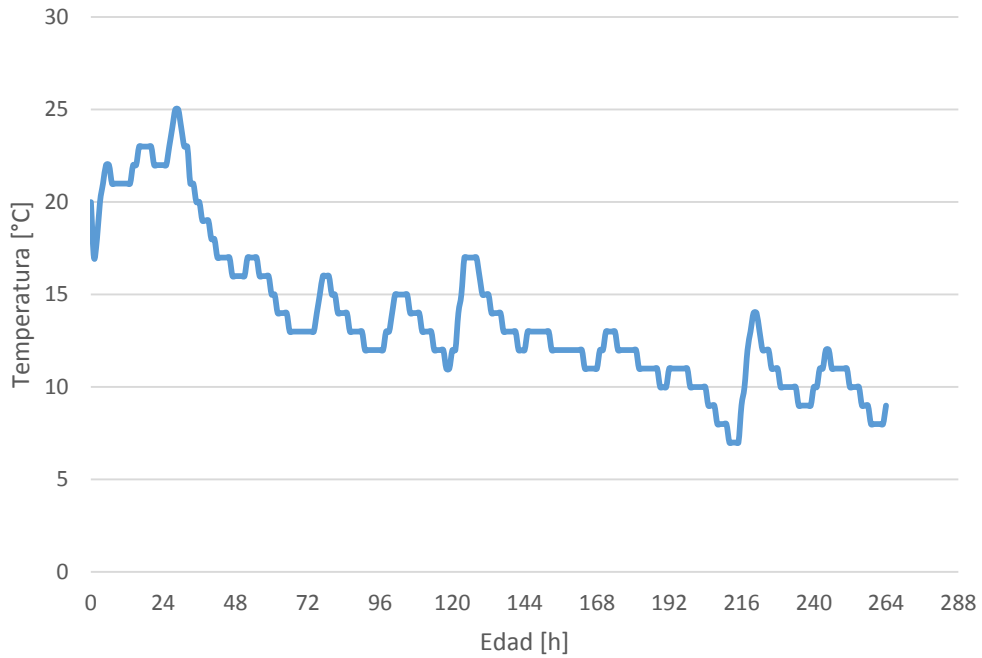


Gráfico 6: Perfil de Temperaturas Instrumentación 02 Contratista 1

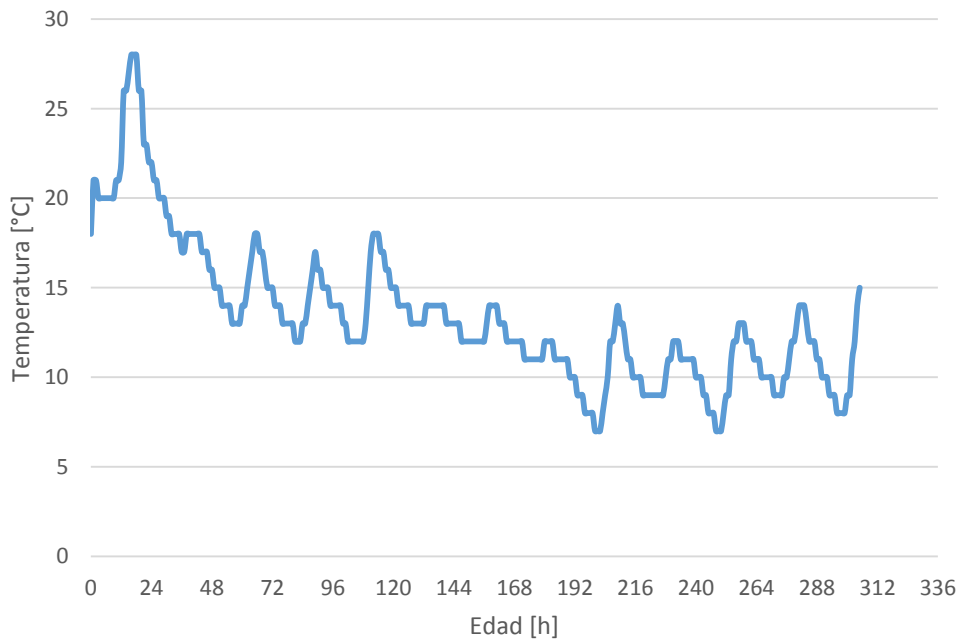


Gráfico 7: Perfil de Temperaturas Instrumentación 03 Contratista 1

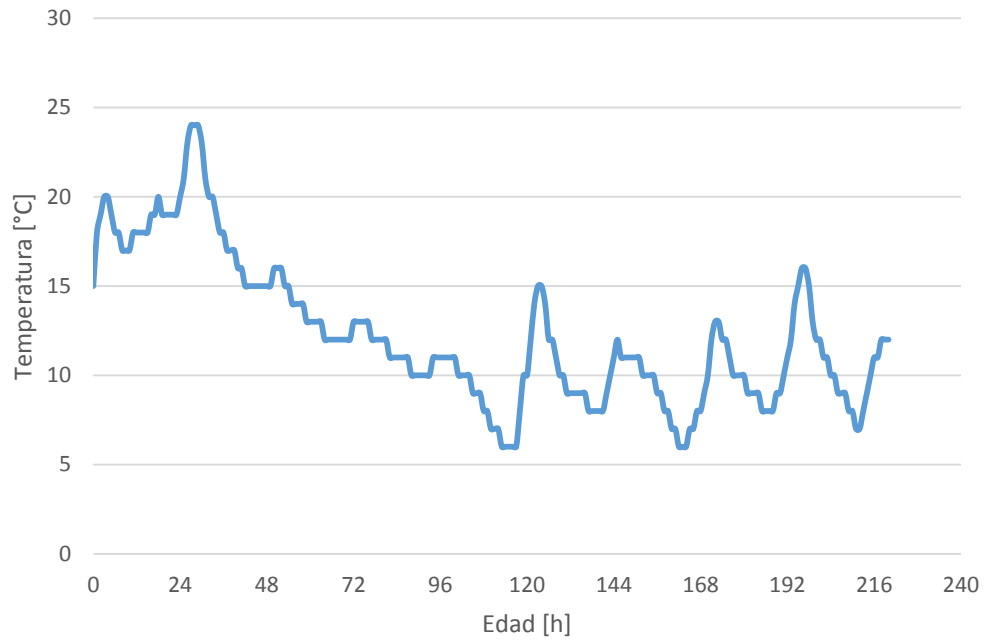


Gráfico 8: Perfil de Temperaturas Instrumentación 04 Contratista 1

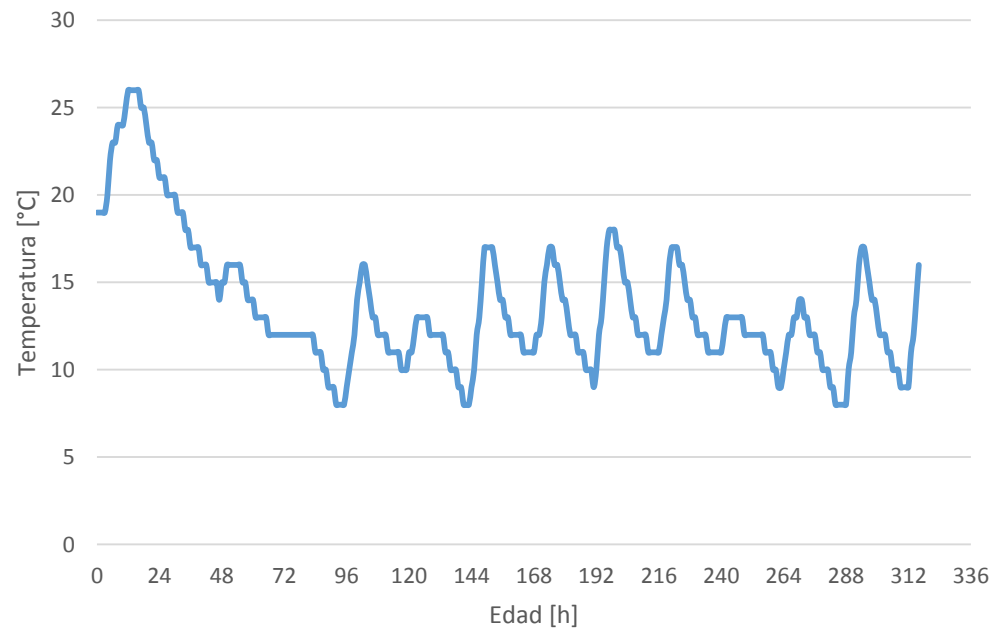
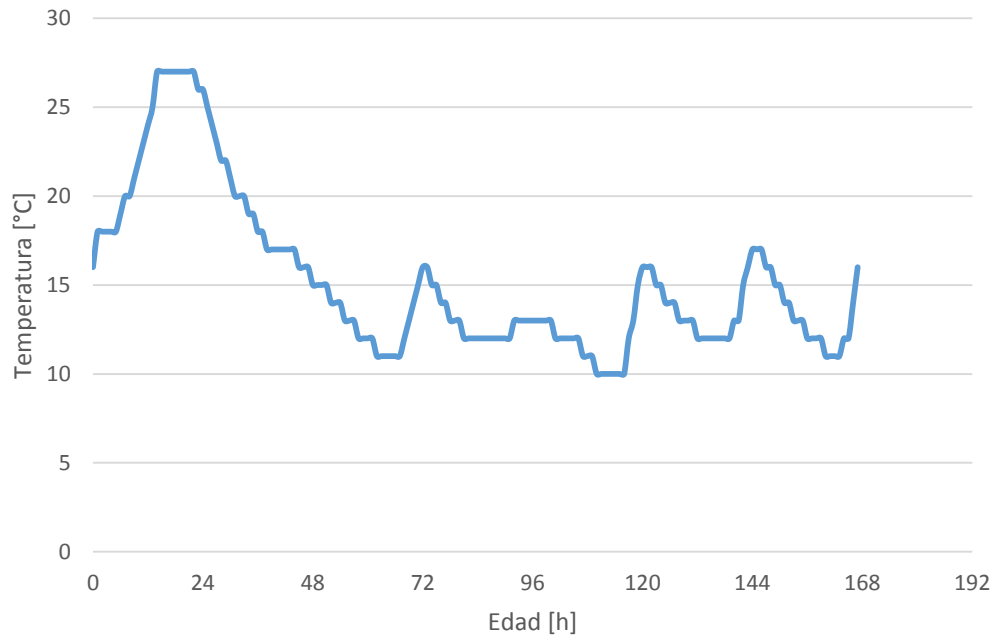


Gráfico 9: Perfil de Temperaturas Instrumentación 05 Contratista 1



5.1.1.2 Contratista 2: En este caso, se instrumentaron 6 sectores.

Gráfico 10: Perfil de Temperaturas Instrumentación 01 Contratista 2

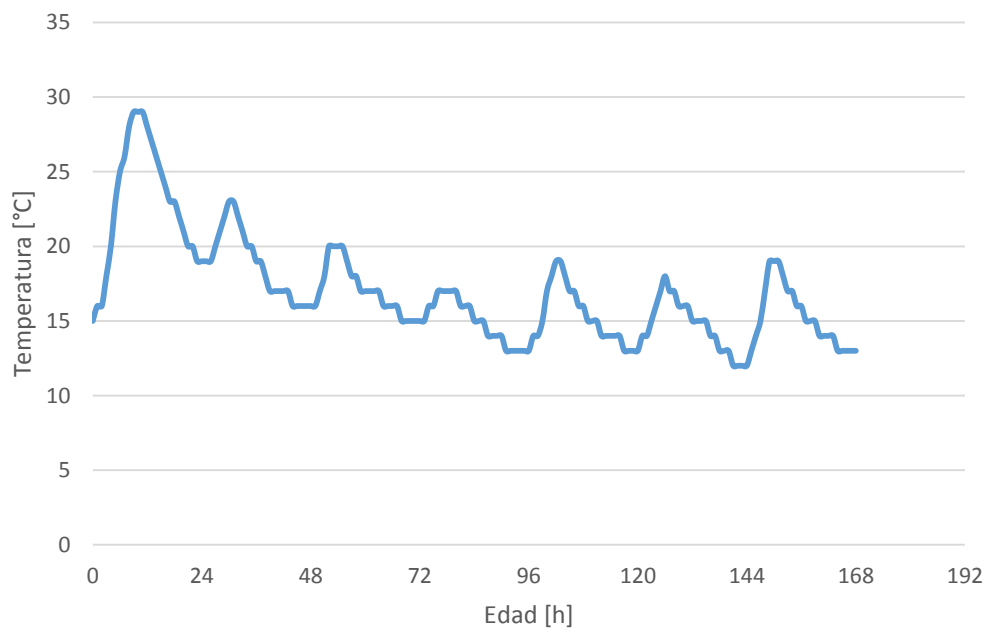


Gráfico 11: Perfil de Temperaturas Instrumentación 02 Contratista 2

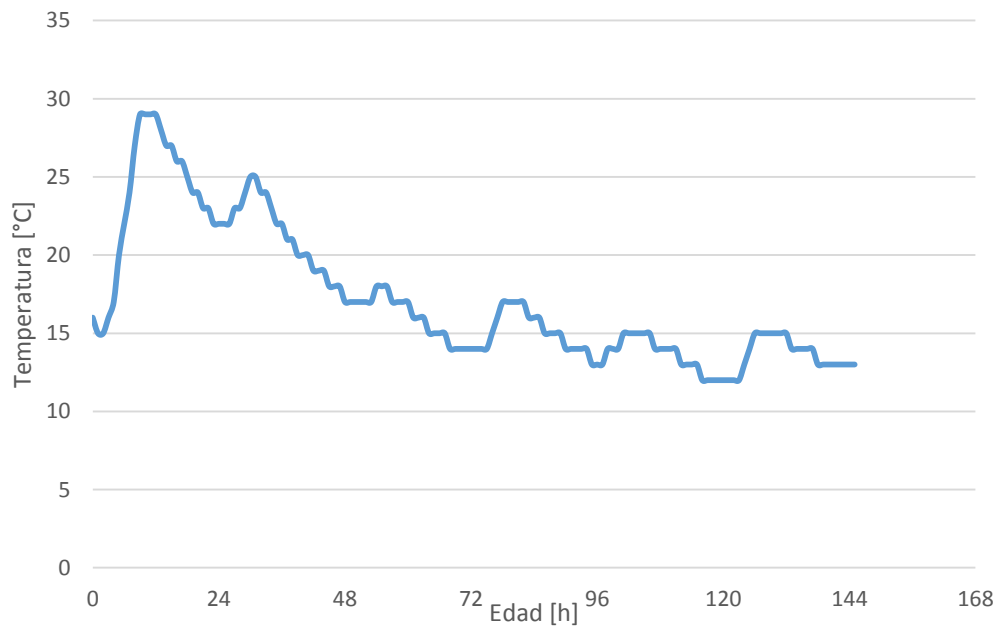


Gráfico 12: Perfil de Temperaturas Instrumentación 03 Contratista 2

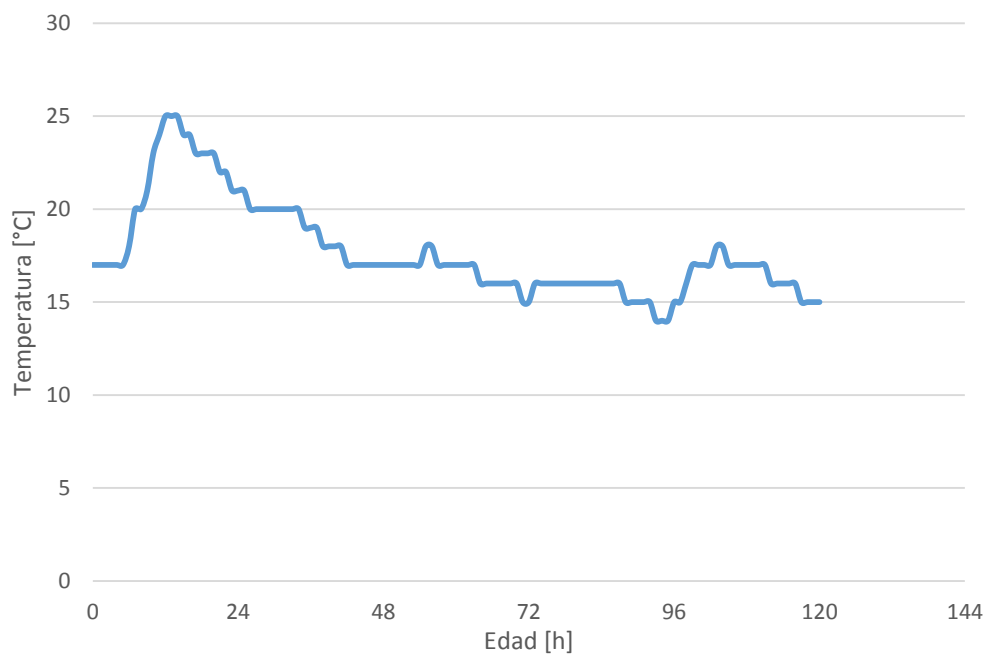


Gráfico 13: Perfil de Temperaturas Instrumentación 04 Contratista 2

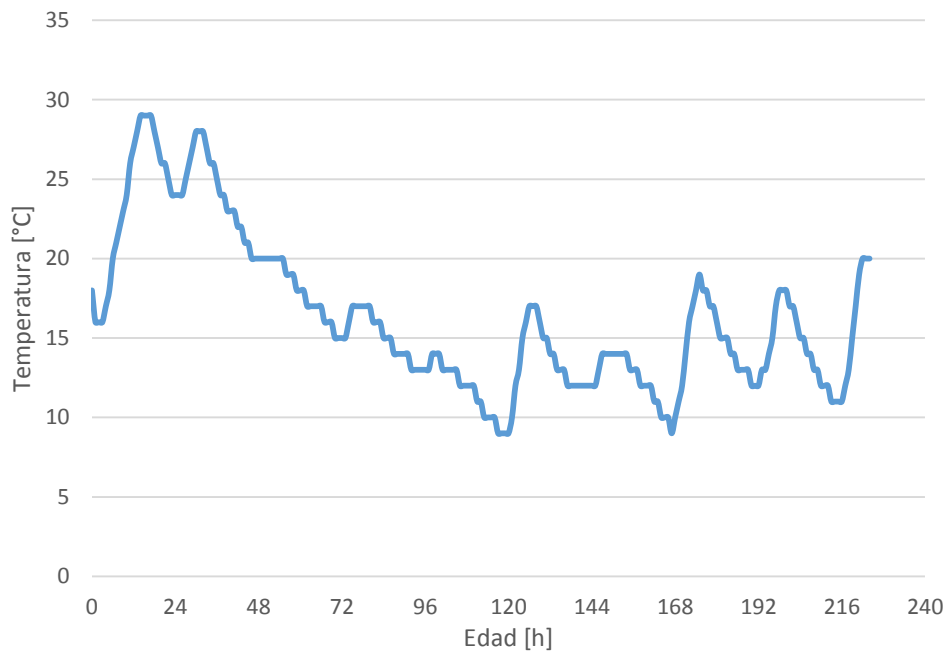


Gráfico 14: Perfil de Temperaturas Instrumentación 05 Contratista 2

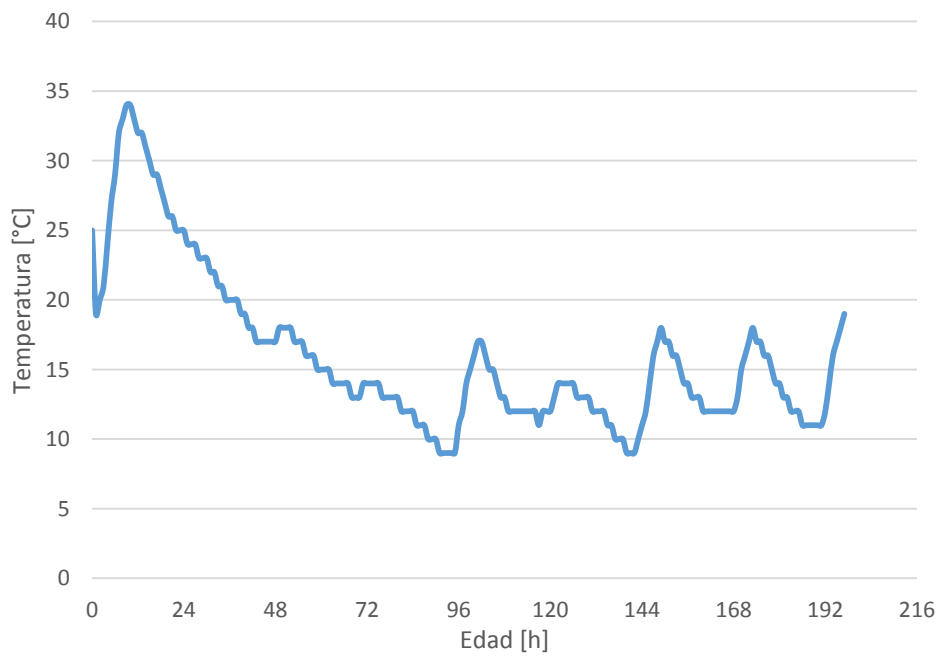
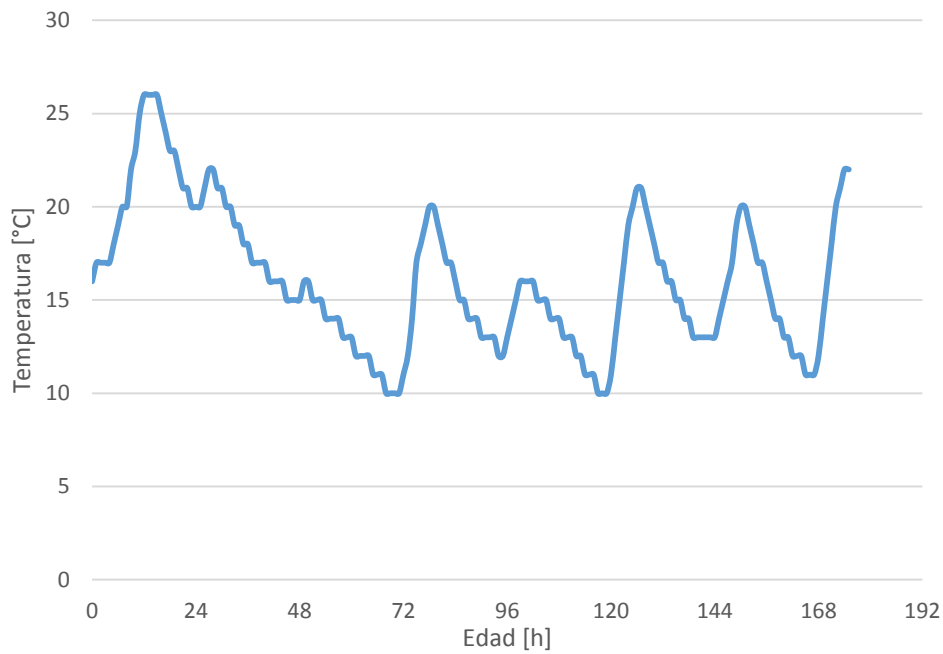


Gráfico 15: Perfil de Temperaturas Instrumentación 06 Contratista 2



5.1.2 Seguimiento Madurez

De acuerdo a los registros obtenidos, con las lecturas para ambos contratistas es posible calcular el índice de madurez para cada uno de acuerdo a la (Ecuación 1) o simplemente utilizar los resultados entregados por el madurimetro.

5.1.2.1 Contratista 1

Gráfico 16: Seguimiento Madurez Instrumentación 01 Contratista 1

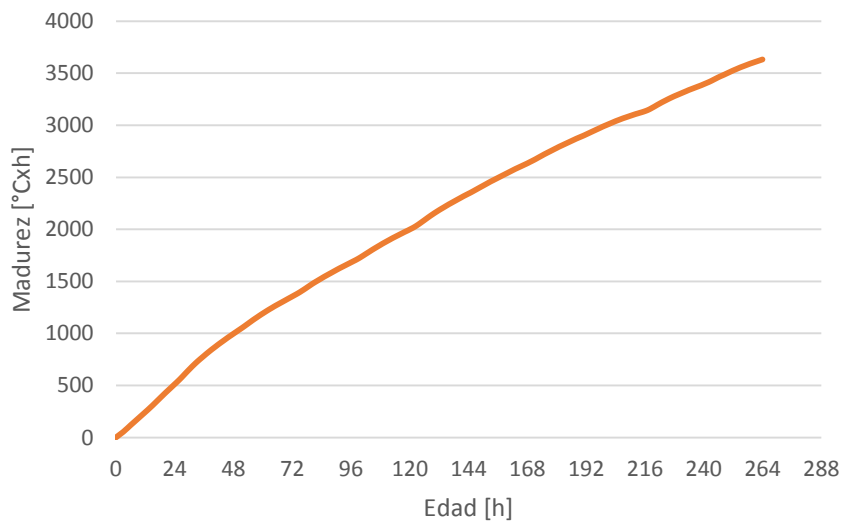


Gráfico 17: Seguimiento Madurez Instrumentación 02 Contratista 1

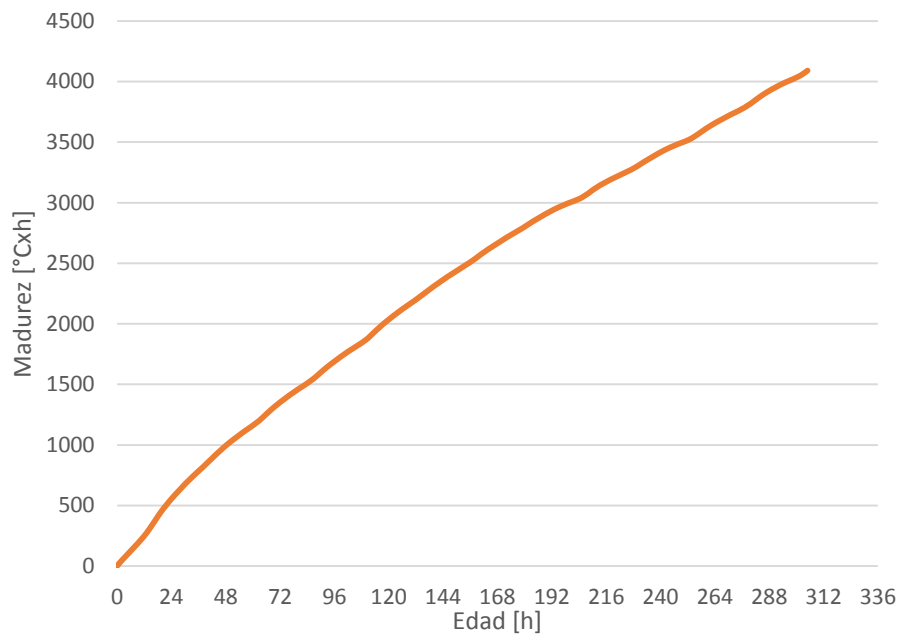


Gráfico 18: Seguimiento Madurez Instrumentación 03 Contratista 1

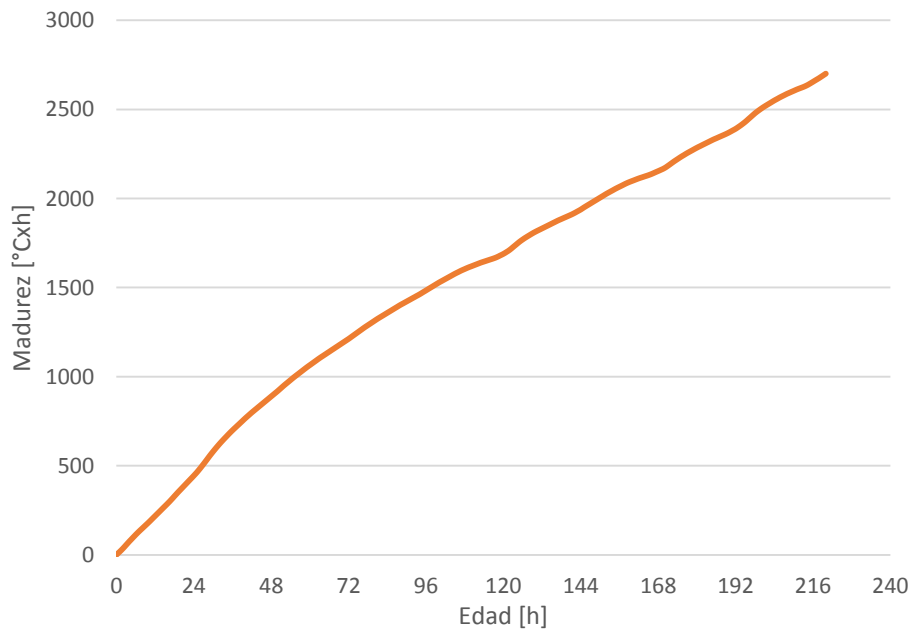


Gráfico 19: Seguimiento Madurez Instrumentación 04 Contratista 1

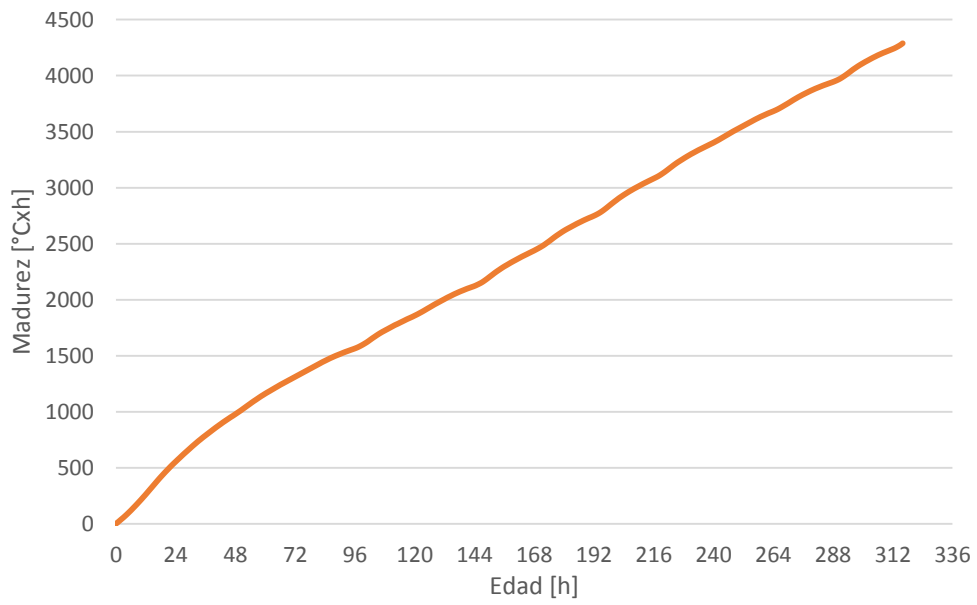
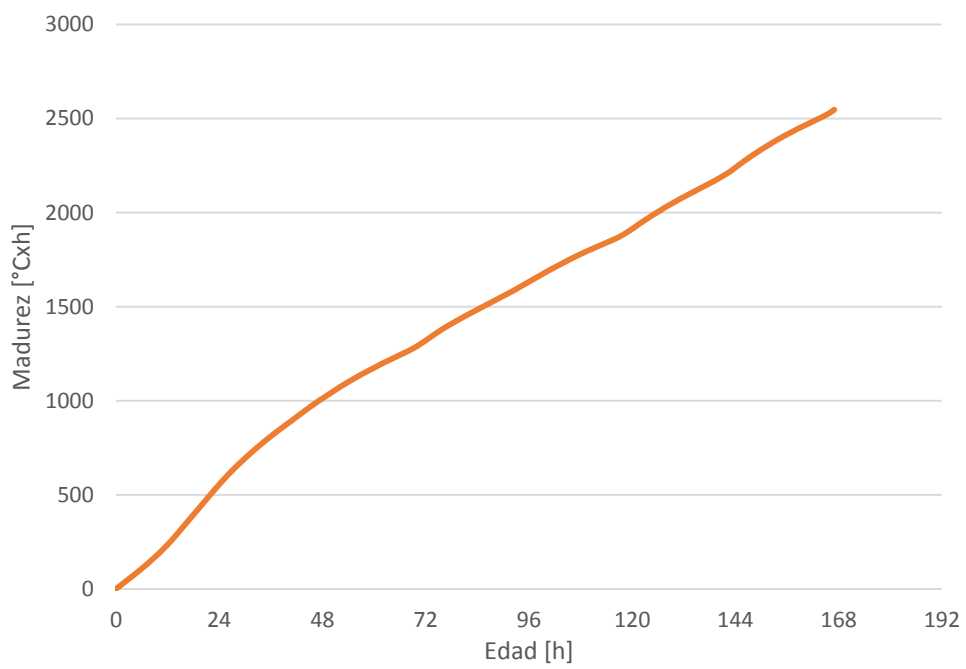


Gráfico 20: Seguimiento Madurez Instrumentación 05 Contratista 1



5.1.2.2 Contratista 2

Gráfico 21: Seguimiento Madurez Instrumentación 01 Contratista 2

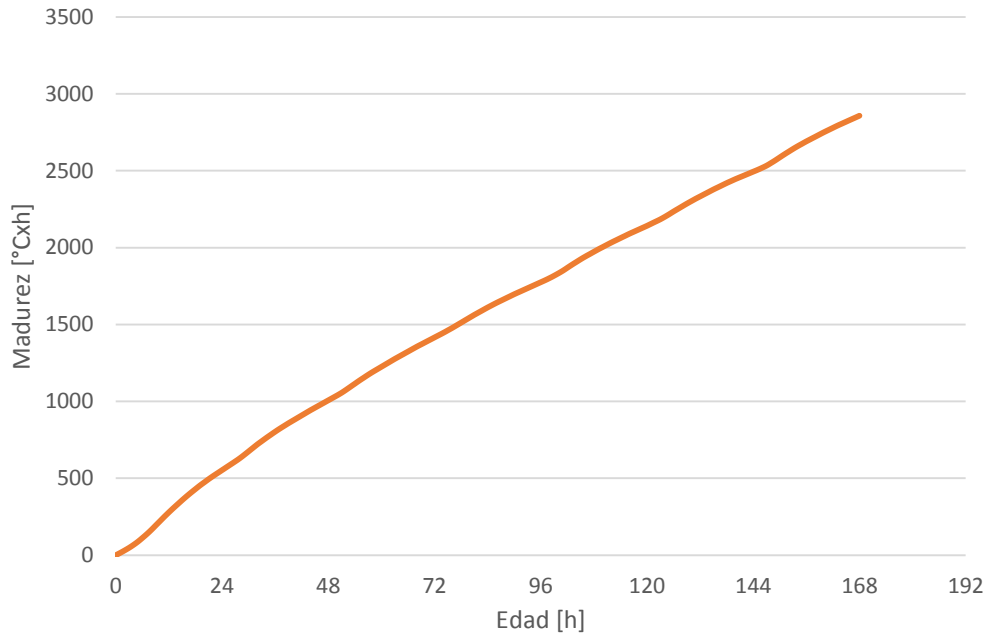


Gráfico 22: Seguimiento Madurez Instrumentación 02 Contratista 2

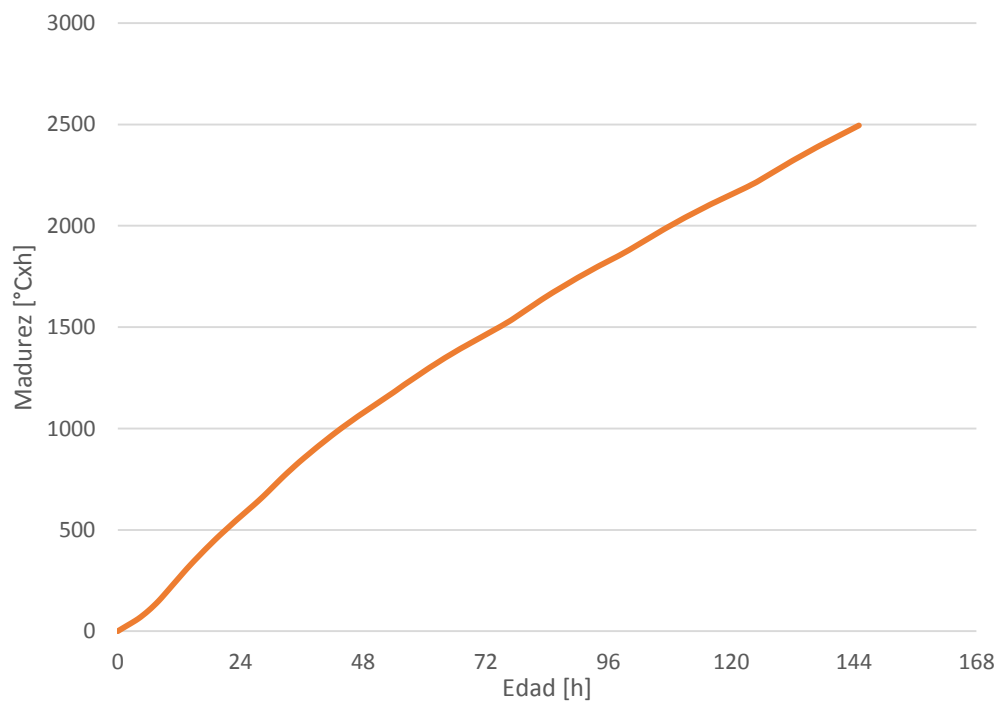


Gráfico 23: Seguimiento Madurez Instrumentación 03 Contratista 2

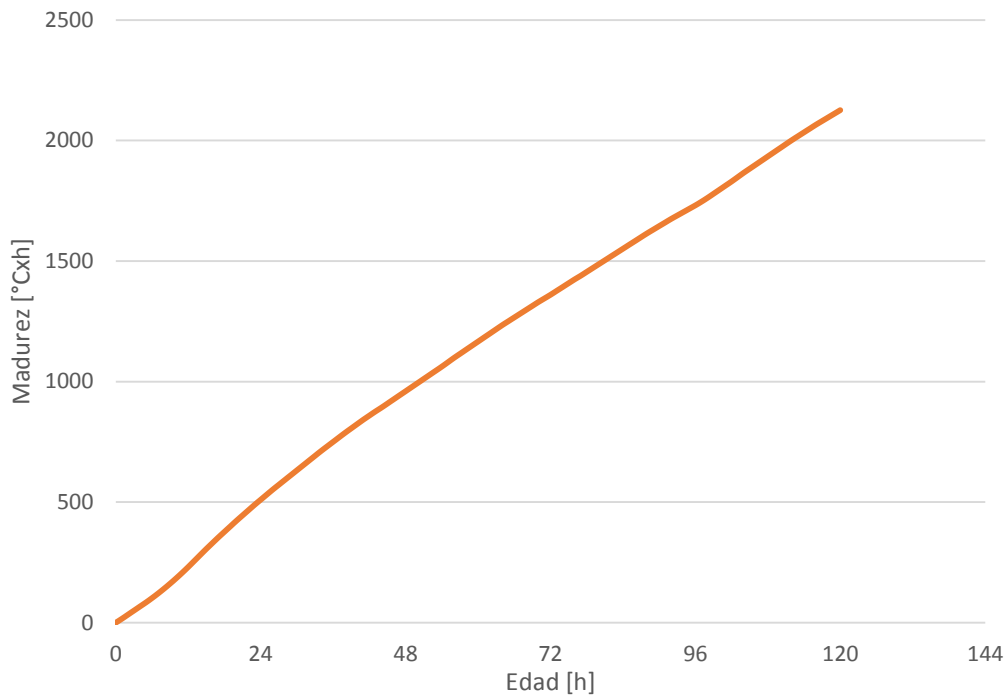


Gráfico 24: Seguimiento Madurez Instrumentación 04 Contratista 2

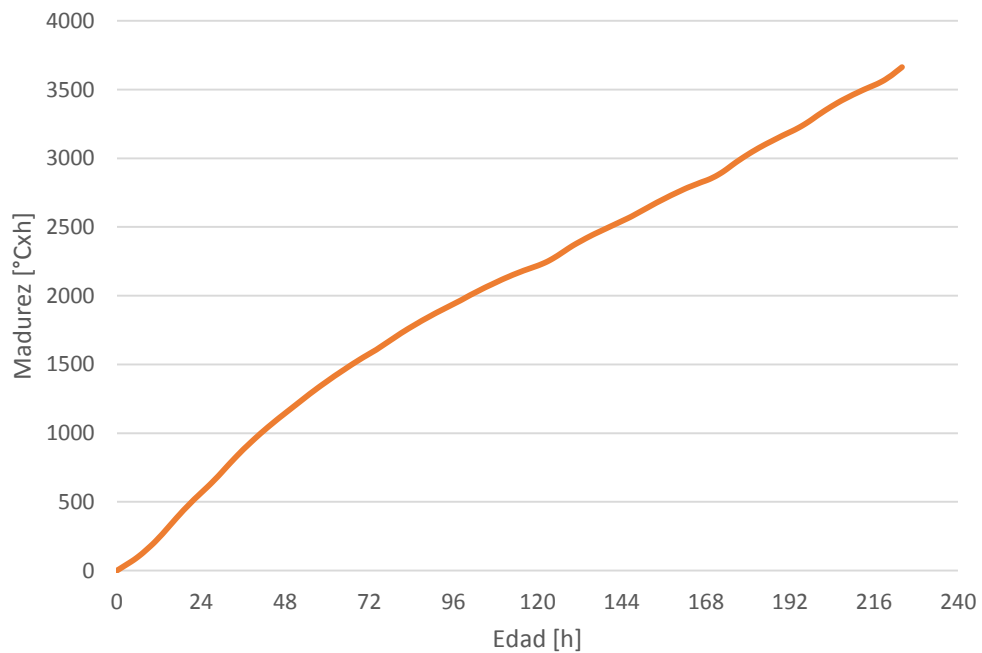


Gráfico 25: Seguimiento Madurez Instrumentación 05 Contratista 2

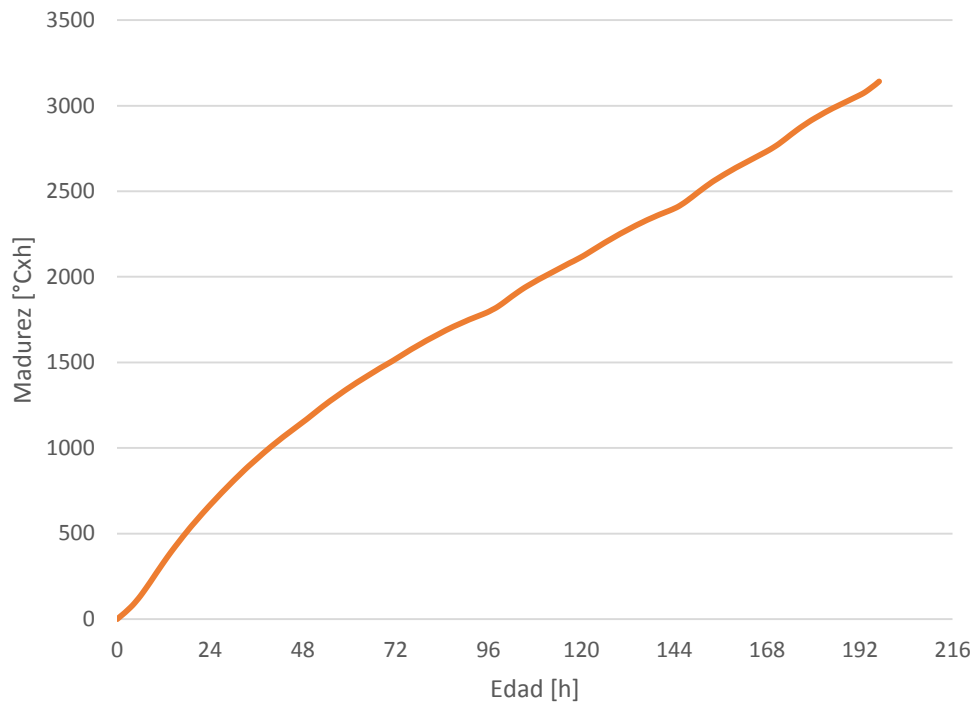
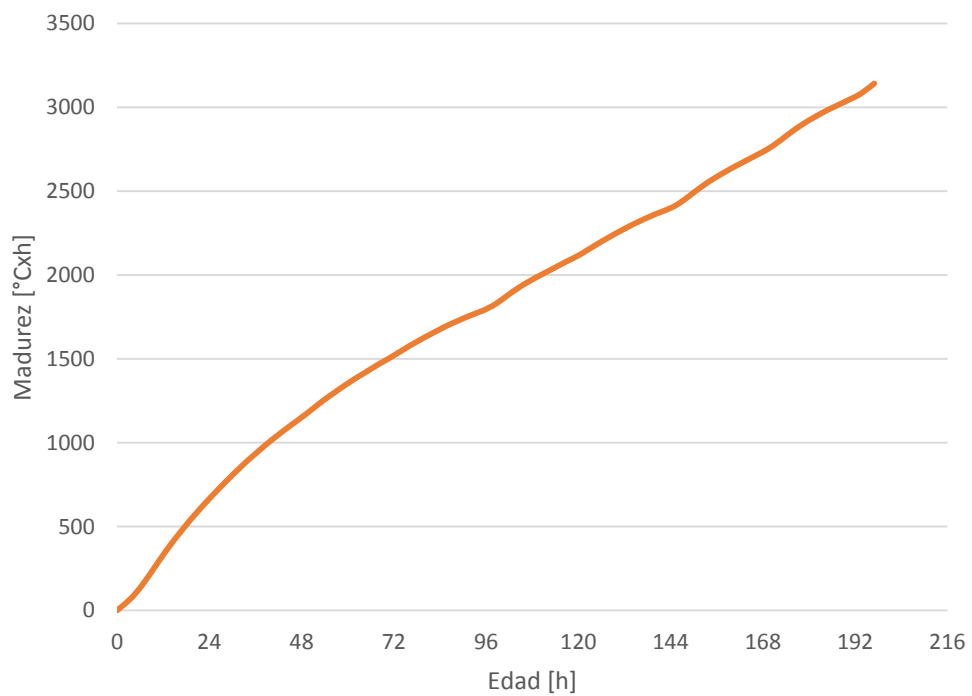


Gráfico 26: Seguimiento Madurez Instrumentación 06 Contratista 2



5.2 Evaluación de resistencia a través del método de madurez

Luego de obtener las curvas de Madurez-Resistencia para cada contratista, con su correspondiente proveedor de hormigón, es posible encontrar una madurez objetivo relacionada a la resistencia especificada de 34 MPa, señalada en 4.2.3, y además el tiempo en que se alcanzó dicha resistencia para cada instrumentación.

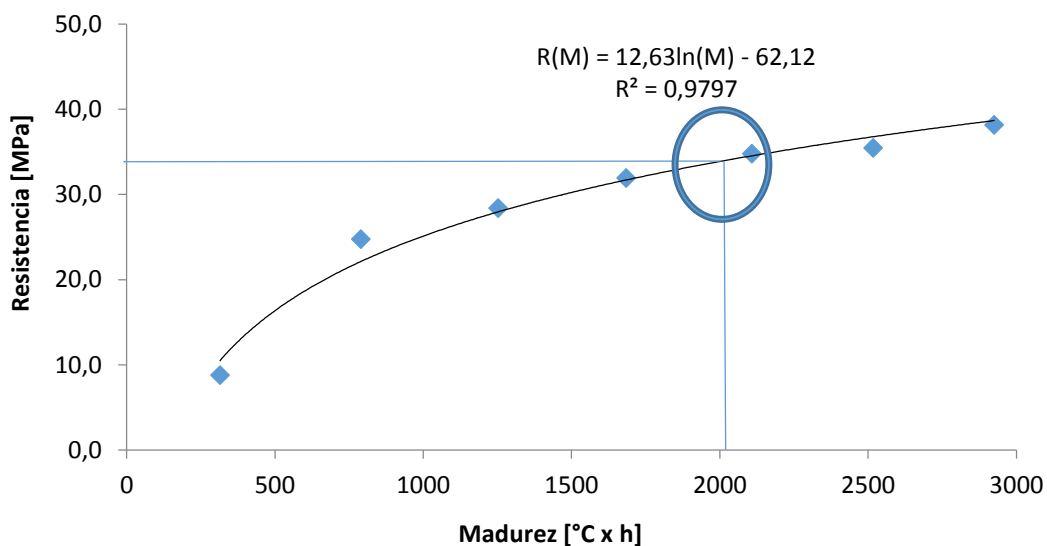
5.2.1 Madurez Objetivo

Realizando la evaluación en la curva característica de cada contratista encontrada en el punto 4.2.4.5 es posible encontrar la madurez objetivo en cada caso.

5.2.1.1 Contratista 1

De acuerdo a la (Ecuación 10), se aprecia que ésta alcanza la resistencia especificada en $M=2.019 \text{ } ^\circ\text{C}\times\text{h}$. Gráficamente:

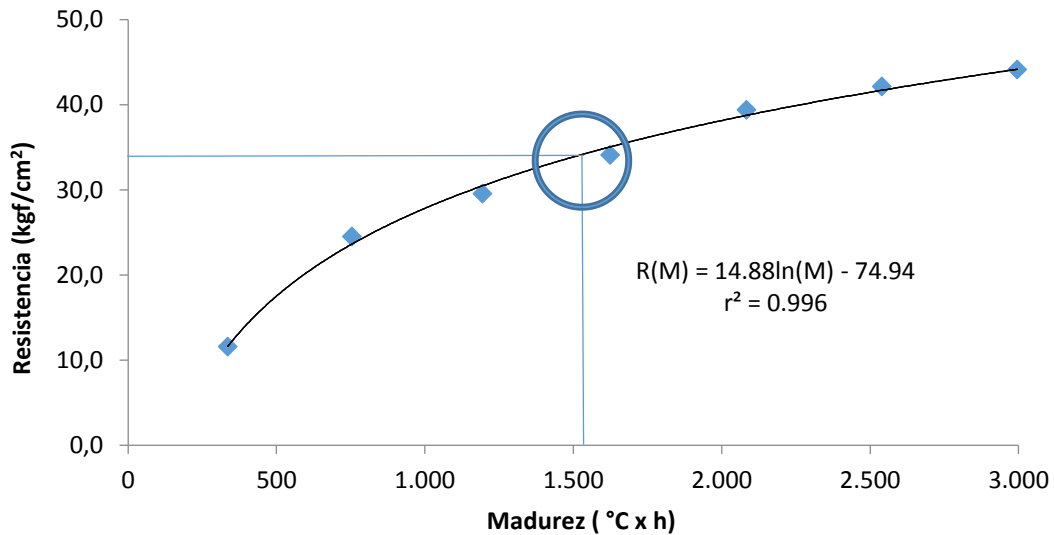
Gráfico 27: Madurez Objetivo Contratista 1



5.2.1.2 Contratista 2

Para la (Ecuación 11), se aprecia que ésta alcanza la resistencia especificada en $M=1.512 \text{ } ^\circ\text{C}\times\text{h}$. Gráficamente:

Gráfico 28: Madurez Objetivo Contratista 2



5.2.2 Tiempos medidos para alcanzar resistencia objetivo

Las tablas 3 y 4 muestran los tiempos en que se alcanzó la resistencia objetivo de 34 MPa para cada contratista. En ellas se puede observar que ambos contratistas alcanzan esta resistencia en menos de una semana desde la realización de la pavimentación. El contratista 1 alcanza la resistencia en promedio al quinto día, mientras que el contratista 2 la alcanza al tercer día.

5.2.2.1 Contratista 1

Tabla 3: Tiempo en que se alcanza resistencia objetivo Contratista 1

Instrumentación	Tiempo alcance resistencia objetivo	
	horas	días
1	122	5,1
2	119	5,0
3	152	6,3
4	134	5,6
5	128	5,3
Promedio	131	5,5

5.2.2.2 Contratista 2

Tabla 4: Tiempo en que se alcanza resistencia objetivo Contratista 2

Instrumentación	Tiempo alcance resistencia objetivo	
	horas	días
1	78	3,3
2	76	3,2
3	82	3,4
4	68	2,8
5	72	3,0
6	88	3,7
Promedio	77	3,2

5.3 Evaluación de resistencia a través de testigos

En las Tablas 5 y 6 se muestran los resultados obtenidos de la extracción de 2 testigos por cada sector instrumentado para cada contratista, de acuerdo a las consideraciones de 4.2.6 y 4.2.7. Donde (a) representa la resistencia de la probeta a la edad de ensayo expresada como tensión de rotura, (b) representa la resistencia corregida por esbeltez expresada en cilindro normal de diámetro 15 cm y altura 30 cm, y (c) representa la resistencia transformada a cubo normal de arista 20 cm. El promedio fue calculado con los resultados de la resistencia expresada en cilindro, de acuerdo a las consideraciones y metodología de trabajo para este estudio.

5.3.1 Contratista 1

Tabla 5: Resultados ensayo de compresión testigos Contratista 1

ID Testigo	Edad (días)	Diámetro Testigo (cm)	Altura Ensayo (cm)	Carga Máxima (kgf)	Resistencia a Compresión			Promedio (kgf / cm ²)
					(a) (kgf / cm ²)	(b) (kgf / cm ²)	(c) (kgf / cm ²)	
101	9	10,0	14,8	25.800	32,8	31,5	39,3	32,1
101	9	10,0	15,2	26.800	34,1	32,8	41,0	
102	9	10,0	13,9	24.500	31,2	29,6	37,0	29,5
102	9	10,0	14,3	24.200	30,8	29,4	36,7	
103	5	10,0	12,6	20.100	25,6	23,8	29,8	24,4
103	5	10,0	13,0	20.900	26,6	24,9	31,2	
104	2	10,0	16,3	15.600	19,9	19,3	24,1	19,5
104	2	10,0	17,7	15.800	20,1	19,7	24,7	
105	3	10,0	18,4	17.300	22,0	21,7	27,2	21,6
105	3	10,0	18,3	17.100	21,8	21,5	26,8	

5.3.2 Contratista 2

Tabla 6: Resultados ensayo de compresión testigos Contratista 2

ID Testigo	Edad (días)	Diámetro Testigo (cm)	Altura Ensayo (cm)	Carga Máxima (kgf)	Resistencia a Compresión			Promedio (kgf / cm ²)
					(a) (kgf / cm ²)	(b) (kgf / cm ²)	(c) (kgf / cm ²)	
C01	5	10,4	20,0	30.700	36,1	35,9	44,9	34,9
C01	5	10,4	20,7	28.900	34,0	34,0	42,5	
C02	4	10,4	20,4	28.600	33,7	33,5	41,9	33,0
C02	4	10,4	20,6	27.700	32,6	32,5	40,7	
C03	3	10,4	20,4	21.600	25,4	25,3	31,7	26,3
C03	3	10,4	20,3	23.300	27,4	27,3	34,1	
C04	7	10,4	14,7	36.700	43,2	41,1	51,4	41,4
C04	7	10,4	14,4	37.400	44,0	41,8	52,2	
C05	6	10,4	14,6	30.600	36,0	34,2	42,8	32,9
C05	6	10,4	15,7	27.900	32,8	31,6	39,4	
C06	7	10,4	14,6	35.100	41,3	39,3	49,1	38,9
C06	7	10,4	12,5	35.600	41,9	38,6	48,3	

5.4 Evaluación comparativa con testigos de concreto

De acuerdo a los resultados obtenidos por el método de madurez como los resultados de extracción de testigos, es posible realizar un comparativo de estos valores, de manera de tener un rango de diferencias. Las Tablas 7 y 8 muestran estos datos para cada contratista.

5.4.1 Contratista 1

Tabla 7: Comparativo resistencias Contratista 1

ID Testigo	Edad (días)	R Testigos (MPa)	Madurez (°CXh)	R Madurez (MPa)	R Testigos / R Madurez	(M-T)/T	M-T (MPa)
I01	9	32,1	3135	39,6	0,81	23%	7,5
I02	9	29,5	3171	39,7	0,74	35%	10,2
I03	5	24,2	1689	31,7	0,76	31%	7,5
I04	2	19,5	979	24,9	0,78	27%	5,4
I05	3	21,6	1320	28,6	0,75	33%	7,0
Promedio						30%	7,5

5.4.2 Contratista 2

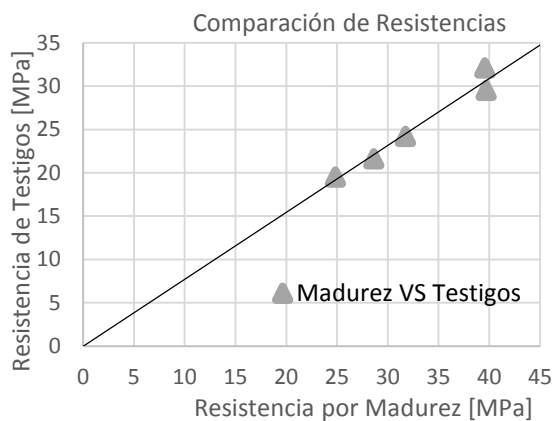
Tabla 8: Comparativo resistencias Contratista 2

ID Testigo	Edad (días)	R Testigos (MPa)	Madurez (°Cxh)	R Madurez (MPa)	R Testigos / R Madurez	(M-T)/T	M-T
C01	5	34,9	2142	39,2	0,89	12%	4,3
C02	4	33,0	1826	36,8	0,90	12%	3,8
C03	3	26,3	1360	32,4	0,81	23%	6,1
C04	7	41,4	2837	43,4	0,95	5%	2,0
C05	6	32,9	2399	40,9	0,81	24%	8,0
C06	7	38,9	2685	42,5	0,91	9%	3,6
Promedio						14%	4,6

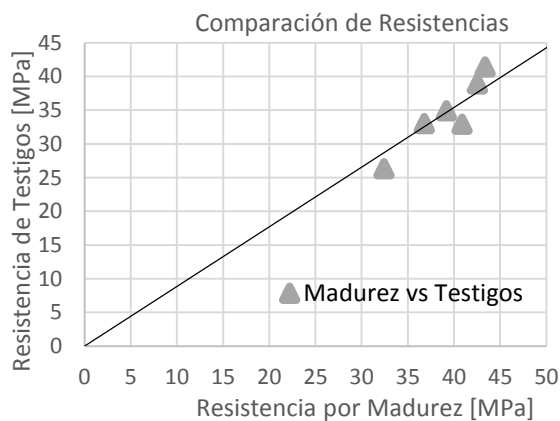
Se procedió a realizar la siguiente gráfica para observar la correlación existente entre ambas variables, por cada contratista.

Gráfico 29: Comparativo resistencias Madurez vs Testigos

(a) Contratista 1 - (b) Contratista 2



(a)



(b)

5.5 Análisis de resultados

Se observa que los perfiles térmicos desarrollados en los distintos puntos instrumentados, presentados en el punto 5.1.1, poseen un comportamiento típico alcanzando su valor máximo durante las primeras veinticuatro horas, y para los días siguientes puede apreciarse una distribución sinusoidal clásica, con valores máximos y mínimos congruentes con la temperatura ambiental durante el periodo.

Cabe mencionar que en algunos casos, como en la instrumentación C03 (Gráfico 12), se presentan anomalías respecto al comportamiento descrito anteriormente, dado que se observan tramos en que las temperaturas se mantienen constantes, lo que puede deberse a dificultades en el proceso de hidratación del cemento, donde por falta de homogeneidad en la mezcla esta se comporta de manera diferente. Otra explicación sería la posición en que se encuentra el sensor al interior del espesor de la losa de hormigón, por ejemplo si quedo en el fondo, existe un gran volumen de hormigón sobre dicho sensor, con lo cual es menos afectado en sus registros por la temperatura ambiente, y por ende los cambios de temperatura son menos abruptos.

Una vez determinada la curva característica Madurez-Resistencia correspondiente, fue posible estimar de manera sencilla y rápida la resistencia a compresión, mediante el uso del método de madurez, gracias a los datos de los sensores embebidos in-situ y registrados en el madurimetro, obteniéndose el índice de madurez y su posterior evaluación en la curva característica para cada contratista, estimando así la resistencia de acuerdo a la edad requerida.

Con lo anterior fue posible estimar la resistencia a distintas edades, acorde a las edades en que fueron ensayados los testigos desde que fue hormigonado el pavimento mediante el uso de la (Ecuación 10) para el contratista 1 y la (Ecuación 11) para el contratista 2, correlacionando el método de madurez con el ensayo de testigos.

Como se explicó anteriormente, los resultados obtenidos por la extracción y ensayo de testigos, son expresados en probetas cilíndricas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, mediante un factor corrector por esbeltez, el cual considera las correcciones geométricas necesarias. Dicho factor se establece en la norma NCh1171-1 y depende del cociente entre la altura y diámetro del testigo a ensayar.

En el caso del contratista 1, se obtuvieron diferenciales relativas de un 30%, en promedio, entre los métodos, con diferencias de resistencias de 7,5 MPa, en promedio. Para el contratista 2 las diferencias fueron más bajas, se pueden observar diferencias relativas del orden de un 14%, con diferencias de resistencia de 4,6 MPa, en promedio.

La resistencia objetivo, descrita en 5.2 corresponde a la resistencia última de diseño especificada para el proyecto, pero para el caso de un proyecto de pavimentación

la apertura a tránsito puede ser dada una vez que la resistencia sea igual o superior al 75% de la resistencia específica [22], esto es llegando a una resistencia de 26 MPa.

Evaluando en la curva característica Madurez-Resistencia para cada contratista, se obtiene que:

- Contratista 1: $M=1072$ °C·h. Esta madurez se alcanza, en promedio, a las 55 horas desde el inicio del monitoreo, o a los 2,3 días, para dar apertura a tránsito.
- Contratista 2: $M=883$ °C·h. Esta madurez se alcanza, en promedio, a las 44 horas desde el inicio del monitoreo, o a los 1,7 días, para dar apertura a tránsito.

Los resultados obtenidos por el contratista 1 y contratista 2 concuerdan con el tipo de hormigón utilizado en cada caso, donde a un nivel de confianza mayor se requiere una mayor resistencia, donde esta resistencia adicional es el resultado de una mezcla con mayor cantidad de cemento.

CAPITULO 6: COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

6.1 Uso del método de madurez en pavimentos urbanos de hormigón

El presente trabajo estudia la aplicación del método de madurez como método complementario de control de calidad del hormigón para pavimentos urbanos. La metodología de este estudio fue realizada en época invernal, durante el mes de agosto, donde las temperaturas ambientales fluctuaban en un rango desde 1 °C a 21 °C. De acuerdo a los resultados obtenidos, es posible utilizar el método de madurez para estimar la resistencia de pavimentos urbanos de hormigón, con la suficiente precisión, permitiendo su validación de acuerdo a los resultados que se tienen en 5.4, donde se observa la comparación entre las resistencias obtenidas mediante el método de madurez, y la resistencia de los testigos. Para el caso del contratista 1, se obtuvieron diferencias promedio de 30 % mientras que para el contratista 2, se tienen diferencias de 14%.

Estas diferencias no se deben a la ejecución del método de madurez y/o ensayos de laboratorio, en consideración a que el presente estudio no pretende realizar una comparación entre los hormigones utilizados, pero es posible indicar que se deben a los diferentes tipos de hormigones utilizados, en particular en lo que respecta a su nivel de confianza, en donde a mayores valores de éste nivel, se requieren dosificaciones de mayor resistencia a la compresión para elevar el promedio de las muestras y así cumplir con los requerimientos del proyecto. Por ende, en el caso de hormigón del contratista 2, corresponde a un hormigón con un diseño de mezcla mejorado o incluso más potenciado, respecto al hormigón de contratista 1, esto resulta en que el hormigón del contratista 2 llegue a la resistencia requerida en menor tiempo, pero también puede estar dado por el tipo de cemento que utiliza cada premezcladora donde el cemento del contratista 2 es más rápido que el del contratista 1, para lo cual debiese contarse con la información detallada de los materiales de cada dosificación, lo que no es considerado en profundidad en este estudio, pero es una variable importante de tener en cuenta para la ejecución de este tipo de proyectos.

Además como se ha mencionado, la resistencia de pavimentos se controla principalmente por el ensayo de vigas a flexo-tracción y el ensayo de testigos de hormigón endurecido, siendo este último el utilizado frecuentemente dado los inconvenientes que presenta la implementación del ensayo de flexo-tracción y la dispersión de sus resultados. La resistencia de testigo corresponde a la resistencia real de lo que ocurre en la estructura, en este caso el pavimento, por ende está sometido a lo que está ocurriendo insitu y no a condiciones ideales o de laboratorio, como ocurre con la resistencia potencial. Esto implica que se tenga una mayor dispersión en sus resultados, lo que frecuentemente en este tipo de proyectos, se traduce en un ajuste de la dosificación, como por ejemplo, aumentando la dosis de cemento de manera de asegurar la resistencia especificada, y así evitar caer en incumplimientos, siendo esta dosificación superior a lo que realmente se necesita.

Mediante la metodología basada en normas internacionales descritas en el capítulo 4, fue posible obtener las curvas características de madurez-resistencia para cada contratista. La validación de estas fue exitosa, respecto al cálculo de la resistencia obtenida por el método de madurez versus la resistencia determinada por medio de ensayos de resistencia a compresión de probetas cilíndricas. Esto se puede apreciar tanto en la dispersión de los puntos como en la correlación de las variables (4.2.4.5). Si bien es cierto que el presente estudio fue realizado previo a la publicación de la norma chilena de madurez NCh3565, tanto los procedimientos como los modelos utilizados corresponden a lo indicado en la norma, lo que valida aún más la metodología de desarrollo de este estudio.

De acuerdo a los resultados obtenidos en 5.2.2, la madurez objetivo relacionada a la resistencia específica del proyecto de 34 MPa, es de $M=2.019 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{h}$ para el contratista 1, y $M=1.512 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{h}$ para el contratista 2. Con estos valores fue posible obtener los tiempos necesarios para alcanzar dicha madurez y/o resistencia objetivo, y por ende en este caso a una apertura a tránsito. Se observa que el contratista 1, en promedio, demora 5 días en alcanzar dicha resistencia, mientras que el contratista 2 demora 3 días. Considerando como requisito un 75% de resistencia final, como límite de aceptación, se podría realizar la apertura a tránsito al tercer día para contratista 1 y al segundo día para el contratista 2. Lo cual es una considerable disminución respecto al periodo habitual, de 28 días, para este efecto.

Se concluye que el método de madurez en pavimentos urbanos de hormigón es adecuado para la estimación de la resistencia del hormigón in-situ, con este método es posible obtener la resistencia de manera rápida y sencilla, a edad temprana requerida, una vez obtenida la curva característica. De acuerdo a los resultados de comparación con los resultados de los ensayos a testigos, es posible validar el método, a pesar de que para un contratista las diferencias son mayores, se obtienen en promedio valores congruentes de acuerdo a la metodología aplicada, a pesar de no seguir los tiempos recomendados por la norma de testigos. Es posible utilizar un factor de mayoración que contemple este tipo de errores para el ensayo de testigos, con lo cual las diferencias en los resultados de comparación disminuirían notablemente. Por lo que su implementación ayudará a tomar decisiones en etapas tempranas, proporcionando un método relativamente rápido y no destructivo para monitorear continuamente la resistencia del hormigón, que se puede utilizar para determinar la apertura a tránsito, sin esperar los resultados de laboratorio.

6.2 Consideraciones para la implementación del método

En terreno, fue posible instrumentar cada sector señalado, lo cual es una actividad relativamente simple, pero se deben tener ciertas consideraciones o resguardos a la hora de realizarlos. Los sensores en pavimentos tienen que ser colocados de tal manera que la sección de los cables que quedan expuestos, estén bajo resguardo para que no resulten dañados o sean cortados, ya sea por ejecución de la etapa siguiente en el desarrollo del proyecto, o por desconocimiento del personal

involucrado en la construcción. El cuidado de estos permitirá un correcto y detallado registro y toma de datos.

Es importante que el personal se encuentre capacitado, tanto de la metodología del método, como de la implementación de este, y así incluirlos en el aseguramiento de la correcta realización. Tener en cuenta la posición del sensor, y que sea instalado de la misma manera en todos los sectores instrumentados, evitando generar algún error o inconsistencia en la toma de datos, como puede ser el caso de la instrumentación C03 (Gráfico 12), en donde se observa que el perfil de temperaturas tiene en algunos puntos un comportamiento anómalo a lo que ocurre en el resto de los perfiles del estudio.

Por otro lado, es necesario verificar para cada instrumentación realizada, que la dosificación de hormigón corresponda a la misma con la cual fue realizada la curva característica Madurez-Resistencia. Si esto no es así, se debe estudiar si esta tendría efectos en la relación o en caso contrario desarrollar una nueva curva para la nueva dosificación utilizada.

Además, el hormigón al ser elaborado a partir de una serie de materias primas, es susceptible a presentar variabilidad asociada a dichas materias, donde el cemento cumple un rol principal en la resistencia de la mezcla, presentando variaciones de resistencia en las distintas partidas, desde que es producido en una planta, aun si sus materias primas son extraídas de un mismo origen. También existe la variabilidad debido a la conformación de la mezcla y a los ensayos de laboratorio.

Debido a la variabilidad del cemento en cuanto a su resistencia y cómo influye en la resistencia del hormigón, sería prudente considerar un factor de seguridad para el uso del método de madurez, y conforme a lo estudiado se considera un coeficiente de minoración de la resistencia obtenida por el método. Podría considerarse que este factor de seguridad se encuentre en un rango entre 1,10 y 1,25 que debe ser estudiado con una mayor cantidad de datos, pero si se usa y evalúa comparativamente con el ensayo de testigos, se obtendría que las diferencias entre los dos métodos disminuyen considerablemente respecto a los valores que se obtienen sin esta minoración.

En el uso de esta metodología se requiere la adquisición de sensores de monitoreo continuo que son embebidos en el hormigón, ya sean con cables o inalámbricos, y que en su condición de irrecuperables corresponden a un costo por la pérdida de estos. Se debe considerar además, que la caracterización de la curva de Madurez-Resistencia para una mezcla específica tiene costos asociados; uso de sensores, uso de probetas cilíndricas, ensayo a compresión y mano de obra para estos efectos. Sin embargo los datos entregados por esta correlación, y su posterior utilización en la obtención de resistencia a edades tempranas, resulta en un ahorro significativo de costos para el proyecto, ya sea por contar con un menor número de personal para el control de calidad, por la reducción en la cantidad de probetas utilizadas, y/o por la optimización en los tiempos de construcción. Además, realizar un seguimiento de toma de datos in-situ, de manera continua tiene como

externalidad tener el conocimiento de las temperaturas del hormigón colocado, lo que podría permitir mejorar las temperaturas y cuidados en el curado, frente a alguna anomalía. Incluso existen investigaciones donde los sensores son ubicados en lugares estratégicos o críticos y con esto, por ejemplo, determinar los tiempos de aserrado de juntas siendo una alternativa de uso además de la relacionada con la apertura a tránsito.

6.3 Continuidad de estudios

Un aspecto que no fue abordado en esta investigación y que se plantea como tema importante para investigaciones futuras, es la realización de un estudio similar en verano, donde se espera que la resistencia se alcance más rápido, pero podrían existir otros factores a analizar y que se deban tener en cuenta para este tipo de proyectos.

También resulta interesante para nuevos estudios, establecer estas relaciones para temperaturas en climas más extremos, por ejemplo en el Sur de Chile, y verificar el uso de la temperatura datum para este tipo de climas más fríos.

Además de las consideraciones climáticas, se propone realizar el estudio para hormigones de distintas premezcladoras con el mismo nivel de confianza, ya sea de sólo 80% o sólo 90%, que son los más utilizados en este tipo de proyectos, de manera de evaluar a igual desempeño el comportamiento a diferentes temperaturas ambientales.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

- **Altura original:** altura del testigo antes de ser preparado para el ensayo correspondiente.
- **Altura de corte:** altura del testigo después de cortado o rectificado.
- **Curado:** proceso consistente en mantener un contenido de humedad y temperatura en un hormigón recién colocado de modo que pueda desarrollar sus propiedades.
- **Desmolde:** proceso destinado a retirar el moldaje de una estructura de hormigón.
- **Descimbre:** proceso destinado a retirar los elementos de sustención de las estructuras de hormigón (puntales, alzaprimas, entre otros).
- **Dosificación:** proporción de los distintos materiales componentes del hormigón expresada en masa o volumen, que constituyen un volumen determinado de hormigón, generalmente 1 m^3 .
- **Esbeltez del testigo:** cociente entre la altura de ensayo y su diámetro.
- **Fraguado:** cambio de estado físico que sufre la pasta de cemento desde el estado fresco hasta el endurecimiento, coincide con una elevación de temperatura.
- **Hidratación del cemento:** proceso mediante el cual este material, al mezclarse con el agua, reacciona y empieza a generar enlaces o estructuras cristalinas, que lo convierten en un material aglutinante, generando propiedades mecánicas útiles en las aplicaciones estructurales.
- **Resistencia del hormigón a la edad de ensayo del testigo:** valor expresado como resistencia cubica o cilíndrica a la fecha de ensayo, aplicando solamente la corrección por esbeltez de se establece en la norma NCh1171-1.
- **Resistencia potencial:** resistencia de una muestra de hormigón extraída según NCh171, confeccionada según NCh1017, ensayada según NCh1037 y expresada como resistencia a los 28 días, cuyas condiciones de curado, edad y grado de compactación están normalizadas según NCh170, siendo diferentes de las aplicadas en obra.
- **Resistencia real:** resistencia de un testigo de hormigón extraído de un elemento y ensayado según NCh1171-1 y expresado como resistencia según NCh170,

que corresponde a una estimación de la resistencia del hormigón en lugar de extracción sin corregir por efecto del curado, la edad o el grado de compactación.

- **Testigo:** probeta extraída de un elemento de hormigón endurecido, de acuerdo al procedimiento establecido en NCh1171-1.
- **Velocidad de hidratación del cemento:** corresponde a la variación de la concentración de los componentes del cemento hasta transformarse en la pasta de cemento aglutinante, el tiempo en el que ocurra dependerá además del tipo de cemento utilizado y su composición; de la finura del molido, la cantidad de agua agregada y las temperaturas de los componentes al momento de mezclarlos.

BIBLIOGRAFIA

1. Ministerio de Obras Públicas. Dirección de Vialidad. 2020. Dimensionamiento y Características de la Red Vial Nacional 2019. [En línea] <<http://www.vialidad.cl/areasdevialidad/gestionvial/Documents/RedVialNacional2019.pdf>> [Consulta: 13/04/2020].
2. 2018. Desarrollo de los pavimentos en Chile: Alta tecnología. [En línea] Revista EBM Construcción. Noviembre 2018. <<http://www.emb.cl/construccion/articulo.mvc?xid=4208&ni=desarrollo-de-los-pavimentos-en-chile-alta-tecnologia>> [Consulta: 13/04/2020].
3. Instituto Nacional de Normalización: INN. 2012. Hormigón – Testigos de hormigón endurecido - Parte 1: Extracción y ensayo). NCh1171/1:2012.
4. Instituto Nacional de Normalización: INN. 2012. Hormigón – Testigos de hormigón endurecido - Parte 2: Evaluación de resultados de resistencia mecánica. NCh1171/1:2012.
5. Kraljevich F. 2020. Maquinarias: Madurímetros. Revista Hormigón al día (76):10-15.
6. Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones. 2014. Anuncian inicio de obras del Corredor Vicuña Mackenna. [En línea] <<https://mtt.gob.cl/archivos/8943>> [Consulta: 22/03/2020].
7. Instituto Nacional de Normalización: INN. 2016. Hormigón – Requisitos generales. NCh170:2016.
8. Neville, Adam. M. “Properties of concrete”. Londres, Pitman Publishing, 1975. 532p.
9. Ministerio de Vivienda y Urbanismo. 2018. Manual Obras viales, Pavimentación y Aguas Lluvias. [En línea] <http://pavimentacion.metropolitana.minvu.cl/doc/MPALL/MOV_SERVIU_2018v1.pdf>
10. Servicio de Vivienda y Urbanismo Región Metropolitana. 2020. Manual de Obras de Vialidad, Pavimentación y Aguas Lluvias [En línea] <http://pavimentacion.metropolitana.minvu.cl/mpall3.asp>
11. Chauveic J. Estudio Experimental de Propiedades Mecánicas de Hormigones con Árido Reciclado Mediante la Modificación del Método de Mezclado del Hormigón. Memoria. Santiago, Chile. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, 2011.
12. Carino, N. and Lew, H., “The Maturity Method: From Theory to Application,” National Institute of Standards and technology, Washington, DC, 2001.
13. Jeria. R. Ministerio de Obras Públicas. Dirección de Vialidad. Presentación Madurez. [En línea] <http://www.vialidad.cl/areasdevialidad/laboratorio_nacional/MaterialCursos/Madurez%20RJ.pdf> [Consulta: 25/03/2020].
14. Brante G. 2016. Seguimiento y evaluación del control de resistencia en pavimentos de hormigón mediante la aplicación de la metodología de madurez. Revista Obras Públicas (43): 36-39.
15. Holmberg A. 2017. El valor de la madurez. Revista Hormigón al día (67): 4.

16. Carino, N. J. "Chapter 5: The Maturity Method." Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, 2nd ed. CRC Press LLC, Boca Raton, FL, 2004.
17. Soutsos, M., Kanavaris, F., & Hatzitheodorou, A. 2018. Critical analysis of strength estimates from maturity functions. Case Studies in Construction Materials. Queen's University Belfast. [En línea] <<https://core.ac.uk/download/pdf/160110784.pdf>> [Consulta: 15/03/2020].
18. Instituto Nacional de Normalización: INN. 2018. Hormigón – Estimación de la Resistencia Mecánica – Método de la Madurez. NCh3565:2018.
19. American Society for testing and Material: ASTM. 2011. Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method. ASTM 1074:2011.
20. Instituto Nacional de Normalización: INN. 2009. Hormigón – Confección en obra y curado de probetas para ensayos de compresión, tracción por flexión y por hendimiento NCh1017:2009.
21. Instituto Nacional de Normalización: INN. 2009. Hormigón – Preparación de mezclas para ensayos en laboratorio NCh1018:2009.
22. Instituto Nacional de Normalización: INN. 2009. Hormigón – Ensayo de compresión de probetas cúbicas y cilíndricas. NCh1037:2009.
23. Instituto Chileno del Hormigón. 2019. Análisis comparativos de resultados de ensayos de resistencia a la compresión cilíndrica y resistencia a la flexotracción de hormigones en la Región Metropolitana de Santiago de Chile. [En línea] <<https://ich.cl/pavimentando/documentos-pavimentando/analisis-comparativos-de-resultados-de-ensayos-de-resistencia-a-la-compresion-cilindrica-y-resistencia-a-la-flexotraccion-de-hormigones-en-la-region-metropolitana-de-santiago-de-chile/>> [Consulta: 13/07/2020].
24. Instituto Chileno del Hormigón. 2018. Oportunidades y Aplicación del concepto de la Madurez en pavimentos de concreto. [En línea] <<https://ich.cl/pavimentando/documentos-pavimentando/oportunidades-y-aplicacion-del-concepto-de-la-madurez-en-pavimentos-de-concreto/>> [Consulta 08/08/2019].

ANEXO 1

DATOS CONFECCION CURVA MADUREZ-RESISTENCIA

1.1 Contratista 1

1.1.1 Datos Madurez

Tabla 9: Datos madurez Contratista 1

Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)
0	22	0
1	18	18
2	17	35
3	15	52
4	14	67
5	14	81
6	13	94
7	13	107
8	13	120
9	12	132
10	12	144
11	12	156
12	12	168
13	12	180
14	12	192
15	12	204
16	12	216
17	11	228
18	11	239
19	10	250
20	11	261
21	12	272
22	13	284
23	14	297
24	17	313
25	18	330
26	19	349
27	20	369
28	20	389
29	20	409
30	20	429
31	20	449
32	20	469
33	20	489
34	20	509
35	20	529
36	20	549
37	20	569
38	20	589
39	20	609
40	20	629
41	20	649
42	20	669
43	20	689
44	20	709
45	20	729
46	20	749
47	20	769
48	20	789
49	20	809
50	20	829
51	20	849
52	20	869
53	20	889
54	20	909
55	20	929
56	20	949
57	20	969
58	20	989
59	20	1009
60	20	1029
61	20	1049
62	20	1069
63	19	1088
64	19	1107
65	19	1126
66	19	1145
67	19	1164
68	17	1182
69	16	1199
70	17	1216
71	18	1234
72	18	1252
73	18	1270
74	18	1288
75	18	1306
76	18	1324
77	18	1342
78	18	1360
79	18	1377
80	18	1395
81	18	1413
82	18	1431
83	18	1449
84	18	1467
85	18	1485
86	18	1503
87	18	1521
88	18	1539
89	18	1557
90	18	1575
91	18	1593
92	18	1611
93	18	1629
94	18	1647
95	18	1665
96	18	1683
97	18	1701
98	18	1719
99	18	1737
100	18	1755
101	18	1773
102	18	1791
103	18	1809
104	18	1827
105	18	1845
106	18	1863
107	18	1881
108	18	1899
109	18	1917
110	18	1935
111	18	1953
112	18	1971
113	17	1988

Tabla 9: Datos madurez Contratista 1(continuación)

Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)
114	17	2005	166	17	2889	218	17	3779
115	17	2022	167	17	2906	219	17	3796
116	17	2039	168	17	2923	220	17	3813
117	17	2056	169	17	2940	221	17	3830
118	17	2073	170	17	2957	222	17	3847
119	17	2090	171	17	2974	223	17	3864
120	17	2107	172	17	2991	224	17	3881
121	17	2124	173	17	3008	225	17	3898
122	17	2141	174	17	3025	226	17	3915
123	17	2158	175	17	3042	227	17	3932
124	17	2175	176	17	3059	228	17	3949
125	17	2192	177	17	3076	229	17	3966
126	17	2209	178	17	3093	230	17	3983
127	17	2226	179	17	3110	231	17	4000
128	17	2243	180	17	3127	232	17	4017
129	17	2260	181	17	3144	233	17	4034
130	17	2277	182	18	3161	234	17	4051
131	17	2294	183	18	3179	235	17	4068
132	17	2311	184	18	3197	236	17	4085
133	17	2328	185	18	3215	237	17	4102
134	17	2345	186	18	3233	238	17	4119
135	17	2362	187	18	3251	239	17	4136
136	17	2379	188	17	3269	240	17	4153
137	17	2396	189	17	3286	241	17	4170
138	17	2413	190	17	3303	242	17	4187
139	17	2430	191	17	3320	243	17	4204
140	17	2447	192	17	3337	244	17	4221
141	17	2464	193	17	3354	245	17	4238
142	17	2481	194	17	3371	246	17	4255
143	17	2498	195	17	3388	247	17	4272
144	17	2515	196	17	3405	248	17	4289
145	17	2532	197	17	3422	249	17	4306
146	17	2549	198	17	3439	250	17	4323
147	17	2566	199	17	3456	251	17	4340
148	17	2583	200	17	3473	252	17	4357
149	17	2600	201	17	3490	253	17	4374
150	17	2617	202	17	3507	254	17	4391
151	17	2634	203	17	3524	255	17	4408
152	17	2651	204	17	3541	256	17	4425
153	17	2668	205	17	3558	257	17	4442
154	17	2685	206	17	3575	258	17	4459
155	17	2702	207	17	3592	259	17	4476
156	17	2719	208	17	3609	260	17	4493
157	17	2736	209	17	3626	261	17	4510
158	17	2753	210	17	3643	262	17	4527
159	17	2770	211	17	3660	263	17	4544
160	17	2787	212	17	3677	264	17	4561
161	17	2804	213	17	3694	265	17	4578
162	17	2821	214	17	3711	266	17	4595
163	17	2838	215	17	3728	267	17	4612
164	17	2855	216	17	3745	268	17	4629
165	17	2872	217	17	3762	269	17	4646

Tabla 9: Datos madurez Contratista 1(continuación)

Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)
270	17	4663	322	17	5546	374	17	6430
271	17	4680	323	17	5563	375	17	6447
272	17	4697	324	17	5580	376	17	6464
273	17	4714	325	17	5597	377	17	6481
274	17	4731	326	17	5614	378	17	6498
275	17	4748	327	17	5631	379	17	6515
276	17	4765	328	17	5648	380	17	6532
277	17	4782	329	17	5665	381	17	6549
278	17	4799	330	17	5682	382	17	6566
279	17	4816	331	17	5699	383	17	6583
280	17	4833	332	17	5716	384	17	6600
281	17	4850	333	17	5733	385	17	6617
282	17	4867	334	17	5750	386	17	6634
283	17	4884	335	17	5767	387	17	6651
284	17	4901	336	17	5784	388	17	6668
285	17	4918	337	17	5801	389	17	6685
286	17	4935	338	17	5818	390	17	6702
287	17	4952	339	17	5835	391	17	6719
288	17	4969	340	17	5852	392	17	6736
289	17	4986	341	17	5869	393	17	6753
290	17	5003	342	17	5886	394	17	6770
291	17	5020	343	17	5903	395	17	6787
292	17	5037	344	17	5920	396	17	6804
293	17	5054	345	17	5937	397	17	6821
294	17	5071	346	17	5954	398	17	6838
295	17	5088	347	17	5971	399	17	6855
296	17	5105	348	17	5988	400	17	6872
297	17	5122	349	17	6005	401	17	6889
298	17	5139	350	17	6022	402	17	6906
299	17	5156	351	17	6039	403	17	6923
300	17	5173	352	17	6056	404	17	6940
301	17	5190	353	17	6073	405	17	6957
302	17	5207	354	17	6090	406	17	6974
303	17	5224	355	17	6107	407	17	6991
304	17	5241	356	17	6124	408	17	7008
305	17	5258	357	17	6141	409	17	7025
306	17	5275	358	17	6158	410	17	7042
307	17	5292	359	17	6175	411	17	7059
308	17	5309	360	17	6192	412	17	7076
309	17	5325	361	17	6209	413	17	7093
310	17	5342	362	17	6226	414	17	7110
311	17	5359	363	17	6243	415	17	7127
312	17	5376	364	17	6260	416	17	7144
313	17	5393	365	17	6277	417	17	7161
314	17	5410	366	17	6294	418	17	7178
315	17	5427	367	17	6311	419	17	7195
316	17	5444	368	17	6328	420	17	7212
317	17	5461	369	17	6345	421	17	7229
318	17	5478	370	17	6362	422	17	7246
319	17	5495	371	17	6379	423	17	7263
320	17	5512	372	17	6396	424	17	7280
321	17	5529	373	17	6413	425	17	7297

Tabla 9: Datos madurez Contratista 1(continuación)

Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)
426	17	7314	478	17	8198	530	17	9082
427	17	7331	479	17	8215	531	17	9099
428	17	7348	480	17	8232	532	17	9116
429	17	7365	481	17	8249	533	17	9133
430	17	7382	482	17	8266	534	17	9150
431	17	7399	483	17	8283	535	17	9167
432	17	7416	484	17	8300	536	17	9184
433	17	7433	485	17	8317	537	17	9201
434	17	7450	486	17	8334	538	17	9218
435	17	7467	487	17	8351	539	17	9235
436	17	7484	488	17	8368	540	17	9252
437	17	7501	489	17	8385	541	17	9269
438	17	7518	490	17	8402	542	17	9286
439	17	7535	491	17	8419	543	17	9303
440	17	7552	492	17	8436	544	17	9320
441	17	7569	493	17	8453	545	17	9337
442	17	7586	494	17	8470	546	17	9354
443	17	7603	495	17	8487	547	17	9371
444	17	7620	496	17	8504	548	17	9388
445	17	7637	497	17	8521	549	17	9405
446	17	7654	498	17	8538	550	17	9421
447	17	7671	499	17	8555	551	17	9438
448	17	7688	500	17	8572	552	17	9455
449	17	7705	501	17	8589	553	17	9472
450	17	7722	502	17	8606	554	17	9489
451	17	7739	503	17	8623	555	17	9506
452	17	7756	504	17	8640	556	17	9523
453	17	7773	505	17	8657	557	17	9540
454	17	7790	506	17	8674	558	17	9557
455	17	7807	507	17	8691	559	17	9574
456	17	7824	508	17	8708	560	17	9591
457	17	7841	509	17	8725	561	17	9608
458	17	7858	510	17	8742	562	17	9625
459	17	7875	511	17	8759	563	17	9642
460	17	7892	512	17	8776	564	17	9659
461	17	7909	513	17	8793	565	17	9676
462	17	7926	514	17	8810	566	17	9693
463	17	7943	515	17	8827	567	17	9710
464	17	7960	516	17	8844	568	17	9727
465	17	7977	517	17	8861	569	17	9744
466	17	7994	518	17	8878	570	17	9761
467	17	8011	519	17	8895	571	17	9778
468	17	8028	520	17	8912	572	17	9795
469	17	8045	521	17	8929	573	17	9812
470	17	8062	522	17	8946	574	17	9829
471	17	8079	523	17	8963	575	17	9846
472	17	8096	524	17	8980	576	17	9863
473	17	8113	525	17	8997	577	17	9880
474	17	8130	526	17	9014	578	17	9897
475	17	8147	527	17	9031	579	17	9914
476	17	8164	528	17	9048	580	17	9931
477	17	8181	529	17	9065	581	17	9948

Tabla 9: Datos madurez Contratista 1(continuación)

Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)
582	17	9965
583	17	9982
584	17	9999
585	17	10016
586	17	10033
587	17	10050
588	17	10067
589	17	10084
590	17	10101
591	17	10118
592	17	10135
593	17	10152
594	17	10169
595	17	10186
596	17	10203
597	17	10220
598	17	10237
599	17	10254
600	17	10271
601	17	10288
602	17	10305
603	17	10322
604	17	10339
605	17	10356
606	17	10373
607	17	10390
608	17	10407
609	17	10424
610	17	10441
611	17	10458
612	17	10475

Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)
613	17	10492
614	17	10509
615	17	10526
616	17	10543
617	17	10560
618	17	10577
619	17	10594
620	17	10611
621	17	10628
622	17	10645
623	17	10662
624	17	10679
625	17	10696
626	17	10713
627	17	10730
628	17	10747
629	17	10764
630	17	10781
631	17	10798
632	17	10815
633	17	10832
634	17	10849
635	17	10866
636	17	10883
637	17	10900
638	17	10917
639	17	10934
640	17	10951
641	17	10968
642	17	10985
643	17	11002

Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)
644	17	11019
645	17	11036
646	17	11053
647	17	11070
648	17	11087
649	17	11104
650	17	11121
651	17	11138
652	17	11155
653	17	11172
654	17	11189
655	17	11206
656	17	11223
657	17	11240
658	17	11257
659	17	11274
660	17	11291
661	17	11308
662	17	11325
663	17	11342
664	17	11359
665	17	11376
666	17	11393
667	17	11410
668	17	11427
669	17	11444
670	17	11461
671	17	11478
672	17	11495

1.1.2 Datos Resistencia a compresión

Tabla 10: Resultados Compresión Cilindros Contratista 1

Edad (días)	Edad (h)	Densidad (kg/m ³)	Res. Cil. 15 cm. (Mpa)	Res. Cúb. 20 cm. (MPa)	FlexoTracción (Mpa)
1	24	2430	8,9	11,1	1,4
1	24	2420	8,7	10,9	1,4
2	48	2430	24,6	29,6	3,8
2	48	2430	24,9	29,9	3,8
3	72	2420	28,5	33,5	4,3
3	72	2400	28,3	33,3	4,3
4	96	2420	32,5	37,5	4,8
4	96	2420	31,4	36,4	4,7
5	120	2430	34,8	39,8	5,1
5	120	2430	34,8	39,8	5,1
6	144	2430	35,3	40,3	5,2
6	144	2420	35,6	40,6	5,2
7	168	2430	37,9	42,9	5,5
7	168	2420	38,4	43,4	5,6
14	336	2410	40,0	45,0	5,8
14	336	2430	41,7	46,7	6,0
28	672	2410	46,9	51,9	6,7
28	672	2410	47,0	52,0	6,7

1.2 Contratista 2

1.2.1 Datos Madurez

Tabla 11: Datos madurez Contratista 2

Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)
0	13	0	16	13	239	32	17	445
1	13	13	17	13	252	33	18	463
2	12	25	18	13	265	34	18	481
3	13	38	19	12	277	35	19	500
4	14	51	20	12	289	36	19	519
5	16	66	21	12	301	37	19	538
6	17	82	22	12	313	38	20	558
7	17	99	23	11	325	39	20	578
8	17	116	24	11	336	40	20	598
9	17	133	25	11	347	41	20	618
10	16	150	26	12	358	42	20	638
11	16	166	27	12	370	43	20	658
12	15	182	28	14	383	44	19	677
13	15	197	29	15	397	45	19	696
14	14	211	30	16	412	46	19	715
15	14	225	31	17	428	47	19	734

Tabla 11: Datos madurez Contratista 2(continuación)

Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)
48	19	753	100	18	1694	152	19	2690
49	18	771	101	19	1712	153	19	2709
50	18	789	102	19	1732	154	19	2728
51	18	807	103	18	1750	155	19	2747
52	18	825	104	18	1768	156	19	2766
53	18	843	105	18	1786	157	19	2785
54	18	861	106	20	1806	158	19	2804
55	19	879	107	20	1826	159	19	2823
56	19	898	108	20	1846	160	19	2842
57	19	917	109	20	1866	161	19	2861
58	19	936	110	20	1886	162	19	2880
59	19	955	111	20	1906	163	19	2899
60	19	974	112	20	1926	164	19	2918
61	19	993	113	20	1946	165	19	2937
62	19	1012	114	20	1966	166	19	2956
63	18	1031	115	20	1986	167	19	2975
64	18	1049	116	20	2006	168	19	2994
65	18	1067	117	19	2025	169	19	3013
66	18	1085	118	19	2044	170	19	3032
67	18	1103	119	19	2063	171	19	3051
68	18	1121	120	19	2082	172	19	3070
69	18	1139	121	19	2101	173	19	3089
70	18	1157	122	19	2120	174	19	3108
71	18	1175	123	19	2139	175	19	3127
72	17	1193	124	19	2158	176	19	3146
73	17	1210	125	19	2177	177	19	3165
74	17	1227	126	19	2196	178	19	3184
75	18	1244	127	19	2215	179	19	3203
76	18	1262	128	19	2234	180	19	3222
77	18	1280	129	19	2253	181	19	3241
78	18	1298	130	19	2272	182	19	3260
79	18	1316	131	19	2291	183	19	3279
80	18	1334	132	19	2310	184	19	3298
81	18	1352	133	19	2329	185	19	3317
82	18	1370	134	19	2348	186	19	3336
83	18	1388	135	19	2367	187	19	3355
84	18	1406	136	19	2386	188	19	3374
85	18	1424	137	19	2405	189	19	3393
86	18	1442	138	19	2424	190	19	3412
87	18	1460	139	19	2443	191	19	3431
88	18	1478	140	19	2462	192	19	3450
89	18	1496	141	19	2481	193	19	3469
90	18	1514	142	19	2500	194	19	3488
91	18	1532	143	19	2519	195	18	3506
92	18	1550	144	19	2538	196	18	3524
93	18	1568	145	19	2557	197	18	3542
94	18	1586	146	19	2576	198	16	3559
95	18	1604	147	19	2595	199	16	3575
96	18	1622	148	19	2614	200	16	3591
97	18	1640	149	19	2633	201	16	3607
98	18	1658	150	19	2652	202	16	3623
99	18	1676	151	19	2671	203	16	3639

Tabla 11: Datos madurez Contratista 2(continuación)

Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)
204	17	3656	256	17	4540	308	17	5423
205	17	3673	257	17	4557	309	17	5440
206	17	3690	258	17	4574	310	17	5457
207	17	3707	259	17	4591	311	17	5474
208	17	3724	260	17	4608	312	17	5491
209	17	3741	261	17	4625	313	17	5508
210	17	3758	262	17	4642	314	17	5525
211	17	3775	263	17	4659	315	17	5542
212	17	3792	264	17	4676	316	17	5559
213	17	3809	265	17	4693	317	17	5576
214	17	3826	266	17	4710	318	17	5593
215	17	3843	267	17	4727	319	17	5610
216	17	3860	268	17	4744	320	17	5627
217	17	3877	269	17	4761	321	17	5644
218	17	3894	270	17	4778	322	17	5661
219	17	3911	271	17	4795	323	17	5678
220	17	3928	272	17	4812	324	17	5695
221	17	3945	273	17	4829	325	17	5712
222	17	3962	274	17	4846	326	17	5729
223	17	3979	275	17	4863	327	17	5746
224	17	3996	276	17	4880	328	17	5763
225	17	4013	277	17	4897	329	17	5780
226	17	4030	278	17	4914	330	17	5797
227	17	4047	279	17	4931	331	17	5814
228	17	4064	280	17	4948	332	17	5831
229	17	4081	281	17	4965	333	17	5848
230	17	4098	282	17	4982	334	17	5865
231	17	4115	283	17	4999	335	17	5882
232	17	4132	284	17	5016	336	17	5899
233	17	4149	285	17	5033	337	17	5916
234	17	4166	286	17	5050	338	17	5933
235	17	4183	287	17	5067	339	17	5950
236	17	4200	288	17	5084	340	17	5967
237	17	4217	289	17	5101	341	17	5984
238	17	4234	290	17	5118	342	17	6001
239	17	4251	291	17	5135	343	17	6018
240	17	4268	292	17	5152	344	17	6035
241	17	4285	293	17	5169	345	17	6052
242	17	4302	294	17	5186	346	17	6069
243	17	4319	295	17	5202	347	17	6086
244	17	4336	296	17	5219	348	17	6103
245	17	4353	297	17	5236	349	17	6120
246	17	4370	298	17	5253	350	17	6137
247	17	4387	299	17	5270	351	17	6154
248	17	4404	300	17	5287	352	17	6171
249	17	4421	301	17	5304	353	17	6188
250	17	4438	302	17	5321	354	17	6205
251	17	4455	303	17	5338	355	17	6222
252	17	4472	304	17	5355	356	17	6239
253	17	4489	305	17	5372	357	17	6256
254	17	4506	306	17	5389	358	17	6273
255	17	4523	307	17	5406	359	17	6290

Tabla 11: Datos madurez Contratista 2(continuación)

Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)
360	17	6307	412	17	7191	464	17	8075
361	17	6324	413	17	7208	465	17	8092
362	17	6341	414	17	7225	466	17	8109
363	17	6358	415	17	7242	467	17	8126
364	17	6375	416	17	7259	468	17	8143
365	17	6392	417	17	7276	469	17	8160
366	17	6409	418	17	7293	470	17	8177
367	17	6426	419	17	7310	471	17	8194
368	17	6443	420	17	7327	472	17	8211
369	17	6460	421	17	7344	473	17	8228
370	17	6477	422	17	7361	474	17	8245
371	17	6494	423	17	7378	475	17	8262
372	17	6511	424	17	7395	476	17	8279
373	17	6528	425	17	7412	477	17	8296
374	17	6545	426	17	7429	478	17	8313
375	17	6562	427	17	7446	479	17	8330
376	17	6579	428	17	7463	480	17	8347
377	17	6596	429	17	7480	481	17	8364
378	17	6613	430	17	7497	482	17	8381
379	17	6630	431	17	7514	483	17	8398
380	17	6647	432	17	7531	484	17	8415
381	17	6664	433	17	7548	485	17	8432
382	17	6681	434	17	7565	486	17	8449
383	17	6698	435	17	7582	487	17	8466
384	17	6715	436	17	7599	488	17	8483
385	17	6732	437	17	7616	489	17	8500
386	17	6749	438	17	7633	490	17	8517
387	17	6766	439	17	7650	491	17	8534
388	17	6783	440	17	7667	492	17	8551
389	17	6800	441	17	7684	493	17	8568
390	17	6817	442	17	7701	494	17	8585
391	17	6834	443	17	7718	495	17	8602
392	17	6851	444	17	7735	496	17	8619
393	17	6868	445	17	7752	497	17	8636
394	17	6885	446	17	7769	498	17	8653
395	17	6902	447	17	7786	499	17	8670
396	17	6919	448	17	7803	500	17	8687
397	17	6936	449	17	7820	501	17	8704
398	17	6953	450	17	7837	502	17	8721
399	17	6970	451	17	7854	503	17	8738
400	17	6987	452	17	7871	504	17	8755
401	17	7004	453	17	7888	505	17	8772
402	17	7021	454	17	7905	506	17	8789
403	17	7038	455	17	7922	507	17	8806
404	17	7055	456	17	7939	508	17	8823
405	17	7072	457	17	7956	509	17	8840
406	17	7089	458	17	7973	510	17	8857
407	17	7106	459	17	7990	511	17	8874
408	17	7123	460	17	8007	512	17	8891
409	17	7140	461	17	8024	513	17	8908
410	17	7157	462	17	8041	514	17	8925
411	17	7174	463	17	8058	515	17	8942

Tabla 11: Datos madurez Contratista 2(continuación)

Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)
516	17	8959	568	17	9842	620	17	10726
517	17	8976	569	17	9859	621	17	10743
518	17	8993	570	17	9876	622	17	10760
519	17	9010	571	17	9893	623	17	10777
520	17	9027	572	17	9910	624	17	10794
521	17	9044	573	17	9927	625	17	10811
522	17	9061	574	17	9944	626	17	10828
523	17	9078	575	17	9961	627	17	10845
524	17	9095	576	17	9978	628	17	10862
525	17	9112	577	17	9995	629	17	10879
526	17	9129	578	17	10012	630	17	10896
527	17	9146	579	17	10029	631	17	10913
528	17	9163	580	17	10046	632	17	10930
529	17	9180	581	17	10063	633	17	10947
530	17	9197	582	17	10080	634	17	10964
531	17	9214	583	17	10097	635	17	10981
532	17	9231	584	17	10114	636	17	10998
533	17	9248	585	17	10131	637	17	11015
534	17	9265	586	17	10148	638	17	11032
535	17	9282	587	17	10165	639	17	11049
536	17	9298	588	17	10182	640	17	11066
537	17	9315	589	17	10199	641	17	11083
538	17	9332	590	17	10216	642	17	11100
539	17	9349	591	17	10233	643	17	11117
540	17	9366	592	17	10250	644	17	11134
541	17	9383	593	17	10267	645	17	11151
542	17	9400	594	17	10284	646	17	11168
543	17	9417	595	17	10301	647	17	11185
544	17	9434	596	17	10318	648	17	11202
545	17	9451	597	17	10335	649	17	11219
546	17	9468	598	17	10352	650	17	11236
547	17	9485	599	17	10369	651	17	11253
548	17	9502	600	17	10386	652	17	11270
549	17	9519	601	17	10403	653	17	11287
550	17	9536	602	17	10420	654	17	11304
551	17	9553	603	17	10437	655	17	11321
552	17	9570	604	17	10454	656	17	11338
553	17	9587	605	17	10471	657	17	11355
554	17	9604	606	17	10488	658	17	11372
555	17	9621	607	17	10505	659	17	11389
556	17	9638	608	17	10522	660	17	11406
557	17	9655	609	17	10539	661	17	11423
558	17	9672	610	17	10556	662	17	11440
559	17	9689	611	17	10573	663	17	11457
560	17	9706	612	17	10590	664	17	11474
561	17	9723	613	17	10607	665	17	11491
562	17	9740	614	17	10624	666	17	11508
563	17	9757	615	17	10641	667	17	11525
564	17	9774	616	17	10658	668	17	11542
565	17	9791	617	17	10675	669	17	11559
566	17	9808	618	17	10692	670	17	11576
567	17	9825	619	17	10709	671	17	11593

1.2.2 Datos Resistencia a compresión

Tabla 12: Resultados Compresión Cilindros Contratista 2

Edad (días)	Edad (h)	Densidad (kg/m ³)	Res. Cil. 15 cm. (Mpa)	Res. Cúb. 20 cm. (MPa)	FlexoTracción (Mpa)
1	24	2430	11,6	14,5	1,9
1	24	2420	11,6	14,5	1,9
2	48	2430	24,6	29,6	3,8
2	48	2430	24,4	29,4	3,8
3	72	2420	29,8	34,8	4,5
3	72	2400	29,3	34,3	4,4
4	96	2420	34,2	39,2	5,0
4	96	2420	34,0	39,0	5,0
5	120	2430	39,9	44,9	5,8
5	120	2430	38,9	43,9	5,6
6	144	2430	42,0	47,0	6,0
6	144	2420	42,3	47,3	6,1
7	168	2430	44,3	49,3	6,3
7	168	2420	44,0	49,0	6,3
14	336	2410	46,9	51,9	6,7
14	336	2430	46,7	51,7	6,6
28	672	2410	48,1	53,1	6,8
28	672	2410	46,7	51,7	6,6

ANEXO 2

DATOS INSTRUMENTACIONES

2.1 Contratista 1

2.1.1 Datos Madurez

2.1.1.1 Instrumentación 1

Tabla 13: Datos Instrumentación I01 Contratista 1

Edad (h)	T (°C)	M (°C·xh)
0	20	0
1	17	18
2	18	36
3	20	54
4	21	75
5	22	96
6	22	118
7	21	139
8	21	160
9	21	181
10	21	202
11	21	223
12	21	244
13	21	265
14	22	287
15	22	309
16	23	332
17	23	355
18	23	378
19	23	401
20	23	424
21	22	446
22	22	468
23	22	490
24	22	512
25	22	534
26	23	557
27	24	581
28	25	606
29	25	631
30	24	655
31	23	679
32	23	702
33	21	724
34	21	745
35	20	765
36	20	785
37	19	805
38	19	824
39	19	843
40	18	861
41	18	879
42	17	897
43	17	914
44	17	931
45	17	948
46	17	965
47	16	981
48	16	997
49	16	1013
50	16	1029
51	16	1045
52	17	1061
53	17	1078
54	17	1095
55	17	1112
56	16	1129
57	16	1145
58	16	1161
59	16	1177
60	15	1192
61	15	1207
62	14	1222
63	14	1236
64	14	1250
65	14	1264
66	13	1277
67	13	1290
68	13	1303
69	13	1316
70	13	1329
71	13	1342
72	13	1355
73	13	1368
74	13	1381
75	14	1395
76	15	1410
77	16	1425
78	16	1441
79	16	1457
80	15	1473
81	15	1488
82	14	1502
83	14	1516
84	14	1530
85	14	1544
86	13	1557
87	13	1570
88	13	1583
89	13	1596
90	13	1609
91	12	1622
92	12	1634
93	12	1646
94	12	1658
95	12	1670
96	12	1682
97	12	1694
98	13	1706
99	13	1719
100	14	1733
101	15	1748
102	15	1763
103	15	1778
104	15	1793
105	15	1808
106	14	1822
107	14	1836

Tabla 13: Datos Instrumentación I01 Contratista 1 (continuación)

Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)
108	14	1850	160	12	2543	212	7	3106
109	14	1864	161	12	2555	213	7	3113
110	13	1877	162	12	2567	214	7	3120
111	13	1890	163	12	2579	215	7	3127
112	13	1903	164	11	2590	216	9	3135
113	13	1916	165	11	2601	217	10	3144
114	12	1928	166	11	2612	218	12	3155
115	12	1940	167	11	2623	219	13	3168
116	12	1952	168	11	2634	220	14	3181
117	12	1964	169	12	2646	221	14	3195
118	11	1976	170	12	2658	222	13	3208
119	11	1987	171	13	2670	223	12	3221
120	12	1999	172	13	2683	224	12	3233
121	12	2011	173	13	2696	225	12	3245
122	14	2024	174	13	2709	226	11	3257
123	15	2039	175	12	2722	227	11	3268
124	17	2055	176	12	2734	228	11	3279
125	17	2072	177	12	2746	229	10	3289
126	17	2089	178	12	2758	230	10	3299
127	17	2106	179	12	2770	231	10	3309
128	17	2123	180	12	2782	232	10	3319
129	16	2139	181	12	2794	233	10	3329
130	15	2155	182	11	2805	234	10	3339
131	15	2170	183	11	2816	235	9	3348
132	15	2185	184	11	2827	236	9	3357
133	14	2199	185	11	2838	237	9	3366
134	14	2213	186	11	2849	238	9	3375
135	14	2227	187	11	2860	239	9	3384
136	14	2241	188	11	2871	240	10	3394
137	13	2254	189	10	2881	241	10	3404
138	13	2267	190	10	2891	242	11	3414
139	13	2280	191	10	2901	243	11	3425
140	13	2293	192	11	2912	244	12	3437
141	13	2306	193	11	2923	245	12	3449
142	12	2319	194	11	2934	246	11	3461
143	12	2331	195	11	2945	247	11	3472
144	12	2343	196	11	2956	248	11	3482
145	13	2355	197	11	2967	249	11	3493
146	13	2368	198	11	2978	250	11	3504
147	13	2381	199	10	2989	251	11	3515
148	13	2394	200	10	2999	252	10	3526
149	13	2407	201	10	3009	253	10	3536
150	13	2420	202	10	3019	254	10	3546
151	13	2433	203	10	3029	255	10	3556
152	13	2446	204	10	3039	256	9	3565
153	12	2459	205	9	3048	257	9	3574
154	12	2471	206	9	3057	258	9	3583
155	12	2483	207	9	3066	259	8	3592
156	12	2495	208	8	3074	260	8	3600
157	12	2507	209	8	3082	261	8	3608
158	12	2519	210	8	3090	262	8	3616
159	12	2531	211	8	3098	263	8	3624

2.1.1.1 Instrumentación 2

Tabla 14: Datos Instrumentación I02 Contratista 1

Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)
0	18	0	49	15	1009	98	14	1717
1	21	23	50	15	1024	99	14	1731
2	21	44	51	15	1039	100	13	1744
3	20	64	52	14	1053	101	13	1757
4	20	84	53	14	1067	102	12	1770
5	20	104	54	14	1081	103	12	1782
6	20	124	55	14	1095	104	12	1794
7	20	144	56	13	1109	105	12	1806
8	20	164	57	13	1122	106	12	1818
9	20	184	58	13	1135	107	12	1830
10	21	205	59	13	1148	108	12	1842
11	21	226	60	14	1161	109	13	1855
12	22	248	61	14	1175	110	15	1869
13	26	272	62	15	1189	111	17	1884
14	26	298	63	16	1204	112	18	1902
15	27	325	64	17	1221	113	18	1920
16	28	353	65	18	1238	114	18	1938
17	28	381	66	18	1256	115	17	1955
18	28	409	67	17	1273	116	17	1972
19	26	436	68	17	1290	117	16	1989
20	26	462	69	16	1306	118	16	2005
21	23	486	70	15	1322	119	15	2020
22	23	509	71	15	1337	120	15	2035
23	22	532	72	15	1352	121	15	2050
24	22	554	73	14	1366	122	14	2065
25	21	575	74	14	1380	123	14	2079
26	21	596	75	14	1394	124	14	2093
27	20	616	76	13	1408	125	14	2107
28	20	636	77	13	1421	126	14	2121
29	20	656	78	13	1434	127	13	2134
30	19	676	79	13	1447	128	13	2147
31	19	695	80	13	1460	129	13	2160
32	18	713	81	12	1472	130	13	2173
33	18	731	82	12	1484	131	13	2186
34	18	749	83	12	1496	132	13	2199
35	18	767	84	13	1509	133	14	2213
36	17	784	85	13	1522	134	14	2227
37	17	801	86	14	1536	135	14	2241
38	18	818	87	15	1550	136	14	2255
39	18	836	88	16	1566	137	14	2269
40	18	854	89	17	1582	138	14	2283
41	18	872	90	16	1599	139	14	2297
42	18	890	91	16	1615	140	14	2311
43	18	908	92	15	1631	141	13	2324
44	17	926	93	15	1646	142	13	2337
45	17	943	94	15	1661	143	13	2350
46	17	960	95	14	1675	144	13	2363
47	16	977	96	14	1689	145	13	2376
48	16	993	97	14	1703	146	13	2389

Tabla 14: Datos Instrumentación I02 Contratista 1 (continuación)

Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)
147	12	2401	199	8	2994	251	8	3507
148	12	2413	200	7	3001	252	9	3515
149	12	2425	201	7	3008	253	9	3524
150	12	2437	202	7	3015	254	11	3534
151	12	2449	203	8	3023	255	12	3546
152	12	2461	204	9	3031	256	12	3558
153	12	2473	205	10	3040	257	13	3571
154	12	2485	206	12	3051	258	13	3584
155	12	2497	207	12	3063	259	13	3597
156	12	2509	208	13	3075	260	12	3610
157	13	2522	209	14	3089	261	12	3622
158	14	2535	210	13	3103	262	12	3634
159	14	2549	211	13	3116	263	11	3645
160	14	2563	212	12	3128	264	11	3656
161	14	2577	213	11	3140	265	11	3667
162	13	2590	214	11	3151	266	10	3677
163	13	2603	215	10	3161	267	10	3687
164	13	2616	216	10	3171	268	10	3697
165	12	2628	217	10	3181	269	10	3707
166	12	2640	218	10	3191	270	10	3717
167	12	2652	219	9	3200	271	9	3727
168	12	2664	220	9	3209	272	9	3736
169	12	2676	221	9	3218	273	9	3745
170	12	2688	222	9	3227	274	9	3754
171	12	2700	223	9	3236	275	10	3764
172	11	2712	224	9	3245	276	10	3774
173	11	2723	225	9	3254	277	11	3784
174	11	2734	226	9	3263	278	12	3796
175	11	2745	227	9	3272	279	12	3808
176	11	2756	228	10	3282	280	13	3820
177	11	2767	229	11	3293	281	14	3834
178	11	2778	230	11	3304	282	14	3848
179	11	2789	231	12	3316	283	14	3862
180	12	2801	232	12	3328	284	13	3875
181	12	2813	233	12	3340	285	12	3888
182	12	2825	234	11	3351	286	12	3900
183	12	2837	235	11	3362	287	12	3912
184	11	2849	236	11	3373	288	11	3923
185	11	2860	237	11	3384	289	11	3934
186	11	2871	238	11	3395	290	10	3944
187	11	2882	239	11	3406	291	10	3954
188	11	2893	240	10	3416	292	10	3964
189	11	2904	241	10	3426	293	9	3974
190	10	2914	242	10	3436	294	9	3983
191	10	2924	243	9	3445	295	9	3992
192	10	2934	244	9	3454	296	8	4000
193	9	2944	245	8	3462	297	8	4008
194	9	2953	246	8	3470	298	8	4016
195	9	2962	247	8	3478	299	8	4024
196	8	2970	248	7	3486	300	9	4033
197	8	2978	249	7	3493	301	9	4042
198	8	2986	250	7	3500	302	11	4052

2.1.1.1 Instrumentación 3

Tabla 15: Datos Instrumentación I03 Contratista 1

Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)
0	15	0	49	15	904	98	11	1506
1	18	17	50	16	919	99	11	1517
2	19	35	51	16	935	100	11	1528
3	20	55	52	16	951	101	10	1538
4	20	75	53	15	966	102	10	1548
5	19	94	54	15	981	103	10	1558
6	18	113	55	14	996	104	10	1568
7	18	131	56	14	1010	105	9	1578
8	17	148	57	14	1024	106	9	1587
9	17	165	58	14	1038	107	9	1596
10	17	182	59	13	1052	108	8	1604
11	18	200	60	13	1065	109	8	1612
12	18	218	61	13	1078	110	7	1619
13	18	236	62	13	1091	111	7	1626
14	18	254	63	13	1104	112	7	1633
15	18	272	64	12	1116	113	6	1640
16	19	290	65	12	1128	114	6	1646
17	19	309	66	12	1140	115	6	1652
18	20	329	67	12	1152	116	6	1658
19	19	349	68	12	1164	117	6	1664
20	19	368	69	12	1176	118	8	1671
21	19	387	70	12	1188	119	10	1680
22	19	406	71	12	1200	120	10	1689
23	19	425	72	13	1212	121	12	1700
24	20	444	73	13	1225	122	14	1712
25	21	464	74	13	1238	123	15	1727
26	23	486	75	13	1251	124	15	1742
27	24	509	76	13	1264	125	14	1757
28	24	533	77	12	1277	126	12	1770
29	24	557	78	12	1289	127	12	1782
30	23	580	79	12	1301	128	11	1793
31	21	602	80	12	1313	129	10	1804
32	20	623	81	12	1325	130	10	1814
33	20	643	82	11	1336	131	9	1823
34	19	662	83	11	1347	132	9	1832
35	18	681	84	11	1358	133	9	1841
36	18	699	85	11	1369	134	9	1850
37	17	716	86	11	1380	135	9	1859
38	17	733	87	11	1391	136	9	1868
39	17	750	88	10	1402	137	8	1877
40	16	767	89	10	1412	138	8	1885
41	16	783	90	10	1422	139	8	1893
42	15	799	91	10	1432	140	8	1901
43	15	814	92	10	1442	141	8	1909
44	15	829	93	10	1452	142	9	1918
45	15	844	94	11	1462	143	10	1928
46	15	859	95	11	1473	144	11	1938
47	15	874	96	11	1484	145	12	1950
48	15	889	97	11	1495	146	11	1961

Tabla 15: Datos Instrumentación I03 Contratista 1 (continuación)

Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)
147	11	1972	172	13	2196	197	16	2462
148	11	1983	173	13	2209	198	15	2478
149	11	1994	174	12	2221	199	13	2492
150	11	2005	175	12	2233	200	12	2505
151	11	2016	176	11	2244	201	12	2517
152	10	2027	177	10	2255	202	11	2528
153	10	2037	178	10	2265	203	11	2539
154	10	2047	179	10	2275	204	10	2550
155	10	2057	180	10	2285	205	10	2560
156	9	2066	181	9	2294	206	9	2570
157	9	2075	182	9	2303	207	9	2579
158	8	2084	183	9	2312	208	9	2588
159	8	2092	184	9	2321	209	8	2596
160	7	2099	185	8	2330	210	8	2604
161	7	2106	186	8	2338	211	7	2612
162	6	2113	187	8	2346	212	7	2619
163	6	2119	188	8	2354	213	8	2626
164	6	2125	189	9	2362	214	9	2634
165	7	2131	190	9	2371	215	10	2644
166	7	2138	191	10	2381	216	11	2655
167	8	2146	192	11	2391	217	11	2666
168	8	2154	193	12	2403	218	12	2677
169	9	2162	194	14	2416	219	12	2689
170	10	2171	195	15	2430	220	12	2701
171	12	2183	196	16	2446			

2.1.1.1 Instrumentación 4

Tabla 16: Datos Instrumentación I04 Contratista 1

Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)
0	19	0	17	25	393	34	18	754
1	19	18	18	25	418	35	18	772
2	19	37	19	24	442	36	17	789
3	19	56	20	23	466	37	17	806
4	20	76	21	23	489	38	17	823
5	22	97	22	22	512	39	17	840
6	23	119	23	22	534	40	16	857
7	23	142	24	21	555	41	16	873
8	24	165	25	21	576	42	16	889
9	24	189	26	21	597	43	15	905
10	24	213	27	20	618	44	15	920
11	25	238	28	20	638	45	15	935
12	26	263	29	20	658	46	15	950
13	26	289	30	20	678	47	14	964
14	26	315	31	19	698	48	15	979
15	26	341	32	19	717	49	15	994
16	26	367	33	19	736	50	16	1009

Tabla 16: Datos Instrumentación I04 Contratista 1

Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)
51	16	1025	103	16	1656	155	14	2283
52	16	1041	104	15	1671	156	14	2297
53	16	1057	105	14	1686	157	13	2310
54	16	1073	106	13	1700	158	13	2323
55	16	1089	107	13	1713	159	12	2336
56	15	1104	108	12	1725	160	12	2348
57	15	1119	109	12	1737	161	12	2360
58	14	1134	110	12	1749	162	12	2372
59	14	1148	111	12	1761	163	12	2384
60	14	1162	112	11	1773	164	11	2395
61	13	1175	113	11	1783	165	11	2406
62	13	1188	114	11	1794	166	11	2417
63	13	1201	115	11	1805	167	11	2428
64	13	1214	116	11	1816	168	11	2439
65	13	1227	117	10	1827	169	12	2451
66	12	1240	118	10	1837	170	12	2463
67	12	1252	119	10	1847	171	13	2476
68	12	1264	120	11	1858	172	15	2490
69	12	1276	121	11	1869	173	16	2506
70	12	1288	122	12	1881	174	17	2522
71	12	1300	123	13	1893	175	17	2539
72	12	1312	124	13	1906	176	16	2556
73	12	1324	125	13	1919	177	16	2572
74	12	1336	126	13	1932	178	15	2587
75	12	1348	127	13	1945	179	14	2602
76	12	1360	128	12	1958	180	14	2616
77	12	1372	129	12	1970	181	13	2629
78	12	1384	130	12	1982	182	12	2641
79	12	1396	131	12	1994	183	12	2653
80	12	1408	132	12	2006	184	12	2665
81	12	1420	133	12	2018	185	11	2677
82	12	1432	134	11	2029	186	11	2688
83	12	1444	135	11	2040	187	11	2699
84	11	1455	136	10	2051	188	10	2710
85	11	1466	137	10	2061	189	10	2720
86	11	1477	138	10	2071	190	10	2730
87	10	1487	139	9	2080	191	9	2739
88	10	1497	140	9	2089	192	10	2749
89	9	1506	141	8	2098	193	12	2760
90	9	1515	142	8	2106	194	13	2772
91	9	1524	143	8	2114	195	15	2786
92	8	1533	144	9	2122	196	17	2802
93	8	1541	145	10	2132	197	18	2819
94	8	1549	146	12	2143	198	18	2837
95	8	1557	147	13	2155	199	18	2855
96	9	1565	148	15	2170	200	17	2872
97	10	1574	149	17	2186	201	17	2889
98	11	1585	150	17	2203	202	16	2906
99	12	1597	151	17	2220	203	15	2921
100	14	1610	152	17	2237	204	15	2936
101	15	1624	153	16	2253	205	14	2950
102	16	1640	154	15	2268	206	13	2964

Tabla 16: Datos Instrumentación I04 Contratista 1 (continuación)

Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)
207	13	2977
208	12	2990
209	12	3002
210	12	3014
211	12	3026
212	11	3038
213	11	3049
214	11	3060
215	11	3071
216	11	3082
217	12	3093
218	13	3105
219	14	3119
220	16	3134
221	17	3150
222	17	3167
223	17	3184
224	16	3201
225	16	3217
226	15	3232
227	14	3246
228	14	3260
229	13	3274
230	13	3287
231	12	3300
232	12	3312
233	12	3324
234	12	3336
235	11	3347
236	11	3358
237	11	3369
238	11	3380
239	11	3391
240	11	3402
241	12	3414
242	13	3426
243	13	3439

Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)
244	13	3452
245	13	3465
246	13	3478
247	13	3491
248	13	3504
249	12	3516
250	12	3528
251	12	3540
252	12	3552
253	12	3564
254	12	3576
255	12	3588
256	12	3600
257	11	3612
258	11	3623
259	11	3634
260	10	3644
261	10	3654
262	9	3664
263	9	3673
264	10	3682
265	11	3692
266	12	3703
267	12	3715
268	13	3728
269	13	3741
270	14	3754
271	14	3768
272	13	3782
273	13	3795
274	12	3808
275	12	3820
276	12	3832
277	11	3843
278	11	3854
279	10	3865
280	10	3875

Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)
281	10	3885
282	9	3894
283	9	3903
284	8	3912
285	8	3920
286	8	3928
287	8	3936
288	8	3944
289	10	3953
290	11	3963
291	13	3975
292	14	3989
293	16	4004
294	17	4020
295	17	4037
296	16	4054
297	15	4069
298	14	4084
299	14	4098
300	13	4111
301	12	4124
302	12	4136
303	12	4148
304	11	4160
305	11	4171
306	10	4182
307	10	4192
308	10	4202
309	9	4211
310	9	4220
311	9	4229
312	9	4238
313	11	4248
314	12	4260
315	14	4273
316	16	4289

2.1.1.1 Instrumentación 5

Tabla 17: Datos Instrumentación I05 Contratista 1

Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)
0	16	0
1	18	17
2	18	35
3	18	53
4	18	71

Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)
5	18	89
6	19	108
7	20	127
8	20	147
9	21	168

Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)
10	22	189
11	23	212
12	24	235
13	25	260
14	27	286

Tabla 17: Datos Instrumentación I05 Contratista 1 (continuación)

Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)
15	27	313	67	11	1254	119	15	1898
16	27	340	68	12	1265	120	16	1913
17	27	367	69	13	1277	121	16	1929
18	27	394	70	14	1290	122	16	1945
19	27	421	71	15	1305	123	15	1960
20	27	448	72	16	1320	124	15	1975
21	27	475	73	16	1336	125	14	1990
22	27	502	74	15	1352	126	14	2004
23	26	529	75	15	1367	127	14	2018
24	26	555	76	14	1382	128	13	2032
25	25	580	77	14	1396	129	13	2045
26	24	605	78	13	1409	130	13	2058
27	23	628	79	13	1422	131	13	2071
28	22	651	80	13	1435	132	12	2083
29	22	673	81	12	1448	133	12	2095
30	21	694	82	12	1460	134	12	2107
31	20	715	83	12	1472	135	12	2119
32	20	735	84	12	1484	136	12	2131
33	20	755	85	12	1496	137	12	2143
34	19	774	86	12	1508	138	12	2155
35	19	793	87	12	1520	139	12	2167
36	18	811	88	12	1532	140	13	2180
37	18	829	89	12	1544	141	13	2193
38	17	846	90	12	1556	142	15	2207
39	17	863	91	12	1568	143	16	2222
40	17	880	92	13	1580	144	17	2239
41	17	897	93	13	1593	145	17	2256
42	17	914	94	13	1606	146	17	2273
43	17	931	95	13	1619	147	16	2289
44	17	948	96	13	1632	148	16	2305
45	16	965	97	13	1645	149	15	2320
46	16	981	98	13	1658	150	15	2335
47	16	997	99	13	1671	151	14	2349
48	15	1012	100	13	1684	152	14	2363
49	15	1027	101	12	1697	153	13	2377
50	15	1042	102	12	1709	154	13	2390
51	15	1057	103	12	1721	155	13	2403
52	14	1072	104	12	1733	156	12	2415
53	14	1086	105	12	1745	157	12	2427
54	14	1100	106	12	1757	158	12	2439
55	13	1113	107	11	1768	159	12	2451
56	13	1126	108	11	1779	160	11	2462
57	13	1139	109	11	1790	161	11	2473
58	12	1151	110	10	1800	162	11	2484
59	12	1163	111	10	1810	163	11	2495
60	12	1175	112	10	1820	164	12	2506
61	12	1187	113	10	1830	165	12	2518
62	11	1199	114	10	1840	166	14	2531
63	11	1210	115	10	1850	167	16	2547
64	11	1221	116	10	1860			
65	11	1232	117	12	1871			
66	11	1243	118	13	1884			

2.2 Contratista 2

2.2.1 Datos Madurez

2.1.1.1 Instrumentación 1

Tabla 18: Datos Instrumentación C01 Contratista 2

Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)
0	15	0
1	16	15
2	16	31
3	18	48
4	20	67
5	23	88
6	25	112
7	26	137
8	28	164
9	29	193
10	29	222
11	29	251
12	28	279
13	27	306
14	26	332
15	25	358
16	24	383
17	23	407
18	23	430
19	22	453
20	21	474
21	20	495
22	20	515
23	19	534
24	19	553
25	19	572
26	19	591
27	20	610
28	21	630
29	22	652
30	23	675
31	23	698
32	22	721
33	21	742
34	20	763
35	20	783
36	19	803
37	19	822
38	18	840
39	17	858
40	17	875
41	17	892
42	17	909
43	17	926
44	16	943
45	16	959
46	16	975
47	16	991
48	16	1007
49	16	1023
50	17	1039
51	18	1056
52	20	1075
53	20	1095
54	20	1115
55	20	1135
56	19	1154
57	18	1173
58	18	1191
59	17	1208
60	17	1225
61	17	1242
62	17	1259
63	17	1276
64	16	1292
65	16	1308
66	16	1324
67	16	1340
68	15	1356
69	15	1371
70	15	1386
71	15	1401
72	15	1416
73	15	1431
74	16	1446
75	16	1462
76	17	1478
77	17	1495
78	17	1512
79	17	1529
80	17	1546
81	16	1563
82	16	1579
83	16	1595
84	15	1611
85	15	1626
86	15	1641
87	14	1655
88	14	1669
89	14	1683
90	14	1697
91	13	1710
92	13	1723
93	13	1736
94	13	1749
95	13	1762
96	13	1775
97	14	1788
98	14	1802
99	15	1817
100	17	1833
101	18	1850
102	19	1869
103	19	1888
104	18	1906
105	17	1924
106	17	1941
107	16	1957
108	16	1973
109	15	1989
110	15	2004
111	15	2019
112	14	2034
113	14	2048
114	14	2062
115	14	2076
116	14	2090
117	13	2103
118	13	2116
119	13	2129
120	13	2142
121	14	2156
122	14	2170
123	15	2184
124	16	2200
125	17	2217
126	18	2235
127	17	2252
128	17	2269

Tabla 18: Datos Instrumentación C01 Contratista 2 (continuación)

Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)
129	16	2286	143	12	2482	157	15	2706
130	16	2302	144	12	2494	158	15	2721
131	16	2318	145	13	2506	159	15	2736
132	15	2333	146	14	2519	160	14	2751
133	15	2348	147	15	2533	161	14	2765
134	15	2363	148	17	2550	162	14	2779
135	15	2378	149	19	2568	163	14	2793
136	14	2392	150	19	2587	164	13	2806
137	14	2406	151	19	2606	165	13	2819
138	13	2420	152	18	2624	166	13	2832
139	13	2433	153	17	2642	167	13	2845
140	13	2446	154	17	2659	168	13	2858
141	12	2458	155	16	2675			
142	12	2470	156	16	2691			

2.1.1.1 Instrumentación 2

Tabla 19: Datos Instrumentación C02 Contratista 2

Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)
0	16	0	29	24	678	58	17	1249
1	15	15	30	25	703	59	17	1266
2	15	30	31	25	728	60	17	1283
3	16	45	32	24	753	61	16	1300
4	17	61	33	24	777	62	16	1316
5	20	80	34	23	800	63	16	1332
6	22	101	35	22	823	64	15	1348
7	24	124	36	22	845	65	15	1363
8	27	149	37	21	866	66	15	1378
9	29	177	38	21	887	67	15	1393
10	29	206	39	20	908	68	14	1407
11	29	235	40	20	928	69	14	1421
12	29	264	41	20	948	70	14	1435
13	28	293	42	19	968	71	14	1449
14	27	321	43	19	987	72	14	1463
15	27	348	44	19	1006	73	14	1477
16	26	374	45	18	1024	74	14	1491
17	26	400	46	18	1042	75	14	1505
18	25	425	47	18	1060	76	15	1520
19	24	450	48	17	1077	77	16	1535
20	24	474	49	17	1094	78	17	1552
21	23	497	50	17	1111	79	17	1569
22	23	520	51	17	1128	80	17	1586
23	22	543	52	17	1145	81	17	1603
24	22	565	53	17	1162	82	17	1620
25	22	587	54	18	1179	83	16	1637
26	22	609	55	18	1197	84	16	1653
27	23	631	56	18	1215	85	16	1669
28	23	654	57	17	1232	86	15	1684

Tabla 19: Datos Instrumentación C02 Contratista 2 (continuación)

Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)
87	15	1699	107	14	1985	127	15	2246
88	15	1714	108	14	1999	128	15	2261
89	15	1729	109	14	2013	129	15	2276
90	14	1744	110	14	2027	130	15	2291
91	14	1758	111	14	2041	131	15	2306
92	14	1772	112	13	2054	132	15	2321
93	14	1786	113	13	2067	133	14	2335
94	14	1800	114	13	2080	134	14	2349
95	13	1813	115	13	2093	135	14	2363
96	13	1826	116	12	2106	136	14	2377
97	13	1839	117	12	2118	137	14	2391
98	14	1852	118	12	2130	138	13	2404
99	14	1866	119	12	2142	139	13	2417
100	14	1880	120	12	2154	140	13	2430
101	15	1895	121	12	2166	141	13	2443
102	15	1910	122	12	2178	142	13	2456
103	15	1925	123	12	2190	143	13	2469
104	15	1940	124	13	2203	144	13	2482
105	15	1955	125	14	2216	145	13	2495
106	15	1970	126	15	2231			

2.1.1.1 Instrumentación 3

Tabla 20: Datos Instrumentación C03 Contratista 2

Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)
0	17	0	23	21	489	46	17	926
1	17	16	24	21	510	47	17	943
2	17	33	25	21	531	48	17	960
3	17	50	26	20	552	49	17	977
4	17	67	27	20	572	50	17	994
5	17	84	28	20	592	51	17	1011
6	18	102	29	20	612	52	17	1028
7	20	121	30	20	632	53	17	1045
8	20	141	31	20	652	54	17	1062
9	21	162	32	20	672	55	18	1080
10	23	184	33	20	692	56	18	1098
11	24	207	34	20	712	57	17	1115
12	25	231	35	19	731	58	17	1132
13	25	256	36	19	750	59	17	1149
14	25	281	37	19	769	60	17	1166
15	24	306	38	18	788	61	17	1183
16	24	330	39	18	806	62	17	1200
17	23	354	40	18	824	63	17	1217
18	23	377	41	18	842	64	16	1234
19	23	400	42	17	859	65	16	1250
20	23	423	43	17	876	66	16	1266
21	22	445	44	17	892	67	16	1282
22	22	467	45	17	909	68	16	1298

Tabla 20: Datos Instrumentación C03 Contratista 2 (continuación)

Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)
69	16	1314	87	16	1599	105	17	1883
70	16	1330	88	15	1615	106	17	1900
71	15	1345	89	15	1630	107	17	1917
72	15	1360	90	15	1645	108	17	1934
73	16	1376	91	15	1660	109	17	1951
74	16	1392	92	15	1675	110	17	1968
75	16	1408	93	14	1689	111	17	1985
76	16	1424	94	14	1703	112	16	2002
77	16	1439	95	14	1717	113	16	2018
78	16	1455	96	15	1731	114	16	2034
79	16	1471	97	15	1746	115	16	2050
80	16	1487	98	16	1762	116	16	2066
81	16	1503	99	17	1779	117	15	2081
82	16	1519	100	17	1796	118	15	2096
83	16	1535	101	17	1813	119	15	2111
84	16	1551	102	17	1830	120	15	2126
85	16	1567	103	18	1848			
86	16	1583	104	18	1866			

2.1.1.1 Instrumentación 4

Tabla 21: Datos Instrumentación C04 Contratista 2

Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)
0	18	0	25	24	589	50	20	1185
1	16	16	26	24	613	51	20	1205
2	16	32	27	25	638	52	20	1225
3	16	48	28	26	664	53	20	1245
4	17	64	29	27	690	54	20	1265
5	18	81	30	28	718	55	20	1285
6	20	100	31	28	746	56	19	1304
7	21	120	32	28	774	57	19	1323
8	22	142	33	27	801	58	19	1342
9	23	165	34	26	828	59	18	1360
10	24	188	35	26	854	60	18	1378
11	26	213	36	25	880	61	18	1396
12	27	240	37	24	904	62	17	1414
13	28	267	38	24	928	63	17	1431
14	29	296	39	23	952	64	17	1448
15	29	325	40	23	975	65	17	1465
16	29	354	41	23	998	66	17	1482
17	29	383	42	22	1020	67	16	1499
18	28	411	43	22	1042	68	16	1515
19	27	439	44	21	1063	69	16	1531
20	26	465	45	21	1084	70	15	1547
21	26	491	46	20	1105	71	15	1562
22	25	517	47	20	1125	72	15	1577
23	24	541	48	20	1145	73	15	1592
24	24	565	49	20	1165	74	16	1607

Tabla 21: Datos Instrumentación C04 Contratista 2

Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)
75	17	1624	125	16	2280	175	19	2940
76	17	1641	126	17	2296	176	18	2959
77	17	1658	127	17	2313	177	18	2977
78	17	1675	128	17	2330	178	17	2994
79	17	1692	129	16	2347	179	17	3011
80	17	1709	130	15	2363	180	16	3027
81	16	1726	131	15	2378	181	15	3043
82	16	1742	132	14	2392	182	15	3058
83	16	1758	133	14	2406	183	15	3073
84	15	1773	134	13	2420	184	14	3087
85	15	1788	135	13	2433	185	14	3101
86	15	1803	136	13	2446	186	13	3114
87	14	1818	137	12	2458	187	13	3127
88	14	1832	138	12	2470	188	13	3140
89	14	1846	139	12	2482	189	13	3153
90	14	1860	140	12	2494	190	12	3166
91	14	1874	141	12	2506	191	12	3178
92	13	1887	142	12	2518	192	12	3190
93	13	1900	143	12	2530	193	13	3202
94	13	1913	144	12	2542	194	13	3215
95	13	1926	145	12	2554	195	14	3229
96	13	1939	146	13	2566	196	15	3244
97	13	1952	147	14	2579	197	17	3260
98	14	1965	148	14	2593	198	18	3277
99	14	1979	149	14	2607	199	18	3295
100	14	1993	150	14	2621	200	18	3313
101	13	2007	151	14	2635	201	17	3330
102	13	2020	152	14	2649	202	17	3347
103	13	2033	153	14	2663	203	16	3363
104	13	2046	154	14	2677	204	15	3379
105	13	2059	155	13	2690	205	15	3394
106	12	2071	156	13	2703	206	14	3409
107	12	2083	157	13	2716	207	14	3423
108	12	2095	158	12	2729	208	13	3436
109	12	2107	159	12	2741	209	13	3449
110	12	2119	160	12	2753	210	12	3462
111	11	2130	161	12	2765	211	12	3474
112	11	2141	162	11	2777	212	12	3486
113	10	2152	163	11	2788	213	11	3498
114	10	2162	164	10	2798	214	11	3509
115	10	2172	165	10	2808	215	11	3520
116	10	2182	166	10	2818	216	11	3531
117	9	2191	167	9	2828	217	12	3542
118	9	2200	168	10	2837	218	13	3555
119	9	2209	169	11	2847	219	15	3569
120	9	2218	170	12	2859	220	17	3586
121	10	2228	171	14	2872	221	19	3603
122	12	2239	172	16	2887	222	20	3623
123	13	2251	173	17	2903	223	20	3643
124	15	2265	174	18	2921	224	20	3663

2.1.1.1 Instrumentación 5

Tabla 22: Datos Instrumentación C05 Contratista 2

Edad (h)	T (°C)	M (°C·xh)
0	25	0
1	19	19
2	20	38
3	21	59
4	24	81
5	27	107
6	29	135
7	32	166
8	33	198
9	34	231
10	34	265
11	33	298
12	32	331
13	32	363
14	31	394
15	30	424
16	29	453
17	29	482
18	28	510
19	27	538
20	26	564
21	26	590
22	25	616
23	25	641
24	25	666
25	24	690
26	24	714
27	24	738
28	23	761
29	23	784
30	23	807
31	22	829
32	22	851
33	21	873
34	21	894
35	20	914
36	20	934
37	20	954
38	20	974
39	19	993
40	19	1012
41	18	1030
42	18	1048
43	17	1066
44	17	1083
45	17	1100
46	17	1117
47	17	1134
48	17	1151
49	18	1168
50	18	1186
51	18	1204
52	18	1222
53	17	1240
54	17	1257
55	17	1274
56	16	1290
57	16	1306
58	16	1322
59	15	1338
60	15	1353
61	15	1368
62	15	1383
63	14	1397
64	14	1411
65	14	1425
66	14	1439
67	14	1453
68	13	1467
69	13	1480
70	13	1493
71	14	1506
72	14	1520
73	14	1534
74	14	1548
75	14	1562
76	13	1576
77	13	1589
78	13	1602
79	13	1615
80	13	1628
81	12	1640
82	12	1652
83	12	1664
84	12	1676
85	11	1688
86	11	1699
87	11	1710
88	10	1720
89	10	1730
90	10	1740
91	9	1750
92	9	1759
93	9	1768
94	9	1777
95	9	1786
96	11	1796
97	12	1808
98	14	1820
99	15	1835
100	16	1851
101	17	1868
102	17	1885
103	16	1901
104	15	1917
105	15	1932
106	14	1946
107	13	1959
108	13	1972
109	12	1985
110	12	1997
111	12	2009
112	12	2021
113	12	2033
114	12	2045
115	12	2057
116	12	2069
117	11	2081
118	12	2092
119	12	2104
120	12	2116
121	13	2129
122	14	2143
123	14	2157
124	14	2171
125	14	2185
126	14	2199
127	13	2212
128	13	2225
129	13	2238
130	13	2251
131	12	2263
132	12	2275
133	12	2287
134	12	2299
135	11	2310
136	11	2321
137	10	2332
138	10	2342
139	10	2352
140	9	2362
141	9	2371
142	9	2380
143	10	2389
144	11	2399
145	12	2410
146	14	2424

Tabla 22: Datos Instrumentación C05 Contratista 2 (continuación)

Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)
147	16	2439	164	12	2686	181	13	2935
148	17	2456	165	12	2698	182	13	2948
149	18	2473	166	12	2710	183	12	2961
150	17	2491	167	12	2722	184	12	2973
151	17	2508	168	12	2734	185	12	2985
152	16	2525	169	13	2747	186	11	2996
153	16	2541	170	15	2761	187	11	3007
154	15	2557	171	16	2776	188	11	3018
155	14	2571	172	17	2793	189	11	3029
156	14	2585	173	18	2810	190	11	3040
157	13	2599	174	17	2828	191	11	3051
158	13	2612	175	17	2845	192	12	3062
159	13	2625	176	16	2862	193	14	3074
160	12	2638	177	16	2878	194	16	3089
161	12	2650	178	15	2893	195	17	3106
162	12	2662	179	14	2908	196	18	3123
163	12	2674	180	14	2922	197	19	3142

2.1.1.1 Instrumentación 6

Tabla 23: Datos Instrumentación C06 Contratista 2

Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)	Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)
0	16	0	25	20	536	50	16	982
1	17	17	26	21	557	51	15	998
2	17	34	27	22	578	52	15	1013
3	17	51	28	22	600	53	15	1028
4	17	68	29	21	621	54	14	1043
5	18	85	30	21	642	55	14	1057
6	19	104	31	20	663	56	14	1071
7	20	123	32	20	683	57	14	1085
8	20	143	33	19	703	58	13	1099
9	22	164	34	19	722	59	13	1112
10	23	187	35	18	740	60	13	1125
11	25	210	36	18	758	61	12	1138
12	26	235	37	17	775	62	12	1150
13	26	261	38	17	792	63	12	1162
14	26	287	39	17	809	64	12	1174
15	26	313	40	17	826	65	11	1185
16	25	339	41	16	843	66	11	1196
17	24	363	42	16	859	67	11	1207
18	23	387	43	16	875	68	10	1217
19	23	410	44	16	891	69	10	1227
20	22	433	45	15	906	70	10	1237
21	21	455	46	15	921	71	10	1247
22	21	476	47	15	936	72	11	1257
23	20	496	48	15	951	73	12	1268
24	20	516	49	16	966	74	14	1282

Tabla 23: Datos Instrumentación C06 Contratista 2 (continuación)

Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)
75	17	1297
76	18	1314
77	19	1333
78	20	1353
79	20	1373
80	19	1393
81	18	1411
82	17	1429
83	17	1446
84	16	1462
85	15	1477
86	15	1492
87	14	1506
88	14	1520
89	14	1534
90	13	1548
91	13	1561
92	13	1574
93	13	1587
94	12	1600
95	12	1612
96	13	1625
97	14	1638
98	15	1653
99	16	1668
100	16	1684
101	16	1700
102	16	1716
103	15	1732
104	15	1747
105	15	1762
106	14	1776
107	14	1790
108	14	1804

Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)
109	13	1817
110	13	1830
111	13	1843
112	12	1856
113	12	1868
114	11	1879
115	11	1890
116	11	1901
117	10	1912
118	10	1922
119	10	1932
120	11	1942
121	13	1954
122	15	1968
123	17	1984
124	19	2003
125	20	2022
126	21	2043
127	21	2064
128	20	2084
129	19	2104
130	18	2123
131	17	2140
132	17	2157
133	16	2174
134	16	2190
135	15	2205
136	15	2220
137	14	2234
138	14	2248
139	13	2261
140	13	2274
141	13	2287
142	13	2300

Edad (h)	T (°C)	M (°C·h)
143	13	2313
144	13	2326
145	14	2340
146	15	2354
147	16	2369
148	17	2386
149	19	2404
150	20	2423
151	20	2443
152	19	2463
153	18	2482
154	17	2500
155	17	2517
156	16	2533
157	15	2548
158	14	2563
159	14	2577
160	13	2590
161	13	2603
162	12	2616
163	12	2628
164	12	2640
165	11	2651
166	11	2662
167	11	2673
168	12	2685
169	14	2698
170	16	2712
171	18	2730
172	20	2749
173	21	2769
174	22	2791
175	22	2812