

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL
CUSCO**

FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍA CIVIL

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



**“ÍNDICE DE MADUREZ A EDADES TEMPRANAS Y RESISTENCIA A
COMPRESIÓN PARA DISEÑO DE MEZCLA DE PAVIMENTO RÍGIDO f'_c –
245 Kg/cm², CIUDAD CUSCO 2016”**

Tesis presentada para obtener el Título profesional de Ingeniero Civil presentado por:

ANAHUE CHOQUEPUMA, Brucele Ramiro

MALLQUI TTUPA, Alberth Edward

Cusco, 07 de Junio de 2017

RESUMEN

El objetivo de la investigación fue determinar la relación del índice de madurez del concreto a diferentes edades con la resistencia mecánica de una estructura de pavimento rígido, donde se estudió la evolución de la resistencia mecánica en función del historial de temperatura interna del concreto, calculándose el índice de madurez del concreto para posteriormente estimar las resistencias mecánicas en el pavimento rígido in situ.

El procedimiento constó en elaborar el índice de madurez en laboratorio; relacionando el historial de temperatura interna del concreto en especímenes de cilindros y vigas de concreto, con valores de resistencia mecánica a compresión, flexión y módulo de elasticidad para diferentes edades durante 70 días y posteriormente estudiar el índice de madurez de la estructura in situ por 50 días. Para ello se tuvo un estudio pre y post ejecución con un control de calidad global, realizando una caracterización de los componentes del concreto, control de parámetros de calidad en estado fresco y endurecido para el diseño de mezcla $f'_c=245 \text{ Kg/cm}^2$, módulo de rotura de 36 Kg/cm^2 y relación de agua/cemento de 0.65. La tecnología moderna utilizada fue el Equipo de Madurez, que almacenó datos del historial de temperatura con un intervalo de un minuto durante 70 días en los especímenes de concreto en laboratorio y 50 días en la estructura de pavimento rígido in situ.

Los resultados demostraron que los índices de madurez son aplicables cuando la estructura sigue las condiciones de curado óptimo, de lo contrario el método de madurez es inexacto para la estimación de resistencias, especialmente a mayores edades.

Se concluye indicando que el índice de madurez estima las resistencias mecánicas a compresión del concreto in situ con la función exponencial $f'_c = e^{5.805 - \frac{30.890}{x}}$ basado en el historial de temperatura y que la precisión de la resistencia estimada es dependiente del control de calidad global pre y post ejecución de la unidad de la estructura.

Palabras clave: Índice de madurez, edad temprana, temperatura interna del concreto.

SUMMARY

The objective of the research was to determine the relation of the maturity index of the concrete to different ages with the mechanical resistance of a rigid pavement structure, where the evolution of the mechanical resistance was studied in function of the history of internal temperature of the concrete, calculating the Maturity index of the concrete to later estimate the mechanical strengths in the rigid pavement in situ.

The procedure consisted in elaborating the index of maturity in laboratory; By correlating the internal temperature history of the concrete in specimens of cylinders and concrete beams with values of mechanical strength to compression, flexure and modulus of elasticity for different ages during 70 days and later to study the index of maturity of the structure in situ by 50 days. For this, a pre and post execution study was carried out with a global quality control, performing a characterization of the components of the concrete, control of quality parameters in fresh and hardened state for the mix design $f'c = 245 \text{ Kg/cm}^2$, Modulus of rupture of 36 Kg/cm^2 and ratio of water / cement of 0.65. The modern technology used was the Maturity Equipment, which stored temperature history data with an interval of one minute for 70 days in the concrete specimens in the laboratory and 50 days in the rigid pavement structure in situ.

The results showed that the maturity indexes are applicable when the structure follows the optimal curing conditions, otherwise the maturity method is inaccurate for the estimation of resistances, especially at older ages.

It is concluded that the maturity index estimates the compressive mechanical strength of the concrete in situ with the exponential function $f'c = e^{5.805 - \frac{30.890}{x}}$ based on the temperature history and that the precision of the estimated resistance is dependent on the overall quality control pre and post execution of the unit of the structure.

Key words: Index of maturity, early age, internal temperature of concrete....

Anahue Choquepuma Brucele Ramiro
Mallqui Ttupa Alberth Edward
Tesistas

Índice de madurez a edades tempranas y resistencia a compresión para
diseño de mezcla de pavimento rígido $f'_c = 245 \text{ Kg/cm}^2$, Ciudad Cusco
2016

**Tesis de Grado para optar el Título Profesional de
Ingeniero Civil**

Dr. Ing. José Felipe Marín Loaiza
Presidente de Tesis

M.Sc. Ing. Martín Washington Esquivel Zamora
Mgt. Ing. José Ronald Aguilar Huerta
Integrantes de Tesis

PhD. Aida Zapata Mar
Asesor de Tesis

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERÍA CIVIL
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

Cusco
2017

**ÍNDICE DE MADUREZ A EDADES TEMPRANAS Y RESISTENCIA A COMPRESIÓN
PARA DISEÑO DE MEZCLA DE PAVIMENTO RÍGIDO $f'_c = 245 \text{ kg/cm}^2$, CIUDAD CUSCO
2016**

Ha sido aprobado

Dr. Ing. José Felipe Marín Loaiza
Presidente Jurado de Tesis

M.Sc.Ing. Martin Washington Esquivel
Zamora
Primer Integrante de Jurado de Tesis

Mgt. Ing. José Ronald Aguilar Huerta
Segundo Integrante de Jurado de Tesis

PhD. Aida Zapata Mar
Asesor de Tesis



DEDICATORIA

*Para Dios, mi Madre, y para TI
en el Cielo, gracias por hacer
de mi quien SOY.*

*Para la vida que se fue y por la
vida nueva; que han sido y son
el motivo de este sueño, gracias
por existir.*

*Por mi Madre, Padre,
hermanos, compañera de vida
Zenia e hija; Vigand, que son la
Razón de esta Tesis.*

*Para mis familiares; Tios,
Primos y amigos que me
apoyaron todos los días para
alcanzar este sueño.*

BRANCH



*Para Dios, mi familia, amigos y
docentes que me apoyaron para
alcanzar este sueño*

ALBERTH

AGRADECIMIENTOS

Me invaden sentimientos de felicidad y agradecimiento al culminar mi trabajo de Grado, siendo un logro importante en mi formación profesional y en mi vida personal.

Ante todo, agradecer a dios por darme la sabiduría, conocimiento y guiarme por este camino de Ingenio y Creatividad y permitirme seguir adelante con mis sueños; mediante su hijo Jesús.

El presente trabajo de Grado, es el resultado del esfuerzo en el cual participaron; varias personas, acompañándome, corrigiéndome, dándome ánimo y apoyándome en todo momento

A la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco y la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, por darme la oportunidad de ser un profesional de su casa de Estudio; a los Ingenieros que integran la gran familia granate del olimpo, que, durante el proceso de formación, han aportado con sabiduría y conocimiento para ser un gran profesional.

También me complace agradecer el asesoramiento de PhD. Aida Zapata Mar del Departamento de la escuela profesional de Ingeniería de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco; quien, con la especialidad en el concreto, motivó para que mi interés creciera en la investigación, por la confianza que deposito en mí, y estuvo siempre pendiente y presente ante cualquier duda o iniciativa que tuviera.

De igual manera a nuestra comisión evaluadora; Dr. Ing. José Felipe Marín Loaiza, M.Sc.Ing. Martin Washington Esquivel Zamora y Mgt. Ing. José Ronald Aguilar Huerta. Por aceptar nuestro tema de Investigación; quienes, con sus conocimientos, experiencias, paciencia, motivación y por su visión crítica, hicieron crítica, hicieron posible este trabajo de grado.

Un inmenso agradecimiento a la empresa CONARENA C&G SRL por poner a disposición todos sus recursos, al gerente Ing. Cusiwallpa Jara Carlos Lucas por depositar su confianza en el proyecto de Tesis.

Es infinito las Gracias a las personas que no alcanzo a nombrar que han sido parte importante en la formación de mi persona, gracias a todos ellos.



ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	ii
SUMMARY	iii
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTOS	vii
ÍNDICE DE CONTENIDO	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE TABLAS	xv
ANEXOS	xvii
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO 1. GENERALIDADES	3
1.1. Título	3
1.2. Área de investigación	3
1.3. Autores	3
1.4. Asesora	3
1.5. Institución	3
1.6. Localización	3
1.7. Estructura de Tesis	4
CAPITULO 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
2.1. Identificación del problema	7
2.2. Formulación del problema objeto de investigación	8
2.2.1. Problema general	8
2.2.2. Problemas específicos	9
2.3. Justificación e importancia del problema	9
2.4. Objetivos de la investigación	11
2.4.1. Objetivo general	11
2.4.2. Objetivos específicos	11
CAPITULO 3. REVISIÓN DE LITERATURA	12
3.1. Antecedentes de la investigación	12
3.2. Bases teóricas filosóficas	13
3.3. Generalidades del método de madurez	15
3.4. Cambios de estado del concreto	15
3.5. Fenómenos térmicos en el concreto	17
3.6. Método de Madurez	17
3.6.1. Introducción al Método de Madurez	17
3.6.2. Madurez del concreto	18
3.6.3. Definición del Índice de Madurez	19
3.6.4. Concepto del Método de Madurez	19
3.6.5. Función de Madurez de Nurse-Saul	20
3.6.6. Función de Madurez de Arrhenius	22
3.6.7. Uso del Método de Madurez para predecir la Resistencia del Concreto	23
3.7. Comparación de las Funciones de Madurez	25
3.7.1. Factor de conversión de edad	26

3.7.2.	Valores de Sensibilidad de Temperatura.	27
3.7.3.	Datum de Temperatura.	28
3.7.4.	Gradiente térmico.....	29
3.7.5.	Energía de Activación.....	30
3.7.6.	Resumen de las dos funciones de Madurez.	32
3.8.	Reglamentación y Normativa estándar para la determinación de la madurez.	33
3.9.	Relación entre Índice de Madurez y Resistencia.	34
3.9.1.	Función Exponencial.	35
3.9.2.	Función Logarítmica.....	35
3.9.3.	Función Hiperbólica.....	35
3.10.	Limitaciones del Método de Madurez.....	38
3.10.1.	Diseño de Mezcla Específica para la relación Índice de madurez y resistencia.....	38
3.10.2.	Efectos de la temperatura de curado de resistencia a largo plazo.....	39
3.10.3.	Otros factores que afectan la resistencia del concreto.	43
3.11.	Aplicación del método de madurez.....	47
3.11.1.	Desarrollo de la relación resistencia-madurez.	47
3.11.2.	Estimación de la resistencia in-situ.....	49
3.11.3.	Verificación de resistencia in-situ.....	51
3.11.4.	Pruebas de resistencia en el lugar.	51
3.12.	Dispositivos de grabación madurez.....	52
3.12.1.	The System 4101 Concrete Maturity Meter.....	53
3.12.2.	INTELLIROCK II.	54
3.12.3.	The Command Center.....	55
3.13.	Fabricación de equipo de madurez.....	56
3.13.1.	Generalidades.....	56
3.14.	Resumen del método de madurez.....	57
3.15.	El concreto.....	58
3.15.1.	Cemento tipo HE.....	59
3.16.	Diseño de mezcla de concreto.	66
3.16.1.	Asentamiento o Slump.....	68
3.16.2.	Peso unitario y rendimiento.	69
3.16.3.	Contenido de aire en el concreto fresco.	70
3.17.	Recepción del concreto Premezclado.....	70
3.17.1.	Normatividad	71
3.17.2.	Módulo de Elasticidad.	72
CAPITULO 4. HIPÓTESIS Y VARIABLES.		79
4.1.	Hipótesis general.	79
4.2.	Hipótesis específicas.	79
4.3.	Identificación de las variables.	79
4.3.1.	Variables Independientes.....	79
4.3.2.	Variables Dependientes.	81
4.4.	Operacionalización de variables.....	82
4.1.	Matriz de consistencia.....	83
CAPITULO 5. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN		84

5.1.	Alcances de la investigación.	84
5.2.	Características de la investigación.	84
5.2.1.	Tipo de Investigación cuantitativo.	84
5.2.2.	Unidad de análisis.	85
5.2.3.	Población en estudio.	85
5.3.	Metodología de la investigación aplicada.	87
5.3.1.	Elaborar el índice de madurez.	87
5.3.2.	Estimación de la resistencia in situ.	88
CAPITULO 6. PLANTEAMIENTO DEL MODELO EXPERIMENTAL.		89
6.1.	Introducción.	89
6.1.1.	Técnica de recolección de datos de información.	89
6.1.2.	Mezclas de Concreto en Estudio.	91
6.2.	Caracterización de Materias Primas.	91
6.2.1.	Cemento.	91
6.2.2.	Elementos pétreos.	92
6.2.3.	Aditivo.	105
6.2.4.	Agua.	105
6.3.	Elaboración del índice de Madurez.	106
6.3.1.	Elaboración del concreto.	107
6.3.2.	Instrumentación con sensores de Temperatura a especímenes de concreto. ...	109
6.3.3.	Concreto en estado fresco.	110
6.3.4.	Concreto en estado endurecido.	115
CAPITULO 7. RESULTADOS.		119
7.1.	Características de Materias Primas.	119
7.1.1.	Cemento.	119
7.1.2.	Elementos pétreos.	120
7.1.3.	Aditivo.	125
7.1.4.	Agua.	126
7.2.	Elaboración del concreto.	126
7.2.1.	Diseño de mezcla.	126
7.2.2.	Determinación de la Resistencia Promedio Requerida.	127
7.2.3.	Concreto en estado fresco.	128
7.2.1.	Concreto en estado Endurecido.	130
7.3.	Perfiles térmicos.	138
7.3.1.	Historial de temperatura.	139
7.4.	Relación índice de madurez y resistencia.	142
7.4.1.	Índice de Madurez de Nurse-Saul.	142
7.4.2.	Índice de Madurez de Arrhenius.	149
7.4.3.	Comparación de funciones de madurez.	153
CAPITULO 8. APLICACIÓN DEL MÉTODO DE MADUREZ.		157
8.1.	Introducción.	157
8.2.	Descripción del Proyecto.	158
8.2.1.	Nombre del proyecto.	158
8.2.2.	Naturaleza del Proyecto.	158

8.2.3.	Localización.....	159
8.3.	Diseño de Mezcla y caracterización de los materiales.....	160
8.3.1.	Control de características de materias primas.....	160
8.4.	Estimación de la resistencia in-situ.....	160
8.4.1.	Instrumentalización del tramo en estudio.....	161
8.4.1.	Elaboración de cilindros y vigas de concreto in situ.....	164
8.4.2.	Control de Calidad en el concreto Fresco.....	164
8.4.1.	Elaboración de especímenes de concreto en Obra.....	167
8.4.2.	Historial de temperatura.....	167
8.4.3.	Medición del índice de Madurez.....	169
8.4.1.	Validación del índice de madurez.....	170
8.5.	Comparación de las resistencias pronosticadas con el índice de madurez in situ... 170	
8.5.1.	Validación de método de madurez por Nurse -Saul.....	173
8.5.2.	Ensayo de Extracción de Núcleos (diamantina).....	176
CAPITULO 9.	PROPIEDADES TÉRMICAS.....	178
9.1.	Conductividad térmica.....	178
9.1.1.	Flujo de calor.....	178
9.2.	Gradiente térmico.....	179
9.2.1.	Alabeo Diurno.....	180
9.2.2.	Alabeo Nocturno.....	181
9.2.3.	Gradientes del Concreto en Campo.....	181
CAPITULO 10.	ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	186
10.1.	Análisis de resultados.....	186
10.2.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	189
CAPITULO 11.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	191
11.1.	Conclusión general.....	191
11.2.	Conclusiones específicas.....	191
11.3.	Implicancias para Futuras Investigaciones.....	192
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....		193
REFERENCIAS BIBLIOGRAFÍA.....		195
PANEL FOTOGRÁFICO.....		252
PLANO DE UBICACIÓN DE SENSORES.....		263

ÍNDICE DE FIGURAS

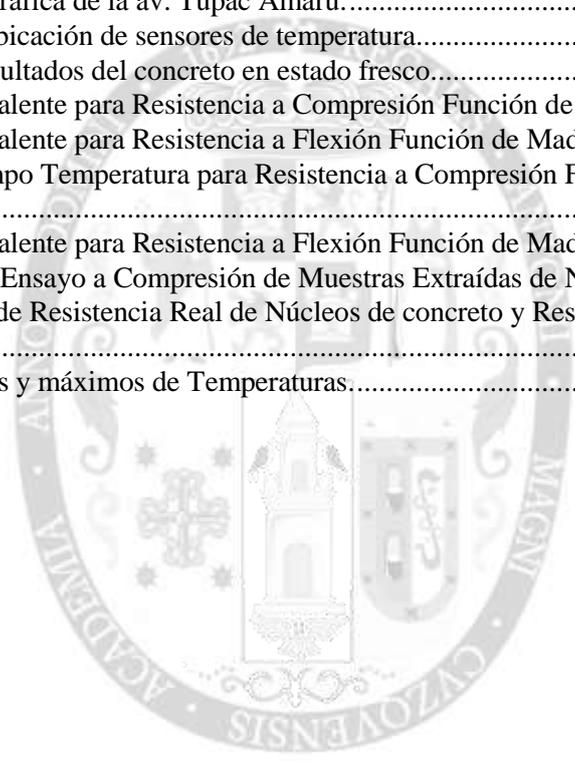
Figura 3.1 Resultados de los Experimentos Realizados por Nurse.....	18
Figura 3.2 Diagrama de la Regla de Madurez de Nurse.....	20
Figura 3.3: Diagrama de la Madurez del Concreto Usando la Función de Madurez Nurse-Saul.	21
Figura 3.4 Resistencia versus edad del concreto curado a diferentes temperaturas.	24
Figura 3.5 Relación Resistencia-Índice de Madurez mediante la función NSM para la Figura 3.4 ($T_0 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$).....	25
Figura 3.6 Conversión de los Datos de Resistencia- Tiempo a Resistencia-Índice de Madurez.....	35
Figura 3.7 Various strength-maturity functions.....	37
Figura 3.8 Resultados de Los Experimentos de Nurse (1949).....	39
Figura 3.9 La temperatura afecta a la fuerza a largo plazo (Saul 1951).....	40
Figura 3.10 El efecto de cruce debido a las temperaturas de curado.	41
Figura 3.11 Efecto del tiempo de curado húmedo sobre la ganancia de resistencia del concreto.	45
Figura 3.12 Influencia del curado húmedo en la resistencia a compresión del concreto	46
Figura 3.13 Example of a strength-maturity relationship using Nurse-Saul maturity function with $T_0 = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$	49
Figura 3.14 Example of estimating the in-place strength of the concrete.....	50
Figura 3.15 The System 4101 Concrete Maturity Meter.....	54
Figura 3.16 intelliROCK consola II y el sensor (Fuente: Engius construcción de Inteligencia).....	54
Figura 3.17 Pocket PC The Command Center.....	55
Figura 3.18 Sensor de temperatura The Command Center.....	55
Figura 3.19. Relación esfuerzo – deformación en agregado, concreto, pasta endurecida y mortero.....	76
Figura 4.1 Operacionalización de variables.....	82
Figura 5.1 Correlación de Variable independiente y Variable dependiente.....	84
Figura 6.1 Equipo de madurez N° 01.	90
Figura 6.2 Equipo de madurez N° 02.	90
Figura 6.3 Elaboración del concreto.....	107
Figura 6.4 Elaboración de vigas y cilindros de concreto.	107
Figura 6.5 Fabricación de cilindros de concreto.....	108
Figura 6.6 Introducción de sensor de temperatura en Cilindro de concreto.....	109
Figura 6.7 Olla de Washington.....	115
Figura 6.8 Ensayo de Resistencia a compresion	116
Figura 6.9 Ensayo de Resistencia a flexión	117
Figura 6.10 Montaje ensayo de módulo de elasticidad en cilindros de concreto.	118
Figura 6.11 módulo de elasticidad en cilindros de concreto.....	118
Figura 7.1 Curva Granulométrica de la mezcla de agregado fino.....	123
Figura 7.2 Curva Granulométrica de la mezcla de agregados gruesos.	125
Figura 7.3 Temperatura del concreto en estado fresco. 1)Muestra del concreto, 2) Verificación de registro de datos de temperatura del concreto, 3) lectura de temperatura promedio para un minuto, 4) toma de datos del espécimen de concreto y 5) control de la temperatura del concreto para espécimen de concreto.....	129
Figura 7.4 Asentamiento del concreto en estado fresco 1)procedimiento del ensayo y 2) despues del ensayo	130
Figura 7.5 Peso Unitario del concreto en estado fresco.....	130
Figura 7.6 Contenido de aire del concreto en estado fresco 1)Ejecucion del ensayo y 2) lectura del Dial.....	130
Figura 7.7 Resistencia de Cilindros de concreto.....	132
Figura 7.8 Ensayo de Resistencia a Compresion.....	133
Figura 7.9 Despues de ensayo de Compresion Simple.....	133
Figura 7.10 Resistencia a flexión.	134
Figura 7.11 Equipo de Ensayo a Flexión.....	135
Figura 7.12 Ensayo a Flexión en Vigas.....	135

Figura 7.13	Falla en los 2/3 de la Viga.....	135
Figura 7.14	Modulo de Elasticidad Estático por Compresión Simple.....	137
Figura 7.15	Ensayo de Modulo de Elasticidad.....	137
Figura 7.16	Despues de ensayo de Compresion Simple.....	137
Figura 7.17	Perfil térmico durante las primeras 24 horas.....	139
Figura 7.18	Perfil térmico durante los primeros tres Días.....	140
Figura 7.19	Perfil térmico durante los siete días.....	140
Figura 7.20	Perfil térmico durante 70 Días.....	141
Figura 7.21	Diagrama de Madurez Usando la Función de Madurez de Nurse-Saul:.....	143
Figura 7.22	Curva Índice de Madurez Nurse-saul y resistencia a Compresion.....	144
Figura 7.23	Funciones de Madurez de Nurse Saul para resistencia a compresion.....	145
Figura 7.24	Curva Índice de Madurez Nurse-Saul para resistencia a Flexión.....	146
Figura 7.25	Funciones de Madurez Nurse-Saul para resistencia a flexion.....	146
Figura 7.26	Curva Índice de Madurez Nurse-saul y Modulo de Elasticidad.....	147
Figura 7.27	Funciones de Madurez de Nurse Saul para Modulo de Elasticidad.....	147
Figura 7.28	Curva Índice de Madurez Arrhenius y resistencia a Compresion.....	150
Figura 7.29	Funciones de Madurez de Arrhenius para resistencia a compresion.....	151
Figura 7.30	Curva Índice de Madurez Arrhenius para resistencia a Flexión.....	152
Figura 7.31	Funciones de Madurez Arrhenius para resistencia a flexion.....	152
Figura 7.32	Funciones de Madures de Nurse-Saul y Arrhenius.....	154
Figura 7.33	Funciones de Madures de Nurse-Saul y Arrhenius.....	155
Figura 8.1	Ubicación del proyecto, Av. Tupac Amaru-Progresivas 1+000 a 1+280.....	159
Figura 8.2	Ubicación en planta de los sensores en la Est. Km 1+050.....	162
Figura 8.3	Ubicación en planta de los sensores en la Est. Km 1+145.....	163
Figura 8.4	Temperatura del concreto en estado fresco.....	165
Figura 8.5	Asentamiento del concreto en estado fresco.....	165
Figura 8.6	Peso Unitario del concreto en estado fresco.....	166
Figura 8.7	Contenido de aire del concreto en estado fresco.....	166
Figura 8.8	Asentamiento del concreto estacion 1+145.....	166
Figura 8.9	Asentamiento del concreto estacion 1+050.....	166
Figura 8.10	Registro de Temperatura interna del concreto.....	168
Figura 8.11	Registro de la Temperatura promedio del concreto, Rasante y la Intemperie.....	168
Figura 8.12	Extracción de datos del equipo N° 01.....	170
Figura 8.13	Extracción de datos del equipo N° 02.....	170
Figura 8.14	Verificación de la Función de Madurez de Arrhenius – Resisitencia Compresion.....	172
Figura 8.15	Verificación de la Función de Madurez de Arrhenius – Resistencia a Flexión.....	173
Figura 8.16	Verificación de la Función de Madurez de Nurse-Saul Compresion.....	174
Figura 8.17	Verificación de la Función de Madurez de Nurse Saul – Resisitencia flexion.....	175
Figura 8.18	Ensayo de extracción de Núcleos de Concreto del pavimento.....	176
Figura 8.19	Ensayo Compresión Simple en núcleos de concreto.....	176
Figura 8.20	Verificación de la Función de Madurez de Arrhenius – Resistencia de Nucleos de concreto.....	177
Figura 8.21	Verificación de la Función de Madurez Nurse-Saul– Resistencia de Nucleos de concreto.....	177
Figura 9.1	Radiacion solar en las horas del día.....	178
Figura 9.2	Variacion de la conductividad Térmica.....	179
Figura 9.3	Condición de día en Losa.....	181
Figura 9.4	condición de noche para losa.....	181
Figura 9.5	Gradiente térmico en la estación 1+050.....	182
Figura 9.6	Gradiente termico en la estacion 1+145.....	183
Figura 9.7	envolvente gradiente termico estacion 1+145.....	183
Figura 9.8	envolvente gradiente termico estacion 1+050.....	184
Figura 9.9	Envolvente termica del medio ambiente.....	184

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Lapsos y Actividades Características de Estados de un Concreto Ordinario a Temperatura Normal	16
Tabla 3.2 Datum temperature values proposed by Carino and Tank (1992).....	29
Tabla 3.3 Activation energy values proposed by various researchers (Carino 1991)	31
Tabla 3.4 Activation energy values proposed by Carino and Tank (1992).....	31
Tabla 3.5 Tipos y clasificación de aditivos.....	64
Tabla 3.6 Tipos de aditivos, efectos y aplicaciones.....	65
Tabla 3.7. Factores que afectan al módulo de elasticidad del concreto.....	77
Tabla 4.1 Matriz de consistencia.	83
Tabla 5.1 Tamaño de Muestra para la relación índice de madurez y resistencia (laboratorio y campo).	86
Tabla 6.1 Requisitos físicos del cemento Pórtland de alta resistencia tipo HE.	91
Tabla 6.2 Requisitos químicos del cemento Pórtland de alta resistencia tipo HE.....	92
Tabla 6.3 Requisitos mecánicos del cemento Pórtland de alta resistencia tipo HE.....	92
Tabla 6.4 Normas Análisis Físicoquímico de los elementos pétreos.	93
Tabla 6.5 Normatividad de las propiedades físico-mecánicas.	94
Tabla 6.6 Peso mínimo aproximado de material fino que pasa el tamiz de 75 μm	96
Tabla 6.7 Cantidad mínima de muestra de ensayo granulométrico de agregado grueso.	97
Tabla 6.8 Límites de granulometría según el ASTM C 33 para agregados finos.....	98
Tabla 6.9 Requisitos de granulometría de agregado grueso según el ASTM C 33.	98
Tabla 6.10 Dimensiones de los calibradores para índice de aplanamiento y alargamiento.....	103
Tabla 6.11 Peso mínimo del material para ensayo de índice de aplanamiento y alargamiento.....	103
Tabla 6.12 Número de esferas y masa de la carga.	105
Tabla 6.13 Especificaciones de la norma ASTM C – 494 para uso de Aditivo.	105
Tabla 6.14 Requisitos de agua para concreto.....	106
Tabla 6.15 Resumen de Normatividad de ensayos del concreto en estado fresco.....	110
Tabla 6.16 Criterios de aceptación de temperaturas.	111
Tabla 6.17 Especificaciones de la NTP 339.114 para asentamiento.....	112
Tabla 6.18 Equipos utilizados para el asentamiento:	112
Tabla 6.19 especificaciones y tolerancias para peso unitario.....	113
Tabla 7.1 Resultados de características físicas del cemento Pórtland de alta resistencia tipo HE.....	120
Tabla 7.2 Resultados de características químicas del cemento Pórtland de alta resistencia tipo HE. .	120
Tabla 7.3 Resultados de propiedades mecánicas del cemento Pórtland de alta resistencia tipo HE. ..	120
Tabla 7.4 Análisis químico de elementos pétreo.	121
Tabla 7.5 Resumen de características físico-mecánicas de agregado fino.	122
Tabla 7.6 Resumen de características físico-mecánicas de agregado grueso.	124
Tabla 7.7 Características del aditivo.....	125
Tabla 7.8 Especificaciones del Aditivo.	126
Tabla 7.9 Resultado análisis físicoquímico del agua.	126
Tabla 7.10 Resumen de diseño de mezcla de planta concretera [Peso por un metro cúbico de concreto	127
Tabla 7.11 Resumen de diseño de mezcla.	128
Tabla 7.12 Resumen de resultados del concreto en estado fresco.....	128
Tabla 7.13 Tolerancias permitidas para la edad de ensayo.	131
Tabla 7.14 Resistencia de Cilindros de concreto.	131
Tabla 7.15 Resumen de Resistencia a flexión para la mezcla en estudio.....	133
Tabla 7.16 Módulo de Elasticidad Estático por Compresión Simple.....	136
Tabla 7.17 Resumen de propiedades físico mecánicas a flexión y compresión.....	138
Tabla 7.18 Resumen de Índice de Madurez Nurse-Saul para Cilindros de concreto.	144

Tabla 7.19 Resumen de Índice de Madurez Nurse-Saul para vigas.....	145
Tabla 7.20 Resumen de Índice de Madurez Modulo de Elasticidad Nurse-Saul para Cilindros de concreto.....	147
Tabla 7.21 Resumen de Funciones de Resistencia a Flexo-Compresión e Índice de Madurez Nurse Saul.....	149
Tabla 7.22 Resumen de Índice de Madurez Arrhenius para Cilindros de concreto.....	150
Tabla 7.23 Resumen de Índice de Madurez Arrhenius para vigas.....	151
Tabla 7.24 Resumen de Funciones de Resistencia a Flexo-Compresión e Índice de Madurez Arrhenius.....	153
Tabla 7.25 Conversión de la función de Madurez de Nurse-Saul en Edad equivalente.....	154
Tabla 7.26 Resumen de ecuaciones para la Función de madurez Nurse-Saul y Arrhenius.....	156
Tabla 7.27 Resumen de ecuaciones de mejor ajuste de correlación para la Función de madurez Nurse-Saul y Arrhenius.....	156
Tabla 8.1 Coordenadas del área de intervención.....	159
Tabla 8.2 Ubicación política.....	160
Tabla 8.3 Ubicación geográfica de la av. Túpac Amaru.....	160
Tabla 8.4 Resumen de Ubicación de sensores de temperatura.....	164
Tabla 8.5 Resumen de resultados del concreto en estado fresco.....	165
Tabla 8.6 $f'c$ Edad Equivalente para Resistencia a Compresión Función de Madurez Arrhenius.....	171
Tabla 8.7 $f'c$ Edad Equivalente para Resistencia a Flexión Función de Madurez Arrhenius.....	172
Tabla 8.8 $f'c$ Factor Tiempo Temperatura para Resistencia a Compresión Función de Madurez Nurse-Saul.....	173
Tabla 8.9 $f'c$ Edad Equivalente para Resistencia a Flexión Función de Madurez de Nurse-Saul.....	174
Tabla 8.10 Resultados de Ensayo a Compresión de Muestras Extraídas de Núcleos de concreto.....	176
Tabla 8.11 Comparación de Resistencia Real de Núcleos de concreto y Resistencia estimada por el método de madurez.....	177
Tabla 9.1 valores mínimos y máximos de Temperaturas.....	185



ANEXOS

Anexo A1 Certificado de calidad del Cemento Pórtland tipo HE.....	199
Anexo A2 Informe de análisis Fisicoquímico del agregado Cantera Sertraq (Agregado fino).	200
Anexo A 3 Informe de análisis Fisicoquímico del agregado Cantera Abrill (agregado grueso y fino).201	
Anexo A 4 Certificado de calidad del aditivo ULMEN W-80.....	202
Anexo A 5 Informe de análisis 11 Fisicoquímico del agua.	203
Anexo A 6 Descripción petrográfica macroscópica, briqueta de concreto.	204
Anexo B 1 Ensayo de Contenido de humedad del agregado Fino (Fino 01) - Cantera Abrill (Arena Gruesa).	205
Anexo B 2 Ensayo de Contenido de humedad del agregado Fino (Fino 02) - Cantera Sertraq (Arena Fina).	206
Anexo B 3 Ensayo Cantidad de material fino que pasa el tamiz N° 200 del agregado Fino (Fino 01) - Cantera Abrill (Arena Gruesa).	207
Anexo B 4 Ensayo Cantidad de Material fino que pasa el tamiz N° 200 del agregado Fino (Fino 02) - Cantera Sertraq (Arena Fina).....	208
Anexo B5 Ensayo Análisis Granulométrico del agregado Fino (Fino 01) - Cantera Abrill (Arena Gruesa).	209
Anexo B6 Ensayo Análisis Granulométrico del agregado Fino (Fino 02) - Cantera Sertraq (Arena Fina).	210
Anexo B 7 Mezclas de Agregados Finos (Fino 01 y 02) - Cantera Sertraq (Arena Gruesa y Fina)....	211
Anexo B 8 Ensayo Peso Específico y Absorción del agregado Fino (Fino 01) - Cantera Abrill (Arena Gruesa).	212
Anexo B 9 Ensayo Peso Específico y Absorción del agregado Fino (Fino 02) - Cantera Sertraq (Arena fina).	213
Anexo B 10 Ensayo Peso Unitario Vacíos del agregado Fino (Fino 01) - Cantera Abrill (Arena Gruesa).	214
Anexo B 11 Ensayo Peso Unitario Vacíos del agregado Fino (Fino 02) - Cantera Sertraq (Arena Fina).	215
Anexo B 12 Ensayo de Contenido de humedad del agregado Grueso (Grueso 01) - Cantera Abrill (piedra chancada ¾”).	216
Anexo B 13 Ensayo de Contenido de humedad del agregado Grueso (Grueso 02) - Cantera Abrill (piedra chancada ½”).	217
Anexo B 14 Ensayo Cantidad de Material Fino que pasa el tamiz N° 200 del agregado Grueso (Grueso 01) - Cantera Abrill (piedra chancada ¾”).	218
Anexo B 15 Ensayo Cantidad de Material Fino que pasa el tamiz N° 200 del agregado Grueso (Grueso 02) - Cantera Abrill (piedra chancada ½”).	219
Anexo B 16 Ensayo Análisis Granulométrico del agregado Grueso (Grueso 01) - Cantera Abrill (piedra chancada ¾”).	220
Anexo B 17 Ensayo Análisis Granulométrico del agregado Grueso (Grueso 02) - Cantera Abrill (piedra chancada ½”).	221
Anexo B 18 Mezcla de agregados Gruesos (Grueso 01 y 02) - Cantera Abrill (grava angulosa de 1”).	222
Anexo B 19 Ensayo Peso Específico y Absorción del agregado Grueso (Grueso 01) - Cantera Abrill (Piedra chancada ¾”).	223
Anexo B 20 Ensayo Peso Específico y Absorción del agregado Grueso (Grueso 02) - Cantera Abrill (Piedra chancada 1/2”).	224
Anexo B 21 Ensayo Peso Unitario y Vacíos del agregado Grueso (Grueso 01) - Cantera Abrill (Piedra chancada ¾”).	225
Anexo B 22 Ensayo Peso Unitario y Vacíos del agregado Grueso (Grueso 01) - Cantera Abrill (Piedra chancada ¾”).	226

Anexo B 23 Ensayo Peso Unitario y Vacíos del agregado Grueso (Grueso 02) - Cantera Abrill (Piedra chancada 1/2").....	227
Anexo B 24 Ensayo Peso Unitario y Vacíos del agregado Grueso (Grueso 02) - Cantera Abrill (Piedra chancada 1/2").....	228
Anexo B 25 Ensayo Índice de aplanamiento y alargamiento del agregado Grueso (Grueso 01) - Cantera Abrill (piedra chancada 3/4").	229
Anexo B 26 Ensayo Índice de aplanamiento y alargamiento del agregado Grueso (Grueso 02) - Cantera Abrill (piedra chancada 1/2").	230
Anexo B 27 Ensayo Desgaste por Abrasión en la máquina de los Ángeles agregado Grueso - Cantera Abrill.	231
Anexo C 1 Gradación continua de agregado grueso.....	232
Anexo C 2 Gradación continua de agregado fino.	233
Anexo C 3 Peso unitario y vacíos del grueso con gradación continua.....	234
Anexo C 4 Diseño de Mezcla Para Concreto Hidráulico M 2.	235
Anexo C 5 Diseño de mezcla de concreto hidráulico M 3.....	238
Anexo D 1 Propiedades del concreto en estado fresco y verificación del rendimiento en laboratorio. .	241
.....	241
Anexo D 2 Propiedades del concreto en estado fresco in situ y verificación del rendimiento Estación 1+145.	242
Anexo D 3 Propiedades del concreto en estado fresco in situ y verificación del rendimiento Estación 1+050.	243
Anexo E 1 Resistencia a compresión.....	244
Anexo E 2 Resistencia a flexión.....	245
Anexo E 3 Modulo de Elasticidad Estático por Compresión Simple.....	250





INTRODUCCIÓN

Con el fin de tener un mejor control de calidad del concreto en los procesos de construcción, tener una planificación acorde a las propiedades mecánicas en estructuras de pavimento rígido, optimizar el tiempo y la productividad; es necesario implementar el método de madurez. El método de madurez se ha estudiado a partir de 1950 hasta la actualidad, aportando investigaciones que han logrado que el método de madurez sea una práctica estándar para determinar la resistencia del concreto in situ.

El método de madurez estudia el efecto del historial de temperatura interna del concreto producto de la hidratación de los materiales cementicios y la influencia de la intemperie sobre la resistencia mecánica del concreto.

La relación entre el índice de madurez y el desarrollo de resistencia mecánica del concreto, permite calcular resistencias in situ; mediante el uso de dispositivos de registro de temperatura, que cuantifica y registra la temperatura del concreto.

El método de madurez permite estimar cuando la resistencia in situ ha alcanzado la resistencia de diseño; permitiendo que los procesos de construcción, aplicación de cargas de construcción o la apertura al tráfico se programen de una manera más eficiente.

Para que el método de madurez estime resultados, requiere estudiar las propiedades físico, químicos y mecánicas de los componentes así como la intemperie.

El método de madurez considera una relación única de índice de madurez y resistencia, siendo su uso específico para una mezcla particular de concreto, ya que la energía de activación y el desarrollo de la resistencia es único; por lo tanto, cada vez que se cambia una mezcla de concreto, por variaciones en la proporción agua-cemento, tipo de cemento y diseño de mezcla debe desarrollarse una nueva relación de índice de madurez-resistencia.



El método de madurez requiere que el concreto sea curado para no interferir en el proceso de hidratación de los componentes del cemento y sea manipulado adecuadamente para que el desarrollo de la resistencia mecánica del concreto no sea afectado.

En la actualidad, la ASTM C 1074 es una práctica estándar para el uso del método de madurez y muchos países están en proceso de implementar, especificaciones que permitan un mejor control de calidad del concreto.





CAPITULO 1. GENERALIDADES

1.1. Título.

“Índice de madurez a edades tempranas y resistencia a compresión para diseño de mezcla de pavimento rígido $f'_c = 245 \text{ Kg/cm}^2$, ciudad Cusco 2016”.

1.2. Área de investigación.

La presente investigación estará dirigida al área de Construcciones.

1.3. Autores.

Anahue Choquepuma Brucele Ramiro 100481 - b

Mallqui Ttupa Alberth Edward 093129 - k

1.4. Asesora.

PhD. Aida Zapata Mar

1.5. Institución.

Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Facultad de Arquitectura e Ingeniería Civil

Escuela Profesional de Ingeniería Civil

1.6. Localización.

Región : Cusco

Provincia : Cusco

Distrito : Wanchaq



1.7. Estructura de Tesis.

La presente investigación se desarrolla en diez capítulos, a continuación, se describe brevemente la metodología seguida en cada capítulo.

En el **Capítulo 1** se aborda las generalidades de la tesis de pregrado como son: título, autores, área de investigación, institución, localización de la investigación y estructura de la tesis.

En el **Capítulo 2** se muestra el planteamiento del problema a investigar, los aspectos más relevantes del problema, la formulación del problema, la justificación e importancia de la investigación y los objetivos esperados para la presente investigación.

En el **Capítulo 3** se presenta la revisión bibliográfica acerca del método de madurez y conceptos como; calor de hidratación, métodos para estimar temperaturas de un elemento de concreto y efectos de temperaturas internas que inciden en la resistencia final del concreto.

Los principales aspectos tratados aquí tienen relación con algunos fundamentos teóricos sobre la dependencia de la resistencia del concreto con la temperatura, la temperatura del concreto a edades tempranas y posteriores, el calor de hidratación y la ganancia de resistencia. Asimismo, se mencionan desde un punto de vista global, los efectos que las condiciones ambientales ocasionan en las propiedades del concreto tanto en estado fresco (trabajabilidad) como en estado endurecido (resistencia a compresión), analizando cada factor de influencia, desde puntos de vista tecnológicos.

También, se analiza desde una perspectiva más científica la influencia que ejerce el aire incorporado, finos de arcilla en el agregado y contenido de humedad en el curado a las condiciones ambientales en el concreto, relacionados con la temperatura interna del concreto y efecto en la resistencia físico-mecánicas del concreto endurecido.



Finalmente se mencionan la aplicación del método de madurez para estimar la resistencia del concreto insitu y minimizar los efectos perjudiciales de las altas y bajas temperaturas ambientales en las propiedades del concreto.

En el **Capítulo 4** se plantea la hipótesis, la identificación de variables, se explican y detallan las variables independientes y dependientes para ser estudiados en esta tesis de pregrado, tales como el índice de madurez y la resistencia con el objetivo de encontrar una relación entre estas dos variables.

En el **Capítulo 5** se plantea la metodología de investigación, mayores alcances, y características de la investigación.

En el **Capítulo 6** se definen el planteamiento del modelo experimental, características de las materias primas, la metodología seguida para la realización de los ensayos correspondientes a la serie experimental y el equipo de madurez utilizado en todas las campañas experimentales.

En el **Capítulo 7** se describe los resultados obtenidos en la campaña experimental; características de materias primas, elaboración del índice de madurez, la relación del índice de madurez, la resistencia y el diseño de mezcla.

Los resultados se dividen en dos categorías: Resultados de laboratorio y aplicación del método de madurez in situ. En ambos casos se presenta un análisis comparativo entre las dos funciones de madurez de Arrhenius y Nurse Saul.

En el **Capítulo 8**, se describe la aplicación del método de madurez en un pavimento rígido de concreto. El objeto de este capítulo es el de conocer la eficiencia del método y discutir la influencia de la temperatura interna del concreto, se resalta la importancia del historial de temperatura en aplicaciones a nivel industrial que son viables de implementación y optimizar el control de calidad del concreto desarrollando una propuesta metodológica de estimación de resistencia in-situ.



En el **Capítulo 9**, se describe las propiedades térmicas producidas en la pavimentación en estudio, describiendo el flujo de calor, conductividad térmica, gradientes térmicos y alabeo que se produce en el pavimento durante de día y de noche.

En el **Capítulo 10**, se presenta el análisis e interpretación de resultados de la metodología propuesta, se analizan los resultados obtenidos, mostrando el comportamiento térmico del concreto y la concordancia de las curvas térmicas obtenidas con las programadas y con las estimadas numéricamente por medio del método de madurez. Por último, se analiza los resultados correspondientes al concreto en estado fresco y en estado endurecido.

En el **Capítulo 11**, se presentan las conclusiones generales derivadas del programa de investigación, que responden al objetivo principal propuesto y se exponen las conclusiones específicas que obedecen a las diferentes hipótesis planteadas, definiéndose las mismas de forma detallada. Así mismo, se presentan las diferentes líneas futuras de investigación surgidas como consecuencia de los trabajos desarrollados en la presente investigación.

Por último, en el apartado de **Referencias**, se recogen las fuentes bibliográficas citadas en la presente investigación.

En el **Anexo A** se amplía la información relativa a certificados de calidad del cemento, aditivo, elementos pétreos, el agua utilizado, descripción petrográfica y macroscópica de especímenes de concreto. El **Anexo B** incluye todos los ensayos de laboratorio de elementos pétreos. En el **Anexo C** se muestran el procedimiento metodológico para el diseño de mezcla propuesto. El **Anexo D** contiene los resultados del concreto en estado fresco. Finalmente, en el **Anexo E** se presentan las propiedades físicas mecánicas del concreto en estado endurecido.



CAPITULO 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. Identificación del problema.

Los estudios que se realizan en el Perú; para determinar la resistencia de un pavimento rígido o una estructura de concreto se realizan mediante ensayos en laboratorios; tal como lo establecen la ASTM ⁽¹⁾ C 39/C39M (Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens), la NTP⁽²⁾ 339.034 (Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto en muestras cilíndricas) y MTC⁽³⁾ E 704 (Resistencia a la compresión testigos cilíndricos). Estudios muestran que los resultados utilizando este método difieren de la resistencia de la estructura real (Torre & Aspilcueta, 2013); así mismo investigaciones (Nurse 1949 & Saul 1951) indican que el concreto desde su colado in-situ experimenta cambios severos en su estructura interna que inciden en las propiedades físico – mecánicas del concreto endurecido.

ACI ⁽⁴⁾ 228.1 menciona que: “Resulta inusual que el concreto de la estructura tenga las mismas propiedades que los cilindros normalizados a la misma edad”, por lo tanto, las pruebas que se realizan en laboratorios no proporcionan información real del comportamiento del concreto in-situ.

Las resistencias a compresión de concreto se obtienen en laboratorio tal como lo establece la NTP 339.034; estos resultados son a condiciones ambientales óptimos (temperatura ambiente de curado); sin embargo, el pavimento rígido in situ muestra diferentes condiciones de curado que no se asemejan al curado en laboratorio y no se puede determinar las resistencias aproximadas reales del concreto (García, 2007).

⁽¹⁾ American Standard of Testing and Materials.

⁽²⁾ Norma técnica peruana.

⁽³⁾ Ministerio de Transportes y Comunicaciones

⁽⁴⁾ American Concrete Institute.



Las deflexiones que se presentan en estructuras de pavimento rígido: tales como alabeo (convexo o cóncavo); están relacionados con los gradientes de temperatura y humedad que se dan a edades tempranas (García, 2007); y el no tener en cuenta esta fenómeno in situ incrementa este problema.

Los cortes de juntas de contracción longitudinal y transversal en el pavimento rígido, se realizan bajo criterios empíricos (ALCONPAT⁽⁵⁾, 2013), mas no de acuerdo a la resistencia que alcanza el concreto o la relación de temperatura que existe entre el ambiente y el concreto para definir el momento de corte de juntas.

Las resistencias que el concreto alcance, es un limitante para la apertura al tránsito; mientras no se sepa con exactitud las resistencias en ese instante, no se podrá determinar en qué momento dar apertura adecuada a ésta; si se apertura el pavimento al tránsito, cuando aún la resistencia a flexión y compresión del concreto no han llegado a las cargas de diseño; la estructura del pavimento se verá afectada.

Por estas razones descritas es necesario utilizar un método más eficiente de control de calidad de la resistencia del concreto utilizado en pavimentos, éste es el que se propone en la presente investigación, para superar las deficiencias y vacíos que los métodos convencionales dejan en el estudio del comportamiento y la evolución de resistencia del concreto.

2.2. Formulación del problema objeto de investigación.

2.2.1. Problema general.

PG: ¿Es posible estudiar la relación del índice de madurez a edades tempranas y resistencia a compresión para diseño de mezcla de pavimento rígido $f'_c = 245 \text{ kg/cm}^2$?

⁽⁵⁾ Revista ALCONPAT, Volumen 3, Número 2, mayo - agosto 2013, Páginas 114 – 124 (Fisuras de contracción en pavimentos de hormigón y el aserrado de juntas)



2.2.2. Problemas específicos.

PE1: ¿La temperatura influye en el índice de madurez a edades tempranas y resistencia a compresión para diseño de mezcla de pavimento rígido $f'_c = 245 \text{ kg/cm}^2$?

PE2: ¿El tiempo de curado, afecta al índice de madurez a edades tempranas y resistencia a compresión para diseño de mezcla de pavimento rígido $f'_c = 245 \text{ kg/cm}^2$?

PE3: ¿Será posible estimar in-situ y tiempos reales el índice de madurez a edades tempranas y resistencia a compresión para diseño de mezcla de pavimento rígido $f'_c = 245 \text{ kg/cm}^2$?

2.3. Justificación e importancia del problema.

En el Perú, el comportamiento del concreto no es analizado en condiciones reales in-situ y la mayoría de ensayos o procedimientos convencionales son adecuados para la determinación de propiedades del concreto de manera aislada, sin embargo, utilizando la relación del índice de madurez y el desarrollo de resistencia del concreto, se puede estimar diferentes propiedades físico-mecánicas del concreto.

Los cambios volumétricos, debido a variaciones de temperatura y contenido de humedad producen tensiones de tracción provocando fisuras aleatorias. La presencia de fisuras de contracción, reducen su vida útil y generan incremento de costos en rehabilitación y mantenimiento (Barreda, M F; Naber, M J; Quispe Sallo, I; Sota, J S, 2013). La relación de índice de madurez y resistencia del concreto hace posible una estimación de la influencia de la temperatura de curado en el proceso de endurecimiento del concreto y la velocidad de hidratación del cemento, haciendo posible ver el gradiente térmico y las deformaciones que se



presentan en diferentes puntos del pavimento rígido: tales como alabeo (convexo o cóncavo) en el proceso de endurecimiento.

Los estudios de las propiedades de resistencia del concreto a edades tempranas determinan; funcionalidad, durabilidad, control del vibrado, sugerir edades para desencofrar, determinar el tiempo para la ejecución de juntas, texturización, determinar edades para soportar las sollicitaciones de resistencia de la estructura, y dar apertura al tránsito (Barreda, M F; Naber, M J; Quispe Sallo, I; Sota, J S, 2013). Con los métodos de estimación de índice de madurez, la información de las resistencias alcanzadas a edades tempranas del concreto, es suministrada en tiempo real, dado que las mediciones de índice de madurez son realizadas in-situ en cualquier momento.

Este método optimiza, el flujo de trabajo en la construcción, la programación de las actividades, costo y calidad de la construcción; basados en información de resistencia más precisa in-situ. Por lo cual; es necesario implementar este modelo predictivo que entregue resultados de acuerdo a las situaciones y tiempo real en las que se encuentra expuesta el concreto.

El método de madurez permite estimar la resistencia del concreto, para un momento determinado en función del historial tiempo y temperatura de la estructura en estudio. El estudio de la evolución y comportamiento del pavimento rígido a edades tempranas es importante para procesos constructivos con concreto. El método de madurez es un ensayo tipificado como no destructivo, considerada como una buena práctica para determinar la evolución de resistencias in-situ y en tiempo real desde que el concreto se encuentra en su estado fresco, como lo establecen los Estándares Internacionales ASTM C- 1074 "Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method", el cual no está siendo implementado en nuestros controles de calidad, a pesar de estar normado y descrito en la NTP



339.217 "Método de ensayo normalizado para la estimación de la resistencia del concreto por el método de madurez".

Por lo tanto, el estudio de las ventajas y las limitaciones de las variables involucradas que intervienen es este proceso, permitirá realizar una mejor predicción de la resistencia del concreto.

2.4. Objetivos de la investigación.

2.4.1. Objetivo general.

OG: Determinar la relación del índice de madurez a edades tempranas y resistencia a compresión para diseño de mezcla de pavimento rígido $f'_c = 245 \text{ kg/cm}^2$, en la ciudad del Cusco-2016.

2.4.2. Objetivos específicos.

OE1: Determinar la influencia de la temperatura en el índice de madurez a edades tempranas y resistencia a compresión para diseño de mezcla de pavimento rígido $f'_c = 245 \text{ kg/cm}^2$.

OE2: Cuantificar el efecto de historial de tiempo de curado en el índice de madurez a edades tempranas y resistencia a compresión para un diseño de mezcla de pavimento rígido $f'_c = 245 \text{ kg/cm}^2$.

OE3: Estimar in-situ y tiempos reales el índice de madurez a edades tempranas y resistencia a compresión para un diseño de mezcla de pavimento rígido $f'_c = 245 \text{ kg/cm}^2$.



CAPITULO 3. REVISIÓN DE LITERATURA.

Este capítulo proporciona los antecedentes históricos y técnicos necesarios para comprender el uso, eficacia, precisión y limitaciones del método de madurez para estimar la resistencia del concreto in-situ.

3.1. Antecedentes de la investigación.

Durante mucho tiempo se ha conocido que el comportamiento y evolución del concreto recién colocado in-situ, adquiere diferentes resistencias en ambientes de temperatura fluctuante, es así, que el concreto curado a altas temperaturas evoluciona más rápido que el concreto curado a bajas temperaturas. Esta dependencia de la temperatura causa dificultad para poder determinar la resistencia más aproximada del concreto in-situ, curada a diferentes condiciones ambientales. Los constructores son responsables de conocer la resistencia de una estructura de pavimento rígido de concreto, con el fin de cumplir con los plazos para el desencofrado, apertura del tráfico y otras operaciones de construcción que dependen de la resistencia del concreto. El método de madurez desarrollado por: McIntosh (1949), Nurse (1949) y Saul (1951), proporcionan un método para estimar la resistencia del concreto basado en el historial de Tiempo-Temperatura del concreto utilizando una relación de resistencia predeterminada; relación llamada resistencia-índice de madurez.

Desde entonces se han realizado números estudios de investigación para la utilización del método de madurez y estimar la resistencia del concreto (Bergstrom 1953; Tank y Carino 1991), es así que la norma ASTM C1074 implementa en sus Estándares de control de calidad, y recomienda que el método de madurez debe ser utilizado para un mismo diseño de mezclas, caso contrario la relación resistencia-índice de madurez predeterminada se convierten en no válidos.



Aguilar E., Rodríguez E. y Sermeño M. (2009), realizaron el estudio de madurez en la tesis titulada "Determinación de la Resistencia del concreto a edades temprana bajo la norma ASTM C 1074, en viviendas de concreto coladas en el sitio", en la Universidad de El Salvador; los resultados obtenidos concluyeron, que: "La aplicación del método de madurez en el sistema de viviendas coladas en el sitio se vuelve idónea, ya que no existe otro tipo de ensayo que cuantifique el estado real de la estructura al momento del desmoldado".

Menchura V. (2009) en su tesis "Aplicación del Ensayo de Madurez a Pavimentos de Hormigón" en la Universidad Tecnológica Nacional de la Argentina. Concluye: La prueba de Madurez es un efectivo medio para supervisar la ganancia de resistencia temprana de pavimentos de concreto, el principal beneficio de utilizar este método es; que proporciona un control de calidad no destructivo.

3.2. Bases teóricas filosóficas.

El concepto de madurez, fue desarrollado por primera vez en Inglaterra durante la década de 1950 cuando los investigadores examinaban los efectos de la temperatura y el tiempo de curado del concreto en el desarrollo de la resistencia. El concreto a edades tempranas in situ se comporta de manera diferente en ambientes fríos y calientes. Conociendo este fenómeno que se produce en el concreto, los primeros en estudiar el comportamiento del concreto fueron: McIntosh (1949), Nurse (1949) y Saul (1951), quienes hacen posible la capacidad de estimar la resistencia del concreto basado en la historia de tiempo y temperatura del concreto. A partir de estas investigaciones nace el concepto de madurez, el cual refleja la evolución de la resistencia del concreto en función de su temperatura y tiempo.

Se han realizado numerosos estudios de investigación, para tener un control de la utilización del método de madurez y para estimar la resistencia del concreto, es así que el método de madurez posee varias ventajas (Bergstrom 1953; Tank y Carino 1991; Constantino, Carino y Lew, 2001; ASTM, 2004):



- 1 Es un método predictivo basado en el historial de temperatura.
- 2 El procedimiento y la implementación del método en campo es relativamente simple.
- 3 Muestra la resistencia de concreto en campo en tiempo real.
- 4 Es independiente de agentes externos.
- 5 Es viable económicamente.

Sin embargo, el método de madurez debe ser utilizado con precaución, las proporciones de mezcla deben permanecer constante o la relación resistencia-índice de madurez predeterminada se convierte en no válido como se indicó anteriormente; además, la estructura y los cilindros representativos deben tener abundante humedad suministrado para la correcta hidratación del concreto (ASTM C 1074, 2004). El concreto curado a temperaturas elevadas a edades tempranas puede causar errores en las estimaciones de resistencia utilizando el método de la madurez (Alexander & Taplin, 1962; Carino, 1991).

El método de madurez, se ha utilizado en las últimas décadas de forma exitosa para la estimación de la resistencia in-situ del concreto a edades tempranas, basándose en su comportamiento térmico (Lachemi, Hossains, Anagnostopoulos, & Sabouni, 2007). Este método, tiene menor incertidumbre ya que la determinación de madurez para el concreto que se utiliza, se realiza in situ y está sujeto a las condiciones del diseño de mezcla y fenómenos extraordinarios, donde la medición se realiza al desarrollo de la temperatura de la mezcla del elemento en estudio; haciendo que el uso de este método resulte más fiable.

Diferentes autores han estudiado el método de madurez, el cual permite la estimación de las resistencias del concreto in situ basándose en su comportamiento térmico. Este método ha sido utilizado con éxito en la última década, sin embargo, el estudio del método de madurez a edades tempranas ha sido escaso (Lachemi, et al, 2007, págs. 290-299).



3.3. Generalidades del método de madurez.

En este capítulo, se desarrollará la historia y la eficacia del método, describiendo los métodos principales para calcular el índice de madurez, la relación resistencia e índice de madurez, las limitaciones inherentes y la aplicación del método de madurez para estimar resistencias del concreto. Se discutirá la exactitud del método de madurez al momento de estimar la resistencia del concreto, se mostrarán antecedentes donde se examinaron los métodos de prueba y al final se hará una evaluación de las relaciones de resistencia y madurez.

3.4. Cambios de estado del concreto.

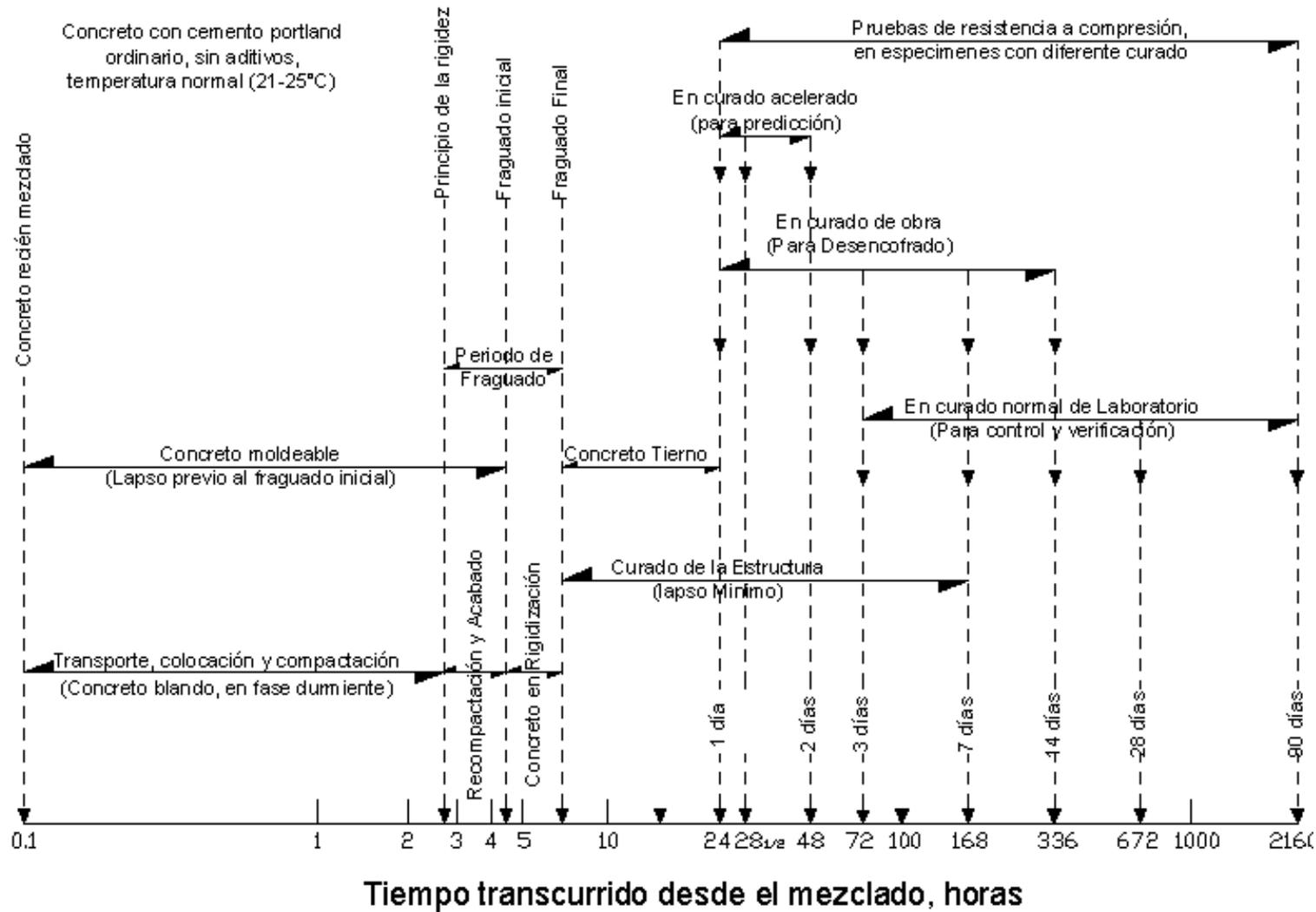
No hay características precisas que permitan establecer con exactitud las fronteras entre estos periodos de evolución del concreto, ya que se trata de la evolución gradual de un mismo proceso. Sin embargo, con el ensayo de Vicat, ensayo de las agujas de Gilmore y la resistencia a la penetración en vigas (ASTM C 403, 2004) se puede determinar el momento de inicio y finalización del fraguado del concreto.

La duración del tiempo de fraguado del concreto depende de varios factores extrínsecos dados por las condiciones de trabajo en obra, en los que destaca por sus efectos; la temperatura entre otros.

A continuación, se presenta la **Tabla 3.1** donde muestra la duración de los lapsos correspondientes a los cambios de estado, para el caso de un concreto convencional realizado con cemento Portland ordinario, sin aditivos, a temperatura normal (21-25°C). Aquí también se indican las principales actividades que realmente se efectúan en dichos lapsos, al utilizar el concreto en la construcción de estructuras.



Tabla 3.1 Lapsos y Actividades Características de Estados de un Concreto Ordinario a Temperatura Normal
Fuente: Manual de Tecnología del Concreto. Tomo II Autor: Diego Sánchez de Guzmán





3.5. Fenómenos térmicos en el concreto.

La hidratación de los compuestos del cemento involucra reacciones exotérmicas, estas reacciones generan calor y aumento de temperatura en el concreto. El calor causa expansión y bajo condiciones de restricción pueden causar aumento de la tensión interna de la estructura, lo que aumenta el riesgo de agrietamiento térmico (ACI 207, 2007).

Durante todo este proceso de liberación de calor es cuando el concreto fragua (empieza la rigidización de la pasta) y comienza a ganar resistencia, de acuerdo a las condiciones ambientales, características de los componentes, así como del tipo y cantidad de materiales cementicios y de los aditivos que se utilicen en la mezcla.

3.6. Método de Madurez.

3.6.1. Introducción al Método de Madurez.

McIntosh planteó la hipótesis: "Rate of hardening at any moment is directly proportional to the amount by which the curing temperature exceeds the [datum] temperature."

(6)

McIntosh define la tasa de aumento de resistencia como la "edad básica". El datum de temperatura se define como la temperatura por debajo del cual el concreto no incrementara su resistencia; McIntosh propuso el valor de 30°F (-1°C), sin embargo, años después se estudió muestras curadas a temperaturas altas de hasta 200°F (93°C), donde se encontró que las muestras no tienen la misma resistencia a la compresión en comparación con las mismas muestras curadas a temperatura de 60°F (16°C).

(6) La velocidad de endurecimiento en cualquier momento es directamente proporcional a la cantidad en la que la temperatura de curado excede la temperatura [de referencia].



Nurse (1949) publico sus resultados sobre el estudio que realizo de los efectos de curado en el concreto. En su estudio Nurse cura diferentes mezclas de concreto a temperaturas que van desde 64° F a 212°F (18°C a 100°C), realiza las pruebas de resistencia a compresión, con el fin de comparar los efectos del tiempo-temperatura en la resistencia a compresión de diferentes mezclas evaluadas. Alguno de estos resultados de Nurse se Muestran en la **Figura 3.1**, donde el eje "X" es el producto de temperatura-tiempo (°C x h); el eje "Y" es el promedio de resistencias a los tres días.

En los estudios que realiza Nurse, encuentra que, para diferentes historiales de temperatura y tiempo obtiene resistencias con un valor único índice de madurez.

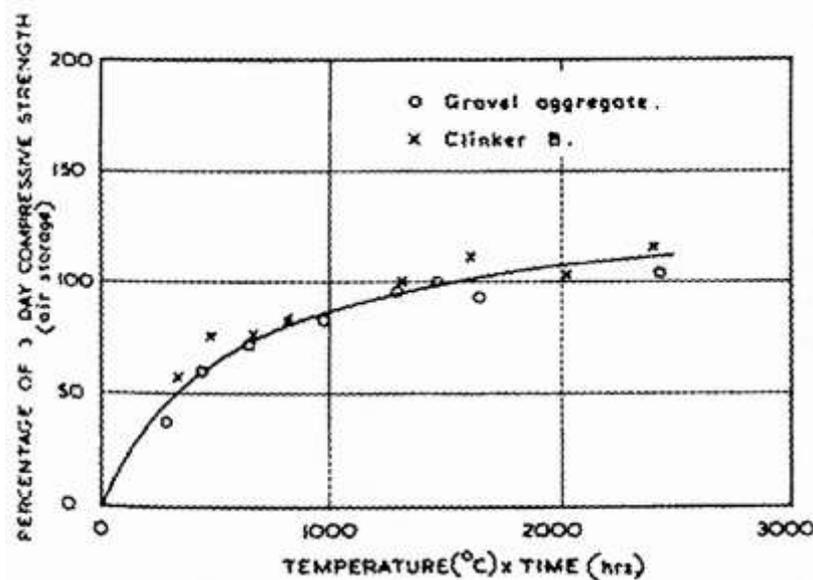


Figura 3.1 Resultados de los Experimentos Realizados por Nurse.

Fuente: The Maturity Method. In Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, Carino 1991.

3.6.2. Madurez del concreto.

El concepto de madurez es la tasa de aumento de la resistencia del concreto que está relacionado con el tiempo de curado y el historial de temperatura, que fue estudiado por primera vez por McIntosh (1949).

La madurez se refiere al grado y la velocidad de hidratación del cemento presente en una mezcla de concreto, la cual es una función del historial de temperatura y el tiempo en el periodo de curado (ASTM C 1074, 2004).



Madurez, es el incremento de la resistencia del concreto en función de la temperatura y tiempo (Zapata Mar & Bosh Giral, 2009)

3.6.3. Definición del Índice de Madurez.

El índice de madurez es un cuantificador de la resistencia del concreto en función del historial de temperatura y tiempo (Anahue & Mallqui, 2017), es decir, calcula la madurez y el desarrollo de las propiedades físico-mecánicas del concreto y progreso en el proceso de hidratación (fenómeno químico).

El índice de madurez es "la medida del desarrollo de una propiedad de una mezcla de concreto" (ASTM C1074, 2011). Entonces el índice de madurez según ASTM C-1074,2011 "Es un indicador de la resistencia, que se calcula a partir del historial de temperatura de la mezcla de concreto mediante el uso de una función de madurez". Existen algunas funciones para cuantificar un valor al "índice de madurez" del concreto, las dos funciones de madurez que son recomendados por la norma ASTM C-1074 (2011) son; la función de madurez Nurse-Saul y la función de madurez de Arrhenius.

3.6.4. Concepto del Método de Madurez.

El concepto de método de madurez es el desarrollo de resistencia de un diseño de mezcla de concreto en función del índice de madurez antes mencionado.

Saul (1951) define la "regla de madurez." Al afirmar que: "Concrete of the same [mixture] at the same maturity (reckoned in temperature-time) has approximately the same strength whatever combination of temperature and time go to make up that maturity"⁽⁷⁾.

⁽⁷⁾ El concreto de la misma [mezcla] con la misma madurez (calculado con temperatura-tiempo) tiene aproximadamente la misma resistencia para cualquier combinación de temperatura y tiempo que sea similar a su madurez.



Esta regla es la base del método de madurez que se utiliza para estimar la resistencia que adquiere el concreto en el transcurso del tiempo. Esto significa que, para un diseño de mezcla de concreto específico, se puede estimar el momento en el que el concreto tendrá las resistencias esperadas, incluso si el concreto de interés posee un historial de curado diferente al concreto original con el cual se estableció el índice de madurez. Un esquema de este concepto se presenta en la **Figura 3.2**. La figura indica que una muestra expuesta a bajas temperaturas toma más tiempo para alcanzar un índice de madurez M1 y considerando una muestra expuesta a altas temperaturas tarda menos tiempo para alcanzar la madurez M2. Si $M1 = M2$, entonces estas dos muestras tienen igual resistencias, aunque las condiciones de curado individual (tiempo y temperatura) son diferentes. Según la regla de madurez de Saul, la resistencia de estos lotes calientes y fríos de concreto posee un mismo índice de madurez.

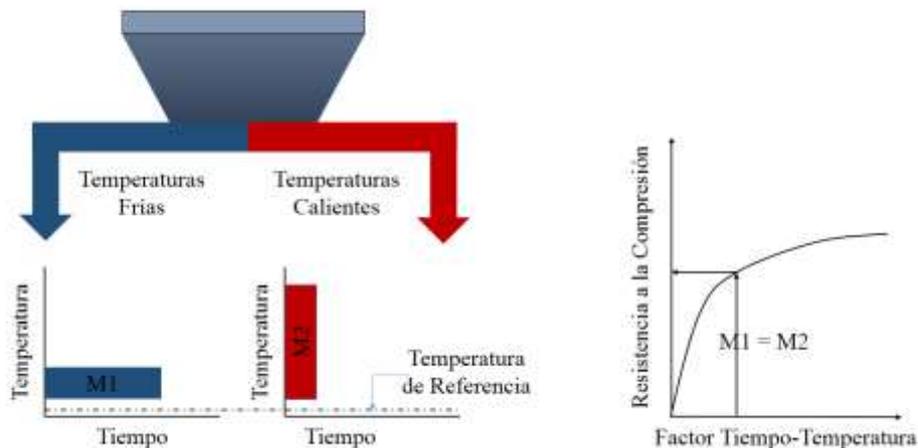


Figura 3.2 Diagrama de la Regla de Madurez de Nurse - Saul.

Fuente: The Maturity Method. In Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, Carino 1991.

3.6.5. Función de Madurez de Nurse-Saul.

Con la combinación de la teoría de Nurse y la definición de madurez de Saul; nació la primera función de madurez de Nurse-Saul (NSM⁽⁸⁾), como se le conoce normalmente y se define en la norma ASTM C-1074 de la siguiente manera: Función de Madurez de Nurse-Saul:

⁽⁸⁾ Nurse Saul Maturity (Función de Madurez Nurse Saul)



$$M = \sum_0^t (T_c - T_0) \cdot \Delta t$$

Ecuación 3.1

Donde:

M : Factor de tiempo temperatura a la edad t ($^{\circ}\text{F}\cdot\text{hr}$ ó $^{\circ}\text{C}\cdot\text{hr}$).

T_c : Promedio de la temperatura durante el intervalo Δt ($^{\circ}\text{F}$ ó $^{\circ}\text{C}$).

Δt : Intervalo de tiempo (hr).

T_0 : Datum de Temperatura.

3.6.5.1. Factor Temperatura tiempo (TTF⁽⁹⁾).

La función de madurez Nurse-Saul calcula un índice de madurez llamado "factor temperatura-tiempo." El índice de madurez es la cantidad cuantitativa de la temperatura y el tiempo de una mezcla de concreto que se han acumulado; un ejemplo del cálculo de la función de madurez Nurse-Saul se puede explicar en la **Figura 3.3**.

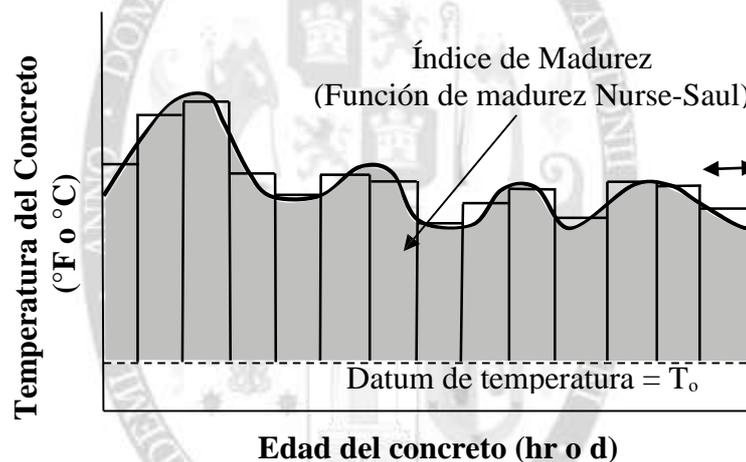


Figura 3.3: Diagrama de la Madurez del Concreto Usando la Función de Madurez Nurse-Saul. Fuente: The Maturity Method, Carino 1991.

En la **Figura 3.3** se muestra un esquema de la función de madurez Nurse-Saul donde; la suma de la temperatura promedio para el intervalo de tiempo menos el Datum de temperatura multiplicada por el intervalo de tiempo de interés, es el índice de madurez para un diseño de mezcla en particular. El historial de temperatura del concreto se muestra con la línea curva, mientras que el índice de madurez Nurse-Saul para cada intervalo de tiempo se acumula en los bloques rectangulares sombreados.

⁽⁹⁾ Temperature - Time Factor (Factor Temperatura Tiempo).



3.6.6. Función de Madurez de Arrhenius.

La función de madurez de Nurse - Saul no es la única función utilizada para calcular el índice de madurez, existe también otra fórmula muy utilizada denominada la ecuación de Arrhenius para calcular la tasa no lineal de hidratación del cemento causada por el efecto de la temperatura, la cual se define como sigue:

$$t_e = \sum_0^t e^{\frac{-E}{R} \left[\frac{1}{273+T_c} - \frac{1}{273+T_r} \right]} \cdot \Delta t \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Donde:

t_e : Edad equivalente a la temperatura de referencia (hr).

T_c : Temperatura promedio del concreto para un intervalo de tiempo Δt ; (°C).

T_r : Temperatura de referencia (°C).

E : Energía de activación (J/mol).

R : Constante Universal de los gases 8.314 J/mol·K.

Δt : Intervalo de tiempo (hr).

Los valores típicos para el rango de energía de activación se encuentran de 33.500 J / mol a 45.000 J / mol. La temperatura de referencia típico es 20 ° C (68 ° F), pero otras temperaturas de referencia, tales como 23 ° C (73 ° F), se pueden utilizar (ASTM C-1074, 2011). La temperatura de referencia para esta función es arbitraria, y por lo general se utiliza un valor comprendido entre 20°C a 23°C; este valor sirve como punto neutral con respecto a los efectos de la temperatura ambiente sobre aumento de resistencia del concreto. Si una mezcla se cura por encima de la temperatura de referencia, se necesitará menos tiempo real que un curado por debajo de la temperatura de referencia para alcanzar la misma resistencia; sin embargo, los valores para la edad equivalente serán las mismas para una misma energía de activación.

La energía de activación que fue señalada en la **Ecuación 3.2** necesita ser definida y es una determinante en la característica de la sensibilidad de temperatura de una mezcla; este concepto tiene que ver con la energía que requiere la mezcla para iniciar el proceso de endurecimiento (Carino, 1997; Zapata Mar & Bosh Giral, 2009). El uso de una energía de



activación adecuada tiene mucho que ver con la precisión de estimación de resistencia utilizando la función de madurez de Arrhenius (ASTM C-1074, 2011).

3.6.6.1. *Edad equivalente.*

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

3.6.7. **Uso del Método de Madurez para predecir la Resistencia del Concreto.**

Una vez que se han establecido una comprensión del cálculo de; los índices de madurez y los datos de la resistencia, estos se pueden utilizar para evaluar la resistencia del concreto curado bajo cualquier condición de temperatura. Si una mezcla de concreto se cura a temperaturas diferentes, el desarrollo de la resistencia de concreto será diferente. La **Figura 3.4** muestra un ejemplo de la resistencia de un diseño de mezcla frente a la edad del concreto (Wade, Samuel A; Schindler, Anton k; Barnes, Robert W; Nixon, Jeffery M.;, 2006).

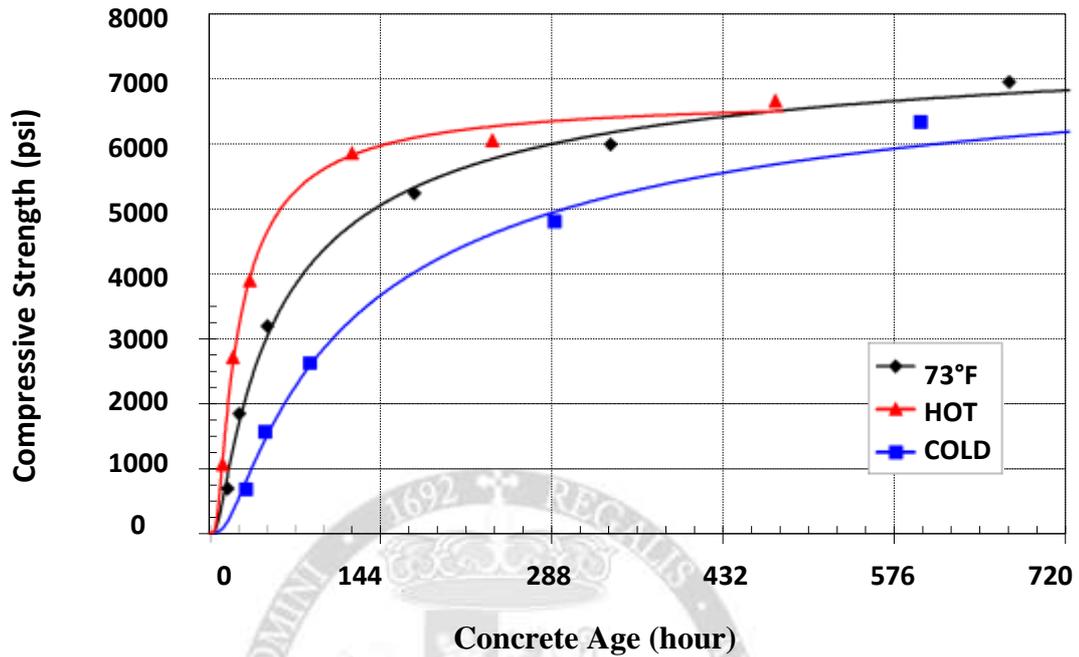


Figura 3.4 Resistencia versus edad del concreto curado a diferentes temperaturas.
Fuente: Nixon, Schindler, Barnes y Wade 2008.

Como muestra la **Figura 3.4**⁽¹⁰⁾, el aumento de la resistencia de la misma mezcla de concreto fue diferente para las tres condiciones de curado. La **Figura 3.5** muestra la relación índice de madurez y resistencia para la misma mezcla de concreto. La función que se utilizó fue de Nurse-Saul, utilizado un Datum de temperatura de 0 °C (32 °F). El índice de madurez es el mismo, independientemente de la temperatura de curado y fue creado a partir de los datos de la mezcla sometida a temperaturas 73°F (23 °C). Después se creó la relación índice de madurez y resistencia, para las tres temperaturas de curado diferentes.

⁽¹⁰⁾ COLD= temperaturas frías de 4°C; HOT=temperaturas calientes de 40°C.

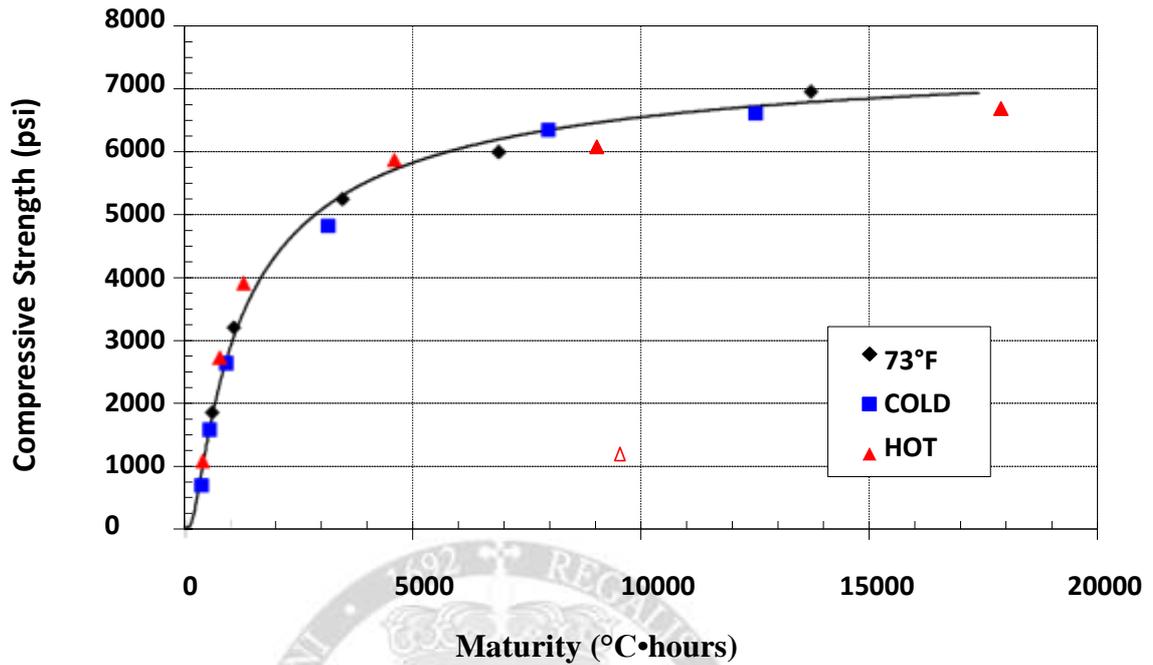


Figura 3.5 Relación Resistencia-Índice de Madurez mediante la función NSM para la Figura 3.4 ($T_o = 0 \text{ }^\circ\text{C}$).
Fuente: Nixon, Schindler, Barnes y Wade 2008.

3.7. Comparación de las Funciones de Madurez.

En el anterior ítem se presentó las funciones de madurez y su aplicación, pero permanecerán varias preguntas:

- ❖ ¿Qué función de madurez es más precisa que el otro?
- ❖ ¿De qué manera la temperatura de referencia o la energía de activación están relacionados con la exactitud de la estimación de la resistencia?
- ❖ ¿Qué temperatura de referencia o energía de activación se debe utilizar para una mezcla en particular?

Para poder evaluar la precisión de las dos funciones de madurez, un factor común debe ser establecido entre las dos funciones, esto se hace mediante la conversión de las funciones de madurez en un "factor conversión edad NS." El factor determinante de conversión de la edad se debe a que las dos funciones de madurez producen valores de madurez con diferentes unidades. El factor de conversión de edad permite que las dos funciones de madurez se puedan comparar mediante la evaluación de sus resultados.



3.7.1. Factor de conversión de edad.

A menudo es útil expresar el índice de madurez de un historial de curado, en términos de una temperatura de referencia conocido como el "Factor de conversión de edad." El factor de conversión de edad (α) se utiliza para comparar diferentes temperaturas de curado y diferentes funciones de madurez en una temperatura de referencia específica. (Rastrop ,1954), fue el primero en introducir el concepto de edad equivalente de madurez:

$$t_e = \sum \alpha \cdot \Delta t \tag{Ecuación 3.3}$$

Donde:

t_e = Edad Equivalente (hr).

α = Factor de conversión de edad.

Δt : Intervalo de tiempo (hr).

3.7.1.1. *Factor de conversión de edad para la Función de Madurez de Nurse-Saul.*

El factor de conversión de edad de la función de madurez de Nurse-Saul se define con la siguiente expresión (Carino, 1991):

$$\alpha = \frac{(T_c - T_0)}{(T_r - T_0)} \tag{Ecuación 3.4}$$

Donde:

α = Factor de conversión de edad.

T_c : Temperatura promedio del concreto para un intervalo de tiempo Δt ; (°C).

T_r : Temperatura de referencia (°C).

T_0 : Datum de Temperatura (°C).

3.7.1.2. *Factor de conversión de edad para la Función de Madurez de Arrhenius.*

El factor de conversión de edad para la función de madurez de Arrhenius que fue investigado por Freiesleben Hansen y Pederson 1977 se define con la siguiente expresión (Carino1991):

$$\alpha = e^{\frac{-E}{R} \left[\frac{1}{273+T_c} - \frac{1}{273+T_r} \right]} \tag{Ecuación 3.5}$$

Donde:

α = Factor de conversión de edad.

T_c : Temperatura promedio del concreto para un intervalo de tiempo Δt ; (°C).



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

E : Energía de activación (J/mol).

R : Constante Universal de los gases $8.314 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$.

Δt : Intervalo de tiempo (hr).

Según lo indicado por el Tank y Carino (1991), la función de la madurez Nurse-Saul fue desarrollado a partir de observaciones empíricas, y cuando una mezcla de concreto se cura a diferentes temperaturas a edad temprana, el método de la madurez Nurse-Saul no representa correctamente el efecto que la temperatura tiene sobre el desarrollo de la resistencia. Por lo tanto, algunos investigadores indican que la función de madurez de Arrhenius es la función no lineal que expresa el desarrollo de la resistencia con más confiabilidad (Tank & Carino 1991; Kjellsen & Detwiler 1993).

Con los años, ha habido mucho debate respecto a qué función de madurez es mejor para la estimación de resistencias del concreto. Y muchos investigadores creen que la función de madurez de Arrhenius es más preciso. Sin embargo, otros piensan que es demasiado complicado y poco práctico, en cambio la función de madurez Nurse-Saul es más simple y suficientemente precisa para ser utilizado fácilmente en las obras de construcción.

De acuerdo con los resultados presentados anteriormente, la función de madurez de Arrhenius se considera la función preferible para calcular la madurez del concreto, ya que representa con mayor precisión la velocidad no lineal de hidratación del concreto.

3.7.2. Valores de Sensibilidad de Temperatura.

Como se explica en la sección anterior, los Datum de temperaturas y energía de activación afectan en gran medida la precisión de la resistencia del concreto estimado por el método de madurez. El Datum de temperatura y la energía de activación hacen referencia como valores de "sensibilidad" de temperatura de una mezcla de concreto en particular, ya que cambian de acuerdo a la manera en que la velocidad de reacción química-mecánica (desarrollo de la resistencia) de un concreto varía con la temperatura. Los valores de sensibilidad de



temperatura se pueden obtener: (1) se calcula experimentalmente, (2) obtenida a partir de las ecuaciones (Freiesleben Hansen y Pedersen, 1977), o (3) la aproximación de los valores aceptados (ASTM C-1074, 2011). En esta sección, se presentan algunos valores publicados de sensibilidad de temperatura para diferentes mezclas con diferentes materiales complementarios de cementación, relaciones agua-cemento, y las proporciones.

3.7.3. Datum de Temperatura.

El Datum de temperatura que se utiliza en la función Nurse-Saul, representa la temperatura por debajo de la cual un particular concreto deja de incrementar su resistencia (Bergstrom, 1953).

El Datum de temperatura se define como: la temperatura a la cual el concreto inicia su proceso de madurez (empieza a adquirir resistencia), a partir de este momento se pueden empezar con los ensayos de madurez. (A. Zapata. Bosch, 2009).

De acuerdo a investigaciones realizadas desde el origen del método de madurez; los valores de Datum de temperatura son:

- ❖ Saul (1951) recomienda un Datum de temperatura de $-10.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ($13,1 \text{ }^\circ\text{F}$).
- ❖ Carino (1951) recomienda se utilice una temperatura de referencia de $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ ($14 \text{ }^\circ\text{F}$).
- ❖ ASTM C 1074 (2011) recomienda una temperatura de referencia de $0 \text{ }^\circ\text{C}$ ($32 \text{ }^\circ\text{F}$) para el cemento de tipo I sin aditivos y cuando la temperatura de curado se mantiene entre 0 a $40 \text{ }^\circ\text{C}$ (32 a $104 \text{ }^\circ\text{F}$).
- ❖ Posteriormente en un estudio de Plowman (1956), encontró que a temperaturas de $-12 \text{ }^\circ\text{C}$ ($10,4 \text{ }^\circ\text{F}$) el concreto deja de adquirir resistencia.

Carino y Tank (1992) realizaron un estudio en el que se ensayaron probetas de concreto y mortero curados con diferentes temperaturas isotérmicas. Las muestras se hicieron con



diferentes cementos y dos relaciones agua cemento, donde los tres conjuntos de muestras se curaron a 50, 73, y 104 ° F (10, 32, y 40 ° C) y luego se ensayaron la resistencia a intervalos regulares. EL Datum de temperatura de mejor ajuste que se obtuvieron para cada mezcla de concreto se muestra en la **Tabla 3.2**.

Tabla 3.2 Datum temperature values proposed by Carino and Tank (1992).
Fuente: Carino and Tank (1992).

Cement Type	Datum Temperatures [°C (°F)]			
	w/c ⁽¹¹⁾ = 0.45		w/c = 0.60	
	Concrete	Mortar	Concrete	Mortar
Type I	11 (52)	11 (52)	9 (48)	7 (45)
Type II	9 (48)	9 (48)	6 (43)	5 (41)
Type III	7 (45)	6 (43)	7 (45)	6 (43)
Type I + 20% Fly Ash ⁽¹²⁾	-5 (23)	-2 (28)	0 (32)	3 (37)
Type I + 50% Slag ⁽¹³⁾	8 (46)	7 (45)	10 (50)	9 (48)
Type I + Accelerator	8 (46)	10 (50)	9 (48)	9 (48)
Type I + Retarder	5 (41)	6 (43)	5 (41)	2 (36)

A partir del estudio, Carino y Tank (1992) llegaron a la conclusión de que ninguno de los valores fue de -10 ° C (14 ° F). La mayor parte de los valores que se encontraron fueron superiores a 0 ° C (32 ° F)

Estos resultados, así como los de Carino, Bergstrom, y Saul muestran que diferentes mezclas pueden requerir diferentes temperaturas de referencia para su uso con la función de la madurez Nurse-Saul.

3.7.4. Gradiente térmico.

Se llama gradiente de temperatura, a las distribuciones disperejas de temperatura en diferentes zonas de la masa de concreto. Cuando se coloca concreto masivo (como en grandes cimentaciones, presas o pavimentos) los efectos termodinámicos del proceso de curado, así como la geometría de la estructura pueden causar un diferencial de temperatura suficientemente

⁽¹¹⁾ Relación agua cemento.

⁽¹²⁾ Fly ash (Cenizas volantes)

⁽¹³⁾ Slag (Escoria)



grande, que puede causar agrietamiento del concreto, reduciendo la durabilidad de la estructura. Así mismo el gradiente de temperatura provoca las dilaciones y contracciones tanto superficiales en estado fresco como endurecido, originando las fisuras y grietas en el concreto (Zapata Mar & Bosh Giral, 2009)

Las pequeñas micro fisuras provocadas por gradientes térmicos, o cambios en la humedad de la pasta de cemento y los áridos, afectan los procesos de hidratación y hacen más compleja la predicción por el método de madurez (ACI 231, 2003)

Diseñadores y constructores de grandes presas de concreto fueron los primeros en detectar la importancia del aumento de temperatura en las propiedades resistentes y de durabilidad del concreto y el riesgo de agrietamiento que podían producir cuando la deformación térmica del concreto está restringida externa o internamente (ACI 207, 2005; Mehta y Monteiro, 2006).

El concreto endurecido (grado de hidratación alto) también puede presentar menores resistencias cuando se somete a altas temperaturas. En este caso el concreto tiene menor permeabilidad por lo que al vaporizar el agua y expandir su volumen, puede también generar fisuras internas debido a la presión interna (Kumar Mehta & Monteiro, 2006)

Para concretos que responderán solicitaciones a altas temperaturas durante su elaboración es conveniente tomar en cuenta la diferencia máxima admisible entre el centro y el borde de un elemento de concreto masivo (20 °C) (ACI 308, 2001; ACI 207, 2007).

3.7.5. Energía de Activación.

El concepto de energía de activación se originó a partir de Svante Arrhenius en 1888, donde la sensibilidad de temperatura de la función de madurez Arrhenius depende de la energía de activación (Carino 1991). *La energía de activación es responsable de la energía extra que se requiere para iniciar una reacción química* (Carino 1997). Diferentes mezclas requieren diferentes energías para comenzar el proceso de endurecimiento. ASTM C 1074 (2011)



recomienda energías de activación en el intervalo de 40.000 a 45.000 J / mol para su uso con un cemento Tipo I sin aditivos.

Ha habido numerosos investigadores que han publicado diferentes valores de energía de activación para diversas mezclas. Una lista de algunos valores típicos publicados de energías de activación, reportados por Carino (1991), se da en la **Tabla 3.3**.

Tabla 3.3 Activation energy values proposed by various researchers (Carino 1991)
Fuente: Carino, 1991

Cement Type	Type of Test	Activation Energy (J/mol)
Type I (Mortar)	Strength	42,000
Type I/II (Paste)	Strength	44,000
		42,000-47,000

En la **Tabla 3.4** resume los valores de energía de activación para la función de la madurez de Arrhenius obtenidos a partir de Carino y pruebas de Tank, esta tabla indica además cómo la adición de aditivos puede alterar la energía de activación.

Tabla 3.4 Activation energy values proposed by Carino and Tank (1992)
Fuente: Carino and Tank (1992)

Cement Type	Activation Energy (J/mol)			
	w/c = 0.45		w/c = 0.60	
	Concrete	Mortar	Concrete	Mortar
Type I	63,000	61,100	48,000	43,600
Type II	51,100	55,400	42,700	41,100
Type III	43,000	40,100	44,000	42,600
Type I + 20% Fly Ash	30,000	33,100	31,200	36,600
Type I + 50% Slag Type I	44,700	42,700	56,000	51,300
+ Accelerator	44,600	54,100	50,200	52,100
Type I + Retarder	38,700	41,900	38,700	34,100

Carino (1991) recomienda que el cálculo de la energía de activación depende de la exactitud deseada de la resistencia estimada en diseño de mezclas, que se muestran en la **Tabla 3.4**.



La energía de activación se puede determinar de varias maneras: (1) se puede calcular experimentalmente (ASTM C 1074 2011), (2) se puede estimar a partir de ecuaciones que incorporan la temperatura del concreto, o (3) se puede estimar a partir de los valores típicos propuestos.

Así mismo Freiesleben Hansen y Pedersen (1977) desarrollaron una ecuación para calcular la energía de activación basada en la temperatura de curado del concreto, cuya ecuación es la siguiente:

Modelo para determinar la energía de activación:

$$T_c \geq 20 \text{ }^\circ\text{C} (68 \text{ }^\circ\text{F}): \quad E = 33,500 \text{ J/mol} \quad \text{Ecuación 3.6}$$

$$T_c < 20 \text{ }^\circ\text{C} (68 \text{ }^\circ\text{F}): \quad E = 33,500 + 1,470 (20 - T_c) \text{ J/mol} \quad \text{Ecuación 3.7.}$$

Donde:

T_c : Temperatura promedio del concreto para un intervalo de tiempo Δt ; ($^\circ\text{C}$).

E : Energía de activación (J/mol).

Este modelo se determinó mediante análisis de datos informáticos de resistencia a compresión a edad temprana, donde se encontró que el concreto curado a temperaturas calientes requiere una menor energía de activación.

Carino recomienda el procedimiento experimental descrito en el anexo A1 de la norma ASTM C 1074, para determinar la energía de activación-mezcla específica. Este procedimiento implica el uso de ensayos de compresión de probetas de mortero curados a tres temperaturas diferentes.

3.7.6. Resumen de las dos funciones de Madurez.

Algunos críticos piensan que la función de madurez Arrhenius puede ser demasiado complicado y no es práctico ya que se requiere una energía de activación para una mezcla específica y así obtener resultados precisos. En Estados Unidos utilizan la función de madurez Nurse-Saul porque es sencillo y rápido de implementar y en el Perú no existen datos



estadísticos que indiquen el uso de una determinada función de madurez, sin embargo, los investigadores proponen la función de madurez de Arrhenius, porque teóricamente proporciona mejores modelos del desarrollo de la resistencia no lineal del concreto.

3.8. Reglamentación y Normativa estándar para la determinación de la madurez.

En 1987, gracias a los aportes de la Sociedad Americana para ensayos y materiales (ASTM por sus siglas en inglés) por primera vez aprobó la norma C-1074 que estandarizó el procedimiento para desarrollar relaciones de resistencia-madurez.

El contenido básico de la norma ASTM C 1074 es:

- ❖ Terminología.
- ❖ Funciones de madurez.
- ❖ Procedimiento para desarrollar relaciones resistencia madurez.
- ❖ Procedimiento para estimar la resistencia del concreto in situ.
- ❖ Determinación del Datum de temperatura y la energía de activación.

Los pasos más sobresalientes que plantea la normativa consisten en desarrollar: Primero un diseño de mezcla que se planea utilizar en el proyecto (pavimento o estructura). Luego, colar y curar 17 cilindros en el laboratorio usando esta mezcla, con sensores embebidos en el centro de dos cilindros a $\pm 15 \text{ mm}$. Cabe mencionar que varios proveedores fabrican sensores que proporcionan lecturas de temperaturas a través de tiempo o proporcionan directamente el TTF o valores de edad equivalente. A varias edades (uno, tres, siete, 14, y 28 días), se toma un valor de madurez de los cilindros con sensores, y dos cilindros se ensayan a compresión (más uno extra en caso de que el rango de resistencia a compresión de los dos cilindros excede el 10% de su resistencia promedio), y así contar con valores de resistencia a compresión para la respectiva madurez; llamándosele a este proceso calibración de la mezcla.



Además, se proporciona un procedimiento para obtener el Datum de temperatura o la energía de activación, que según el método utilizado será requerido. El procedimiento para determinar el Datum de temperatura o la energía de activación son discutidos en la norma ASTM C-1074.

En la actualidad el método de madurez es muy utilizado en la industria de la construcción y está amparado por las normas:

- ❖ ASTM C-1074 - Práctica estándar para la estimación de la resistencia del concreto por el método de madurez.
- ❖ AASHTO TP 52-95 (Estimating the Strength of Concrete in Transportation Construction by Maturity Tests)
- ❖ ASTM C918 y AASHTO ⁽¹⁴⁾ T276 - Método de prueba estándar para medir la resistencia a la compresión a edad temprana y la proyección de resistencia a edades posteriores.
- ❖ ACI 228 – Métodos para estimar la resistencia del concreto Maturity Method

3.9. Relación entre Índice de Madurez y Resistencia.

Se conoce como la relación del Índice de madurez y la Resistencia para un diseño de mezcla de concreto en particular.

En resumen, en la **Figura 3.6** se muestra la relación entre el índice de madurez para un mismo diseño de mezcla de concreto curado a diferentes temperaturas y la resistencia a compresión. Las resistencias de las mezclas curadas en frío, temperatura normal y caliente se muestran en la primera curva Resistencia-Edad del concreto, desplazados a la curva Resistencia

⁽¹⁴⁾ American Association of State Highway and Transportation Officials.



– índice de madurez; en esta figura se puede observar los puntos de datos solo se mueven en el eje del tiempo; mientras que en el eje de resistencia esta conserva su mismo valor.

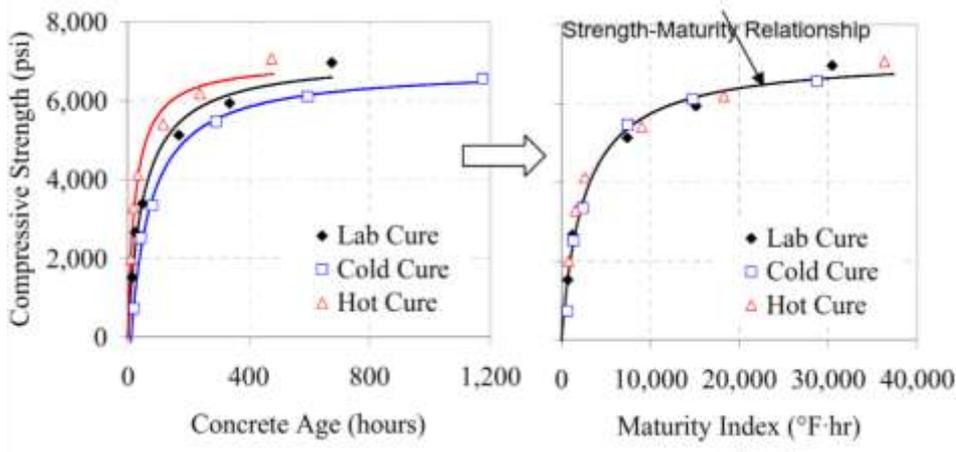


Figura 3.6 Conversión de los Datos de Resistencia- Tiempo a Resistencia-Índice de Madurez. [Lab cure = Curado en Laboratorio, Cold cure = Curado a Temperaturas frías y Hot Cure = Curado a altas temperaturas] Fuente: ASTM C-1074, 2011.

Se han propuesto muchas ecuaciones para modelar el incremento de resistencia e índice de madurez del concreto, pero tres se utilizan a menudo. Estas funciones son exponenciales, hiperbólicas, y logarítmicas, que se definen de la siguiente manera (Carino, 1991).

3.9.1. Función Exponencial.

$$S = S_u e^{-\left[\frac{\tau}{M}\right]^a} \tag{Ecuación 3.8}$$

Donde:

S: Resistencia a la compresión en madurez (psi).

S_u : Limitación de resistencia a la compresión (psi).

M : Índice de madurez ($^{\circ}\text{F}\cdot\text{hr}$ o $^{\circ}\text{C}\cdot\text{hr}$).

τ : Característica constante de tiempo ($^{\circ}\text{F}\cdot\text{hr}$ o $^{\circ}\text{C}\cdot\text{hr}$).

a : Parametro de forma.

3.9.2. Función Logarítmica.

$$S = a + b \cdot \log(M) \tag{Ecuación 3.9}$$

Donde:

a y b: Constante (mezcla dependiente).

3.9.3. Función Hiperbólica.

$$S = S_u \frac{k(M-M_0)}{1+kM-M_0} \tag{Ecuación 3.10}$$



Donde:

M_0 : Índice de madurez cuando el desarrollo de la resistencia es asumido desde el inicio ($^{\circ}\text{F}\cdot\text{hr}$) y

K : Tasa constante de la pendiente inicial de la curva Resistencia-Madurez ($1/(^{\circ}\text{F}\cdot\text{hr})$ o $1/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{hr})$).

Freiesleben Hansen y Pederson (1984) estudiaron el desarrollo de calor de la mezcla de concreto y determinaron a través de los análisis empíricos que los modelos de función exponencial representan mejor el desarrollo de resistencia del concreto. Es así que ellos propusieron la función exponencial (Ecuación 3.7). La función hiperbólica (Ecuación 3.9) fue una derivación por Carino (1991) a partir de las sugerencias de funciones hiperbólicas de otros investigadores y Plowman (1956) propuso la función logarítmica (Ecuación 3.8); sin embargo, ASTM C-1074 (2004) recomienda el uso de las funciones hiperbólicas o exponenciales.

Con el fin de determinar cuál de las tres ecuaciones describe mejor el incremento de resistencia del concreto. Carino (1991) realizó pruebas con cemento tipo I, con una relación de agua cemento 0.45, curado a temperatura 73°F , donde muestra la relación de las tres ecuaciones antes mencionadas. Sus resultados se muestran en la **Figura 3.7**; los resultados de resistencia a compresión se muestran en MPa, y la edad equivalente tiene unidades de días. Las ecuaciones exponenciales e hiperbólicas producen curvas similares, con ligeras variaciones en resistencia a edades finales; haciendo que estas dos ecuaciones (Ecuaciones 3.7 y 3.9) encajen muy bien los datos. Sin embargo, la Ecuación Logarítmica (Ecuación 3.8) subestima la resistencia alrededor de cinco días y predice cada vez mayor resistencia con el aumento de madurez.

De acuerdo con Carino (1991), la función logarítmica tiene limitaciones debido a que "la relación predice cada vez mayor fuerza con la madurez y la relación lineal no es válido a edades tempranas." Carino (1991) determinó que la función hiperbólica y la función exponencial representan mejor el desarrollo de resistencia del concreto.

Las tres relaciones de Resistencia-Madurez con datos de Carino (1991) se comparan en la **Figura 3.7**.

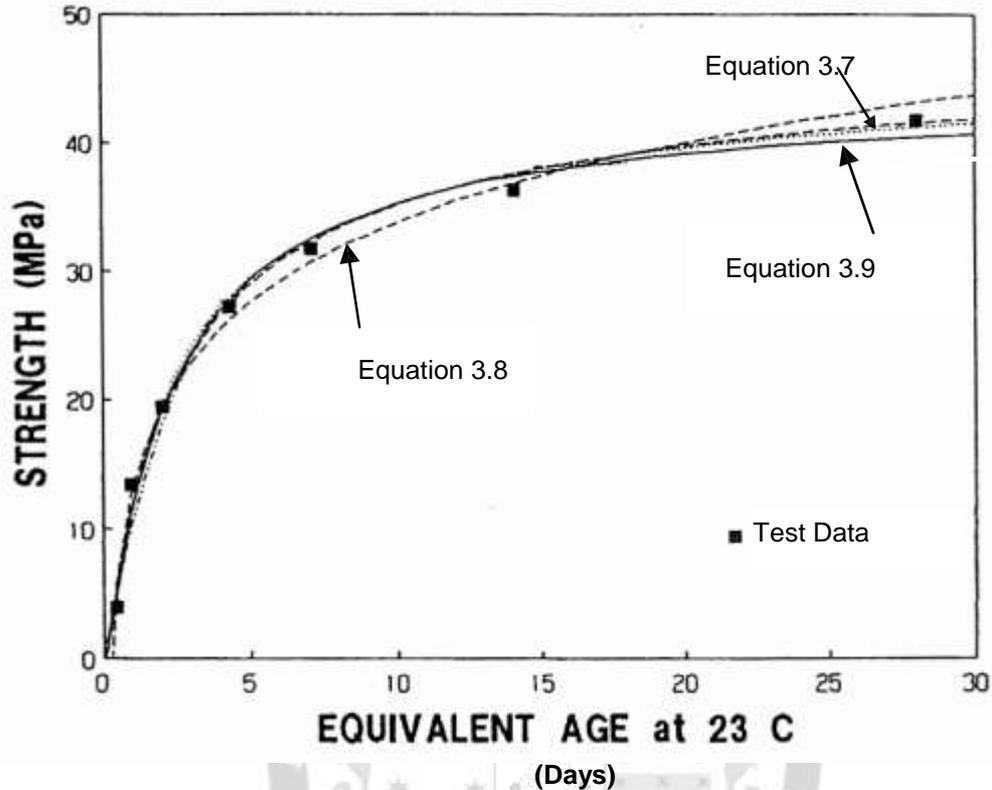


Figura 3.7 Various strength-maturity functions.
Fuente: Carino 1991.

La relación índice de madurez y resistencia se puede utilizar para estimar la resistencia in situ del concreto. La suposición de que la relación de índice de madurez y resistencia es el mismo para un diseño de mezcla de concreto en particular, permite que la misma pueda ser utilizada en el campo para estimar la resistencia de elementos estructurales elaborados de concreto, esto independientemente del historial de temperatura de curado del concreto. Como se ha explicado en las secciones anteriores, el índice de madurez es exclusivo de un diseño de mezcla específica y no debe ser utilizado para otros diseños de mezclas, esto debido a que la mezcla de concreto que se utiliza in situ no debe variar en la relación original índice de madurez - resistencia.



3.10. Limitaciones del Método de Madurez.

Como se ha señalado anteriormente; existen diversos factores y fenómenos naturales que pueden alterar el desarrollo normal de estimación de resistencia por el método de madurez; como se ha mencionado estos factores ambientales, así como las limitaciones propias del método (ASTM C 1074).

En este ítem se tocarán las siguientes limitaciones propias del método; (1) Diseño de mezcla específica para la relación índice de madurez y resistencia, (2) Efectos de la temperatura de curado de resistencia a largo plazo y (3) Factores que afectan la resistencia del concreto tales como; aire incorporado, finos de arcilla en los agregados y la humedad que se presenta en la hidratación del cemento.

3.10.1. Diseño de Mezcla Específica para la relación Índice de madurez y resistencia.

El método de madurez requiere un estudio antes, durante y post ejecución para establecer si existen un cambio en las variaciones; de diseño de mezcla, agregados, relación agua cemento, tipo de cemento y variación en la utilización de aditivo; esto debido a que cada relación Resistencia-Madurez es único; es decir no existe una Curva de Resistencia-Madurez universal. Nurse (1949) representa el índice de Madurez para varios diseños de mezcla, La **Figura 3.8**, muestra que la relación Resistencia-Madurez no se ajusta a una sola Curva; esto ocurre porque el índice de madurez y la resistencia tienen única relación.

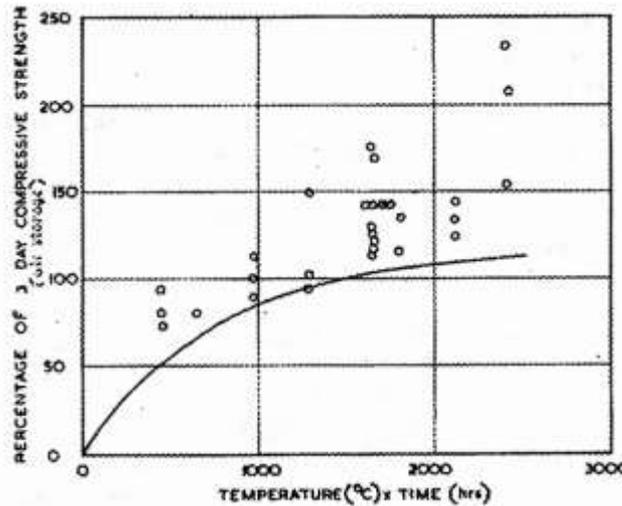


Figura 3.8 Resultados de Los Experimentos de Nurse (1949).

Fuente: The Maturity Method. In Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, Carino 1991.

En resumen, existe una sola relación resistencia-madurez para cada diseño de mezcla de concreto. Según la norma ASTM C-1074 (2011) afirma que la precisión de la relación resistencia-madurez para estimar la resistencia del concreto depende de la determinación adecuadamente de los valores de la función de madurez y sensibilidad de la temperatura de una mezcla de concreto en particular. Si la mezcla cambia, se debe desarrollar una nueva relación resistencia-madurez.

3.10.2. Efectos de la temperatura de curado de resistencia a largo plazo.

A lo largo de los primeros años del desarrollo del método de madurez, se observó que la temperatura de curado afecta directamente a la resistencia a largo plazo del concreto. Los efectos de la temperatura sobre la resistencia a largo plazo han llegado a ser conocido como el "efecto cruzado." McIntosh (1956) estudió los efectos de diferentes temperaturas a edad temprana en el proceso de incremento de resistencia del concreto. Carino (1991) a principio de los años señaló que los resultados encontrados por McIntosh mostraron que; las muestras expuestas a temperaturas altas en edad temprana tienden a tener mayores resistencias a edad temprana y menores resistencias a los plazos más largos, estos valores de madurez se calcularon utilizando la función de madurez Nurse-Saul. Carino (1991) llegó a la conclusión



que el método de madurez no puede estimar la pérdida de resistencia a largo plazo que se produce debido al endurecimiento a altas temperaturas en edades tempranas.

Desde el informe de Saul en 1951 donde se ha establecido que las temperaturas de curado en edad temprana pueden afectar a la resistencia a largo plazo de concreto. Saul realizó pruebas de resistencia de endurecimiento rápido con mezclas de concreto ordinario con relaciones agua cemento de 0,35 y 0,50. Saul señaló que la relación índice de madurez y la resistencia del concreto no seguirían su curva si se somete a temperaturas extremadamente altas en edades tempranas. En síntesis, indicó que temperaturas por encima de aproximadamente 120° F (50° C) durante las primeras dos horas y por encima de 212° F (100° C) durante las primeras seis horas de curado producían los peores efectos.

Los resultados de los experimentos de Saul se muestran en la **Figura 3.9**.

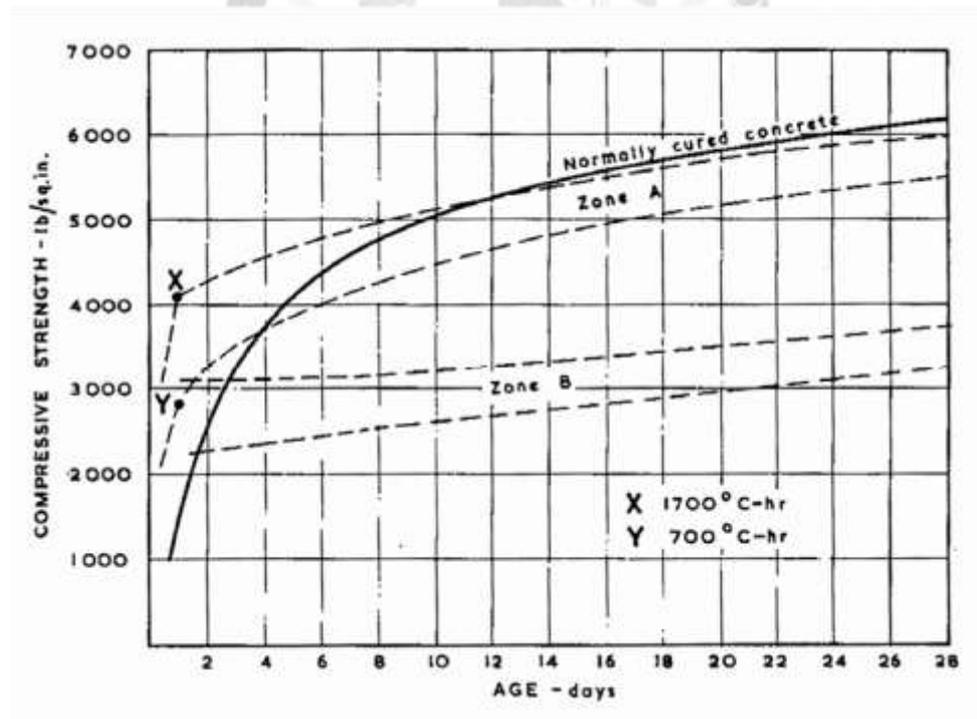


Figura 3.9 La temperatura afecta a la fuerza a largo plazo (Saul 1951).
Fuente: The Maturity Method, Carino 1991.

Carino en 1991, encontró que a plazos iguales (calculados utilizando la función de madurez Nurse-Saul), las mismas muestras curadas a temperaturas más bajas tenían menos resistencias a temprana edad que las muestras curadas a temperatura de laboratorio (59° F).



Por otra parte, la misma muestra curada a temperaturas más bajas tenía mayores resistencias a los 28 días que las muestras curadas a temperatura de laboratorio, con el mismo índice de madurez. Por lo tanto, concluyó que, para el concreto curado a bajas temperaturas, el método de la madurez "puede dar lugar a una sobreestimación de la resistencia a cortos plazos y una subestimación de la resistencia a largos plazos".

Muchos otros investigadores como Klieger (1958), Alexander y Taplin (1962), y Carino y Lew (1983) han comprobado los resultados que Saúl y McIntosh mostraron. Alexander y Taplin (1962) realizaron un estudio para evaluar el desarrollo de la resistencia del concreto a través de una amplia gama de temperaturas de curado y edades para ver si el desarrollo de resistencia obedecía la regla de madurez definido por la función de madurez Nurse-Saul.

Los resultados del experimento Alexander y de Taplin se muestran en la **Figura 3.10**.

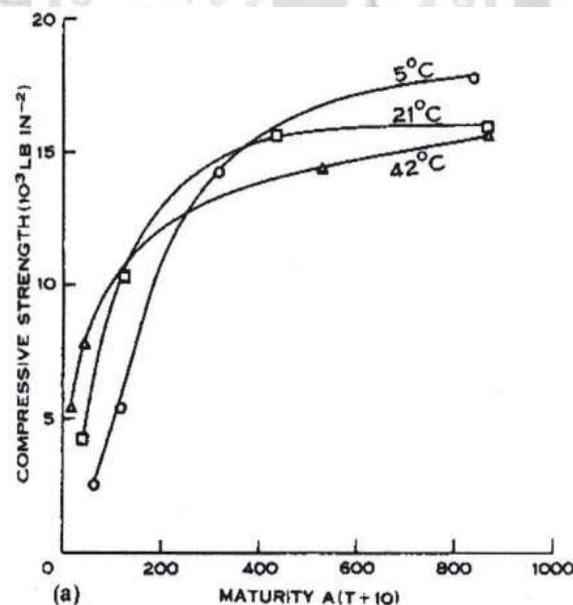


Figura 3.10 El efecto de cruce debido a las temperaturas de curado.
Fuente: Alexander y Taplin 1962.

Los tres conjuntos de datos tienen sus propias curvas únicas. Si el método de madurez era válido bajo cualquier historial de temperatura de curado, sólo una curva de índice de madurez y resistencia debería existir para todas las temperaturas de curado. Sin embargo, a edades tempranas, la relación índice de madurez y resistencia para la mezcla que se curó a 70



°F (21 °C) subestima la resistencia de las muestras curadas a temperaturas más altas y sobrestima la fuerza de las muestras curadas a temperaturas más bajas. En edades más avanzadas se invierte esta tendencia y la relación de índice de madurez y resistencia para la misma mezcla de curado a 70 ° F (21 ° C) subestima la fuerza de las muestras curadas a temperaturas más bajas y sobreestima la fuerza de las muestras curadas a temperaturas más altas.

Carino (1991), se refiere a este fenómeno como el "efecto cruzado", como las curvas de resistencia-madurez de mezclas curadas a temperaturas más frías, literalmente cruzan a las curvas de resistencia-madurez de mezclas curadas a temperaturas más cálidas.

La conclusión general fue que, a edades más tempranas, la función de madurez Nurse-Saul subestimado en gran medida el aumento de la resistencia del concreto curado a temperaturas más altas y sobreestimó la resistencia del concreto curado a temperaturas más bajas. Sin embargo, en edades más avanzadas, la tendencia fue opuesta.

Como se ve por los resultados de Saúl, McIntosh, Alexander y Taplin, el efecto de cruce puede dar lugar a graves deficiencias en la precisión de las estimaciones de resistencia utilizando el método de la madurez.

Muchas investigaciones se han realizado sobre este fenómeno con el fin de determinar si existe una edad límite más allá del cual los puntos fuertes no pueden determinarse con el uso del método de madurez. A partir del estudio de Saul, parecía que siempre y cuando no se utiliza la temperatura más elevada de curado la relación índice de madurez y resistencias podrían estimarse con precisión por la relación resistencia-madurez hasta aproximadamente cinco días, o aproximadamente el 65% de la resistencia a los 28 días de la mezcla normalmente curados.

Kjellsen y Detwiler (1993) realizaron un estudio sobre la exactitud del método a edades largas, e indicaron que el método de la madurez sólo funciona con una exactitud de 40 por ciento de la resistencia a los 28 días. Las inexactitudes que observaron eran debido a los efectos



de las temperaturas a edad temprana sobre la resistencia. Kjellsen y Detwiller fueron más lejos al tratar de modificar el método de madurez, pero la ecuación que fue formulada es compleja y difícil de aplicar. Hasta la fecha muchas personas han intentado desarrollar formas sencillas para estimar la resistencia a largo plazo del concreto utilizando el método de la madurez, pero nadie ha tenido un verdadero éxito en el desarrollo de un método práctico.

Jonasson (1985) encontró que las estimaciones de resistencia utilizando el método de madurez eran válidas hasta aproximadamente el 50% de la resistencia normal de 28 días.

3.10.3. Otros factores que afectan la resistencia del concreto.

Existen otros factores que afectan en la resistencia del concreto, pero no su calor de hidratación, y por lo tanto afectan a las estimaciones de resistencia utilizando el método de la madurez.

Algunos de estos factores incluyen la incorporación de aire, las partículas de arcilla en áridos, y la humedad inadecuada para el curado.

3.10.3.1. Aire incorporado.

Es bien conocido en la tecnología del concreto que a más poros de aire que se encuentran en una determinada mezcla de concreto, menor será la resistencia alcanzada del concreto. Una regla general es que por cada 1% de aumento en el contenido de aire, una disminución del 5% en la resistencia se puede esperar (Mindess, Young, & Darwin 2003).

El contenido de aire puede convertirse en un problema en la relación resistencia-madurez si el proveedor de concreto no es capaz de controlar constantemente el contenido de aire en el concreto. En el desarrollo de la relación resistencia-madurez, el contenido de aire del diseño de mezcla de concreto debe ser el mismo que el proceso de elaboración del índice de madurez.



3.10.3.2. Finos de arcilla en los agregados.

Otro factor importante que afecta a la resistencia del concreto es la presencia de finos de arcilla en los agregados utilizados en cualquier diseño de mezcla de concreto.

Topuc y Ugurlu (2003) realizaron un estudio sobre los efectos de los agregados muy finos (los que pasan un tamiz N° 100) sobre las propiedades del concreto. Se encontró que la existencia de las partículas de arcilla en los agregados tiene un gran efecto sobre el debilitamiento de la unión entre la pasta de cemento y agregados del concreto. También encontraron que la arcilla disminuye la velocidad del proceso de hidratación de las partículas de cemento, y cambia la relación efectiva de agua a cemento.

3.10.3.3. Contenido de humedad en el curado.

Además del aire incorporado y las partículas finas en los agregados, un problema mucho más común que afecta el método de madurez es la humedad (o su ausencia) durante el curado. El método de madurez utiliza el historial de temperatura para predecir la resistencia del concreto in-situ, y es necesario suministrar una cantidad adecuada de humedad para sostener la hidratación mientras el concreto está ganando resistencia (Tank y Carino 1991). El concreto requiere una cantidad suficiente de agua que se suministre al proceso de hidratación, para que el método de madurez pueda estimar la resistencia del concreto in-situ con precisión (ASTM C-1074,2011). "Si el concreto se seca, el incremento de resistencia cesa, pero el valor de índice de madurez calculada sigue aumentando con el tiempo" (Carino, 1991).

La humedad es una parte crucial del proceso de hidratación del cemento. El proceso de endurecimiento del concreto se produce a partir de una "reacción química entre el cemento y el agua, llamado hidratación" (Steven, Kosmatka, Kerkhof, & Panarese, 2002). El proceso de hidratación comienza con agua suministrada en la mezcla de concreto, pero como la reacción química continúa la humedad adicional es requerido. El concreto puede continuar el proceso



de hidratación incluso cuando no está completamente saturado; sin embargo, Si la humedad relativa interna cae por debajo de 80%, la hidratación cesará, y el desarrollo de la resistencia del concreto se verá afectada y la resistencia a compresión se reduce significativamente (Steven et al 2002).

Por lo tanto, un adecuado curado en húmedo del concreto es un componente crucial en el proceso de endurecimiento del concreto. En la **Figura 3.11** muestra los resultados de un experimento realizado por Gonnerman y Shuman (1928) el examen de los efectos del tiempo de curado húmedo en el aumento de resistencia del concreto, el gráfico muestra que cuanto más corto es el tiempo húmedo de curado, menor es la resistencia final. La diferencia de resistencia entre el concreto curado húmedo durante todo el año y el concreto curado en aire del laboratorio para todo el año es casi 4000 psi. Por lo tanto, si el concreto no se cura adecuadamente, entonces la relación resistencia-madurez establecida ya no es válido

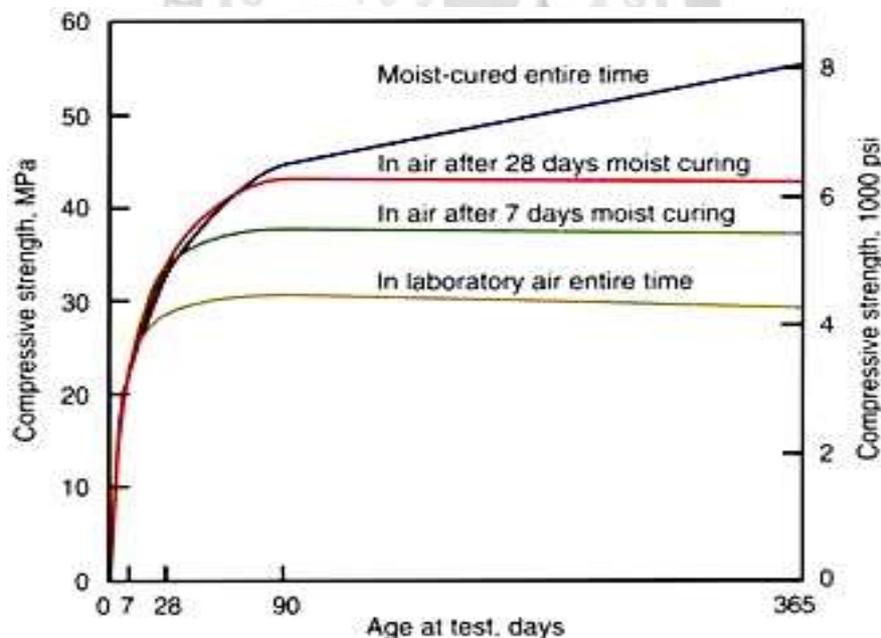


Figura 3.11 Efecto del tiempo de curado húmedo sobre la ganancia de resistencia del concreto. Fuente: Gonnerman y Shuman, 1928.

Durante el proceso de construcción, el agua se pierde a partir de la pasta debido a la evaporación o por absorción de agua por los agregados, de encofrado, o sub-base (Mindess, Young, & Darwin; 2003). En la **Figura 3.11** muestra los efectos del tiempo de curado húmedo



en el desarrollo de la resistencia del concreto. Por lo tanto, el método de madurez no dará cuenta de la falta de curado, y la resistencia estimada puede ser mucho menor que la relación índice de madurez - resistencia.

Al respecto, el experimento reportado por Gonnerman y Shuman en 1928 ha sido citado como referencia por muchos autores. Los resultados de su trabajo sobre la influencia del curado húmedo en la resistencia a la compresión del concreto se han presentado tradicionalmente en la **Figura 3.12**.

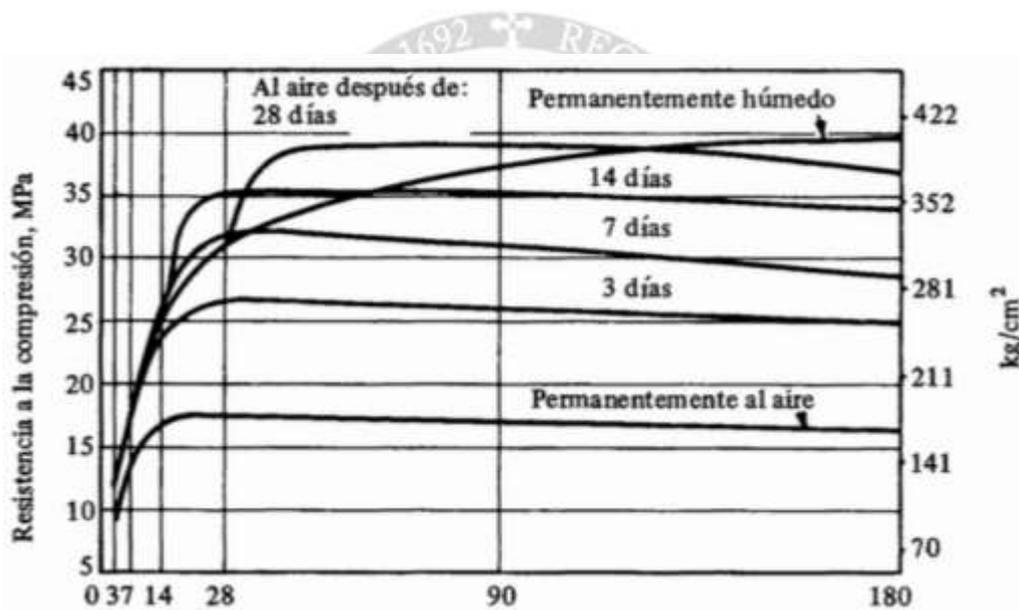


Figura 3.12 Influencia del curado húmedo en la resistencia a compresión del concreto
Fuente: Gonnerman y Shuman en 1928

Las pruebas fueron realizadas utilizando concreto con una relación agua/cemento (a/c) de 0,50 y especímenes cilíndricos de 15cm de diámetro y 30cm de altura. En esta gráfica se muestran concretos que tuvieron como factor variable el tiempo que pasaron en condiciones de saturación antes de ser expuestos al aire (e iniciar su proceso de secado); con fines didácticos esta gráfica es impactante, ya que muestra un contraste notable entre las resistencias que se obtuvieron al variar el tiempo del curado húmedo. Por ejemplo, entre los concretos que pasaron 28 días expuestos al aire y los que pasaron 28 en estado de saturación se aprecia una ganancia



de aproximadamente 100% de resistencia, en pruebas destructivas realizadas a la edad de 28 días (Solís Carcaño & Moreno, 11 de noviembre de 2005)

Después de 75 años del estudio de Gonnerman y Shuman, la gráfica antes citada se sigue utilizando como la prueba más contundente de la ganancia de resistencia a la compresión del concreto como resultado de la aplicación del proceso de curado húmedo en el material. Por citar dos ejemplos: la "Guía para el Curado del Concreto" del Comité 308 del ACI (ACI308R-01, 2002) la presenta, y a su vez hace referencia de estar reproduciéndola del Manual de la PCA⁽¹⁵⁾ "Diseño y Control de Mezclas" (Kosmatka et al., 2002).

Las investigaciones presentadas en esta sección indican que todos los factores presentados deben ser reconocidos y vigilar cuidadosamente a fin de obtener estimaciones precisas de resistencia utilizando el método de madurez.

3.11. Aplicación del método de madurez.

3.11.1. Desarrollo de la relación resistencia-madurez.

Antes de la relación resistencia-madurez pueda ser desarrollado, varias decisiones deben hacerse: En primer lugar, seleccionar la función de madurez a utilizar y los valores de sensibilidad de temperatura apropiados, tales como los valores típicos de Datum de temperatura o energía de activación. Una vez que la función de madurez ha sido seleccionada, el siguiente paso es elegir el dispositivo para registrar la temperatura.

La relación resistencia-madurez debe ser creada antes de que se inicie el trabajo de campo. Sin embargo, si esto no es posible, entonces la relación resistencia-madurez puede ser desarrollada durante el primer día de la colocación del concreto. Los medios convencionales

⁽¹⁵⁾ Portland cement Association



de control de la resistencia del concreto deben llevarse a cabo durante los pocos días iniciales de la construcción hasta que la relación resistencia-madurez se ha desarrollado.

ASTM C-1074 (2011) tiene algunas recomendaciones para el desarrollo de la relación resistencia-madurez; 17 cilindros deben prepararse a partir del concreto que será utilizado en la estructura. A continuación, los sensores de temperatura deberían ser incorporados en el centro de al menos dos muestras, y los sensores de temperatura deben iniciar la grabación de datos inmediatamente, los cilindros son curados a temperaturas normales a 73°F (23°C), las pruebas de compresión se realizan de acuerdo con la norma ASTM C-39 a las edades recomendadas de uno, tres, siete, 14, y 28 días.

Sin embargo, más pruebas, especialmente en edades tempranas, darán lugar a una mayor precisión en la definición de la relación resistencia-madurez.

ASTM C-1074 (2011) afirma que la relación resistencia-madurez puede ser calculada manualmente o mediante un análisis de regresión con el uso de una computadora para determinar la ecuación de mejor ajuste para los datos. Un ejemplo de una relación de resistencia-madurez, utilizando la función de la madurez Nurse-Saul con una temperatura de referencia de 0°C (32°F) se presenta en la **Figura 3.13**, después que la relación resistencia-madurez ha sido desarrollado, se puede utilizar para estimar la resistencia in-situ de la estructura, como se explica en la siguiente sección.

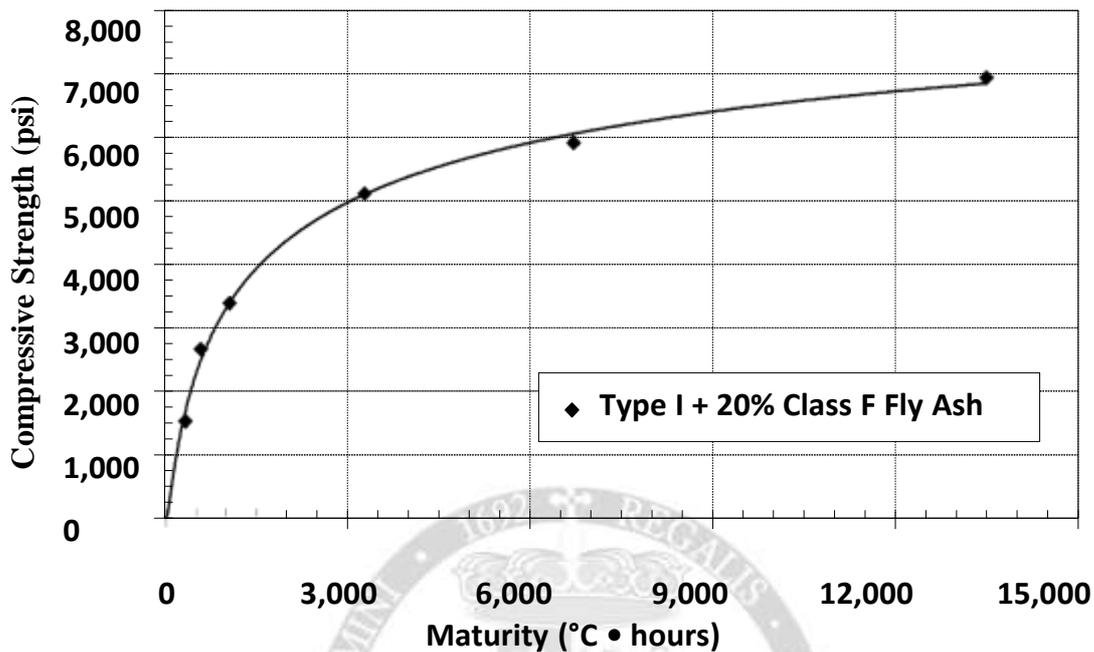


Figura 3.13 Example of a strength-maturity relationship using Nurse-Saul maturity function with $T_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}^{(16)}$.
Fuente: Nixon, Schindler, Barnes y Wade 2008.

3.11.2. Estimación de la resistencia in-situ.

Con el fin de estimar la resistencia del concreto in situ, los sensores de temperatura deben ser instalados en el concreto fresco tan pronto como sea posible. Esto se puede hacer por fijación de los sensores en el armado del acero de refuerzo antes de colocar el concreto, mediante la creación de grapas metálicas o la inserción del sensor en el concreto fresco después de colocado del concreto. Una vez que el sensor está incrustado en el concreto, el registro de la temperatura debe iniciarse tan pronto como sea posible (ASTM C-1074, 2011). La colocación del sensor en la estructura depende de muchos factores, tales como las operaciones de construcción críticos y la ubicación de la exposición ambiental más extrema. ASTM C-1074 (2011) recomienda que el sensor se instala en la estructura en lugares "que son críticos en términos de las condiciones de exposición y su peso." Por ejemplo, si se está utilizando el método de madurez de una pavimentación, los sensores deben ser colocados en lugares tales

⁽¹⁶⁾ Ejemplo de una relación de Resistencia-madurez usando la función de madurez de Nurse-Saul con $T_0 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$.
C.t



como el inicio y el final de la colocación del pavimento por un día. Mediante la colocación de los sensores en estos lugares, la resistencia del concreto se puede estimar con precisión y se utiliza para determinar la apertura al tráfico.

Una vez que el sensor se coloca y la grabación ha comenzado, el índice de madurez se puede calcular en cualquier momento para estimar la resistencia del concreto in situ. ASTM C-1074 (2011) establece que la misma función de madurez y la misma relación de índice de madurez y resistencia, deben ser utilizadas en el cálculo de resistencia en la estructura. Cuando se desea conocer la resistencia en la ubicación del sensor, el índice de madurez se va a leer o calcular a partir del historial de temperatura en ese lugar (ASTM C-1074, 2011). Un ejemplo de este proceso utilizando la misma relación resistencia-madurez utilizada en la **Figura 3.13** se muestra en la **Figura 3.14**. El índice de madurez asumida en la estructura es de $2.400 \text{ }^\circ\text{C}$ por horas y la resistencia a la compresión correspondiente es de 4700 psi. La norma ASTM C-1074 (2011) requieren una verificación de la resistencia en el sitio para las operaciones de construcción críticos. Más detalles de la verificación de la resistencia in-situ se presentan en la sección siguiente.

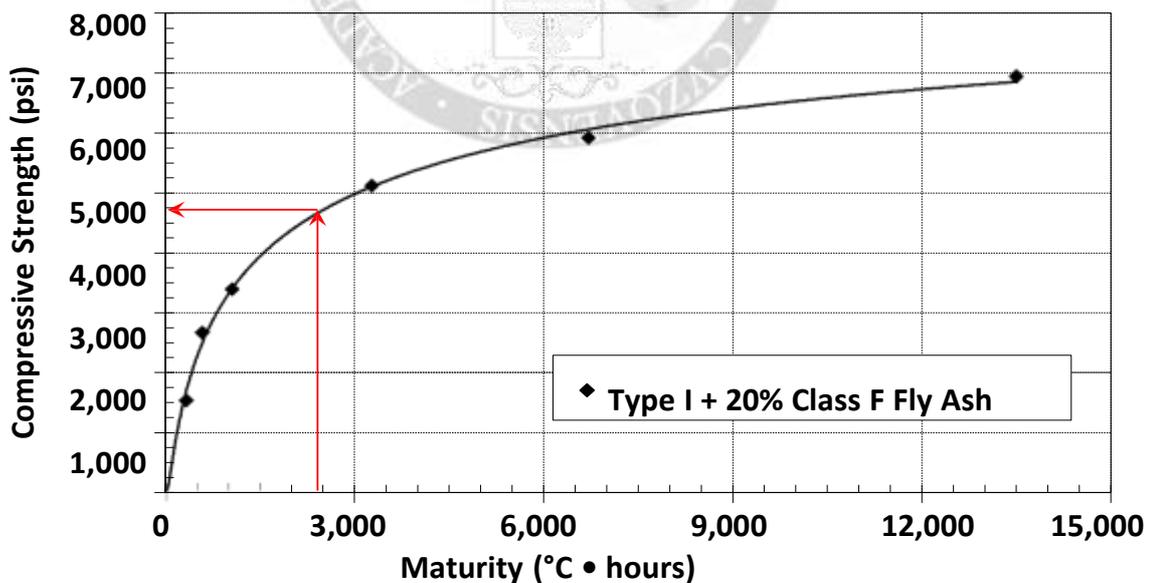


Figura 3.14 Example of estimating the in-place strength of the concrete. Fuente: Nixon, Schindler, Barnes y Wade 2008.



3.11.3. Verificación de resistencia in-situ.

ASTM C 1074 (2004) recomienda que antes se lleve a cabo otras pruebas, junto con el método de madurez para verificar que la resistencia del concreto en la estructura ha obtenido la resistencia necesaria. Otros métodos de ensayo para evaluar la resistencia in-situ son:

- ❖ Prueba de arrancamiento (ASTM C 900 2001).
- ❖ Las pruebas de compresión de núcleos (ASTM C 42⁽¹⁷⁾ o AASHTO T 24 2002).
- ❖ Las pruebas de compresión de cilindros de concreto in situ (ASTM C 873⁽¹⁸⁾, 2004).
- ❖ Prueba de resistencia a la penetración del concreto endurecido (ASTM C 803 2003).

ASTM C-1074 (2004) también afirma que los cilindros moldeados de concreto in-situ, pueden ser utilizados para ayudar a verificar la resistencia. Cilindros moldeados son utilizados en otros países, así como en Perú, como un medio de verificar la resistencia in-situ del concreto en lugares críticos. Con suficiente planificación previa, estas pruebas se pueden utilizar junto con el método de madurez para estimar la resistencia in-situ.

3.11.4. Pruebas de resistencia en el lugar.

"El objetivo de las pruebas en el lugar durante la construcción es asegurar, con un alto grado de confianza, que el concreto de la estructura es lo suficientemente fuerte como para resistir las cargas de construcción" (Carino 1993). La única manera de evaluar la exactitud del método de madurez consiste en comparar la resistencia en el sitio estimado con el método de madurez con un método de prueba de resistencia en el sitio. La mayoría utilizan métodos de

⁽¹⁷⁾ Método Normalizado de Ensayo de Obtención y Ensayo de Núcleos Perforados y Vigas Aserradas de Concreto

⁽¹⁸⁾ Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete Cylinders Cast in Place in Cylindrical Molds



ensayo in situ para evaluar la resistencia del concreto de modo que los procesos de construcción pueden continuar. Por otra parte, los núcleos por lo general sólo se utilizan cuando se sospecha que la resistencia del concreto en la estructura puede no ser adecuada.

3.11.4.1. Extracción de núcleos de concreto.

Es considerada la prueba más concluyente para determinar la resistencia a compresión de un concreto. Consiste en una broca cilíndrica hueca en cuyo extremo van engastados cristales de diamante y que por abrasión desgasta el material circundante. Existen no obstante una serie de factores que pueden influir sobre la determinación de la resistencia, encontrándose entre otros: tamaño máximo del agregado.

La dispersión de resultados es menor en la medida en que aumenta el diámetro del núcleo. Relación longitud / diámetro o de "esbeltez" e . Se busca que esta sea en lo posible lo más cercana a 2, reconociendo que valores mayores de ella disminuyen los valores de resistencia a compresión determinados y viceversa.

Parece ser que la resistencia del concreto también influye, haciendo que sean diferentes los factores de corrección por esbeltez (para hacer comparables los resultados con los obtenidos en cilindros estandarizados), como también las condiciones de curado.

3.12. Dispositivos de grabación madurez

Existen muchos dispositivos diferentes para registrar la temperatura. Algunos son dispositivos simples, mostrando únicamente la temperatura del concreto, mientras que otros dispositivos pueden registrar la temperatura y el tiempo calculando el índice de madurez. Un termómetro simple puede ser utilizado para registrar la temperatura y luego calcular el índice de madurez, sin embargo, este método puede ser inexacta y consume mucho tiempo.

En esta sección, sólo unos pocos dispositivos de madurez son revisados. Estos dispositivos de cálculo de la madurez; son capaces de calcular el índice de madurez mediante



un software a través de unidades externas que se utilizan para acceder a los datos. Los equipos de madurez utilizan un dispositivo que emplea cables del termopar unido a un dispositivo de registro de datos externa, algunos de estos dispositivos son:

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

3.12.1. The System 4101 Concrete Maturity Meter.

El Medidor de Humboldt es uno de los medidores de madurez de varios canales utilizados con más frecuencia. La **Figura 3.15** muestra una imagen de este sistema. Los datos de registros del medidor de madurez lo realizan cada media hora durante los dos primeros días y luego cada hora durante el tiempo que queda para un máximo de 327 días. Los sensores de tipo termopar "T" tienen una temperatura de precisión de $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ y la medición puede registrar temperaturas en el rango de $14 \text{ }^\circ\text{F}$ a $194 \text{ }^\circ\text{F}$ ($-10 \text{ }^\circ\text{C}$ a $90 \text{ }^\circ\text{C}$). El medidor de Humboldt se ajusta a la norma ASTM C 1074 (2011) estos pueden calcular tanto el índice de madurez de Nurse-Saúl y Arrhenius. El medidor de madurez puede operar a temperaturas entre $-4 \text{ }^\circ\text{F}$ y $122 \text{ }^\circ\text{F}$ ($-20 \text{ }^\circ\text{C}$ y $50 \text{ }^\circ\text{C}$) y está encerrado en una caja resistente a prueba de agua e impacto.

Con el fin de registrar la temperatura del concreto, The System 4101 Concrete Maturity Meter debe estar en estrecha proximidad a la zona donde se está supervisando la temperatura del concreto. El medidor de madurez Humboldt necesita ser protegida de los elementos ambientales y de los procedimientos de construcción para que el medidor no sea destruido.



Figura 3.15 The System 4101 Concrete Maturity Meter.
Fuente: página web.

3.12.2. INTELLIROCK II.

El sistema INTELLIROCK II se consideró debido a la capacidad del sensor de ser autónomo e incrustado dentro de la estructura de concreto. **Figura 3.16** es una imagen de la consola y el sensor de temperatura utilizado para este sistema. El chip de la batería y de registro de datos está contenidos dentro del sensor que está incrustado en el concreto. Un cable se extiende desde el dispositivo integrado al borde del concreto donde se conecta una consola portátil cada vez que los datos necesitan ser descargado o el índice de madurez debe ser leído.

La precisión de la temperatura es de $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. Los datos adicionales almacenados en los sensores son el tiempo y el índice de madurez, y temperaturas máximas y mínimas registradas.

Tanto la función de madurez Nurse-Saul y funciones de madurez de Arrhenius se calculan para este sistema.



Figura 3.16 IntelliRock consola II y el sensor (Fuente: Engius construcción de Inteligencia).
Fuente: página web.



3.12.3. The Command Center.

El sistema The Command Center es similar al sistema IntelliROCK. Un sensor se coloca en el concreto conectado con un cable que va hasta un PC portátil. El sensor es auto-alimentado y registra el tiempo y la temperatura del concreto automáticamente. El Grupo Transtec ha creado un programa de ordenador para un PC de bolsillo que descargará automáticamente los datos de temperatura de los sensores y calcular el índice de madurez. Además del software, el Grupo Transtec ha desarrollado el sensor de madurez utilizando iButtons (hecho por Dallas, Semiconductor). **Figura 3.17** es un ejemplo de la PC de bolsillo que puede ser utilizado para conectar con el sensor de temperatura. The Command Center utiliza la función de madurez Nurse-Saul con cualquier temperatura de referencia que el usuario define. Los sensores que se utilizan tienen una precisión de $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ y tienen un rango de temperatura de $14 \text{ }^\circ\text{F}$ a $185 \text{ }^\circ\text{F}$ ($-10 \text{ }^\circ\text{C}$ a $85 \text{ }^\circ\text{C}$). La longitud del cable de los sensores es típicamente de ocho pies, pero se puede pedir en longitudes de hasta 100 pies. La **Figura 3.18** es una imagen del sensor de temperatura The Command Center.



Figura 3.17 Pocket PC The Command Center.
Fuente: El Grupo Transtec.



Figura 3.18 Sensor de temperatura The Command Center
Fuente: El Grupo Transtec



3.13. Fabricación de equipo de madurez.

El equipo de madurez es un dispositivo electrónico registrador de datos (temperaturas) en el transcurso del tiempo y esto lo hace mediante sensores digitales ds18b20. El dispositivo está basado en software y hardware de plataforma libre con micro-controladores Atmega, un instrumento pequeño y portátil equipado con: un microprocesador, memoria interna (micro sd), y reloj que permite almacenar en tiempo real (segundos, minutos, horas, Día y año).

3.13.1. Generalidades.

3.13.1.1. Sensor DS18B20.

El sensor de temperatura DS18B20 es un dispositivo que se registra datos de temperatura y sus características son:

- ❖ Es un termómetro digital de alta precisión, entre 9 y 12 bits de temperatura en grados Celsius (el usuario puede escoger la precisión deseada).
- ❖ Su temperatura operativa se encuentra entre -50 y 125 grados Celsius. La precisión, en el rango comprendido entre -10 y 85 grados Celsius es de ± 0.5 grados Celsius.
- ❖ Su precio es económico, su interfaz de funcionamiento es sencilla y su uso es muy provechoso para proyectos que requieran mediciones precisas y confiables.

3.13.1.2. Módulo de micro SD.

Se trata de un módulo de almacenamiento de datos. Este módulo ampliará enormemente la capacidad de memoria del equipo de madurez.



3.13.1.3. Módulo DS3132 (reloj).

El módulo DS3231 permitirá que el investigador pueda llevar un registro detallado de la temperatura en el transcurso del tiempo.

3.13.1.4. ARDUINO.

Arduino es una placa con un micro controlador de la marca Atmel y con todo el circuito de soporte que incluye; que permite la interfaz de registro de temperatura y tiempo en la memoria.

3.14. Resumen del método de madurez.

Como se muestra en este capítulo 3, el método de madurez es utilizado para estimar resistencias del concreto a diferentes temperaturas de curado usando las funciones de Nurse-Saul o Arrhenius. La relación índice de madurez y resistencia debe ser predeterminada antes de cualquier estimación de resistencia. Se deben tomar medidas para comprobar: Control de calidad de las materias primas, la relación índice madurez y resistencia debe mantenerse a fin de que la resistencia predeterminada permanezca. Hay que tener en cuenta también las pérdidas de resistencias a largos plazos debido a altas temperaturas de curado, o de cruce.

La madurez del concreto se basa en el historial de temperatura del concreto y existen dos métodos comunes para calcular la madurez del concreto: las funciones de madurez Nurse-Saul y Arrhenius. El Datum de temperatura que se utilizan con mayor frecuencia para la función de madurez Nurse-Saul son 0°C y -10°C (32°F y 14°F) y para la función de madurez de Arrhenius, las energías de activación de uso común van de 33.500 a 45.000 kJ / mol, y la temperatura de referencia común es de 23°C (73°F). Se ha demostrado que la función más precisa de las dos es la función de madurez de Arrhenius, sin embargo, la función de madurez Nurse-Saul se puede utilizar con un alto grado de confianza. En el desarrollo de las relaciones de resistencia e índice de madurez, existe tres expresiones matemáticas más



utilizados para estimar la resistencia del concreto, estas son las funciones: exponenciales, hiperbólicas y logarítmicas. Las funciones exponenciales e hiperbólicas son los más precisos para el modelado del incremento de resistencia del concreto.

La relación resistencia-madurez para cada mezcla de concreto es único. Varios factores distintos pueden afectar la ganancia de resistencia del concreto; tales como la humedad para la hidratación, el contenido de aire, la presencia de minerales finos en el agregado y la alta temperatura de curado a edad temprana puede afectar la resistencia del concreto a largo plazo.

Debido a que varios factores pueden afectar la resistencia del concreto, se deben tomar medidas adicionales para asegurar que la relación resistencia-madurez desarrollado sea válida, tales como: ensayos de concreto en estado fresco, ensayos de las propiedades mecánicas, verificar la procedencia de los materiales componentes del concreto y condiciones de elaboración del concreto in situ como plan de control de calidad global. Los niveles de confianza que se aplican a la relación resistencia-madurez para asegurar que el concreto ha reunido la resistencia requerida, deben aplicarse cuando se requiere resistencia admisible para permitir la progresión de los diferentes procesos de construcción o apertura de la estructura a las cargas diseñadas.

Para verificar la relación resistencia-madurez, los cilindros deben ser hechos con el concreto que se coloca en la estructura y probados, también debe asegurarse que el concreto suministrado es el mismo que el concreto que se utilizó para desarrollar la relación resistencia-madurez.

3.15. El concreto.

El concreto es uno de los materiales más versátiles usados en la actualidad, debido a su bajo costo y facilidad de uso, alta resistencia y buena durabilidad, es este último punto el que puede verse afectado por malas condiciones ambientales o deficientes mecanismos de construcción y materiales utilizados (Kumar Mehta & Monteiro, 2006).



Desde el inicio del fraguado hasta los siete días, definido como temprana edad según (American Concrete Institute Advancing Concrete Knowledge, 2010), es un periodo de vital relevancia relacionado a los cambios a nivel de microestructura, propiedades del concreto y la relación e influencia con las propiedades a edades prolongadas (Carrilo Negrete, 2011). Curados deficientes han demostrado que afectan la resistencia, serviciabilidad y durabilidad (ACI 207, 2007). El historial de temperatura a temprana edad también tiene un efecto dominante en cómo el concreto puede desarrollar su resistencia potencial, defectos en la microestructura provocados por altas temperaturas de curado pueden influir negativamente en la resistencia y la durabilidad (Verbeck, G., & Helmuth, R., 1968), ACI 231, 2003: "Las propiedades mecánicas del concreto dependen fuertemente de la porosidad de la pasta de cemento hidratada y ésta a la vez, depende de la razón agua materiales cementantes, la finura de los materiales cementantes y la efectividad de las condiciones de curado".

3.15.1. Cemento tipo HE.

Cemento portland tipo HE, es un cemento hidráulico que fraguan y endurecen por su reacción química con el agua. También se mantienen duros y estables bajo el agua. Se usan en todos los aspectos de la construcción con concreto. Esta definición proviene ASTM 1157; donde afirma que Todos los cementos portland y los cementos mezclados son cementos hidráulicos.

En los años 90 se crearon las especificaciones de desempeño para los cementos hidráulicos – ASTM C 1157, especificación de Desempeño para Cementos Hidráulicos (Performance Specification for Hydraulic Cements). Esta especificación se indica genéricamente para los cementos hidráulicos que incluyen cemento portland, cemento portland modificado y cemento hidráulico mezclado. Los cementos en acuerdo con los requisitos de la C 1157 satisfacen a los requisitos de ensayos de desempeño físico, oponiéndose a restricciones



de ingredientes o de composición química del cemento, las cuales se pueden encontrar en otras especificaciones. La ASTM C 1157 presenta los siguientes tipos de cementos hidráulicos:

- ❖ Tipo GU Uso general
- ❖ Tipo HE Alta resistencia inicial
- ❖ Tipo MS Moderada resistencia a los sulfatos
- ❖ Tipo HS Alta resistencia a los sulfatos

Además, estos cementos pueden también tener la opción R –baja reactividad con agregados álcali-reativos especificados para ayudar en el control de la reactividad álcali-agregado.

Al especificar un cemento C 1157, el especificador usa la nomenclatura de “cemento hidráulico”, “cemento portland”, “cemento portland con aire incluido”, “cemento portland modificado” o “cemento hidráulico mezclado” juntamente con la designación del tipo. Por ejemplo, la especificación puede llamar un cemento hidráulico tipo GU, un cemento hidráulico mezclado tipo MS o un cemento portland tipo HE. Si no se especifica el tipo, entonces se asume el tipo GU.

La ASTM C 1157 define un cemento adicionado como aquél que tiene más de 15% de adición mineral y el cemento portland modificado aquél con un contenido de hasta 15% de aditivos minerales. La adición mineral normalmente aparece al final de la nomenclatura del cemento portland modificado, por ejemplo, cemento portland modificado con escoria.

La ASTM C 1157 también permite la especificación de una gama de resistencias a partir de una tabla de la norma.

Contenido De Humedad; El concepto de la humedad o contenido de humedad de un suelo, es la relación expresada como porcentaje del peso de agua en una masa dada de agregado, al peso de las partículas sólidas.



Se determina el peso de agua eliminada, secando el suelo húmedo hasta un peso constante en un horno controlado a $110 \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$. El peso del suelo que permanece del secado en horno es usado como el peso de las partículas sólidas. La pérdida de peso debido al secado es considerada como el peso del agua.

Análisis granulométrico de agregado fino y grueso; El objetivo es determinar, cuantitativamente, los tamaños de las partículas de agregados gruesos y finos de un material, por medio de tamices de abertura cuadrada. y Determinar la distribución de los tamaños de las partículas de una muestra seca del agregado, por separación a través de tamices dispuestos sucesivamente de mayor a menor abertura. Agregado Fino: las muestra de agregado fino para el análisis granulométrico, después de secadas, deberán tener mínimo 300 gr.

Peso específico y absorción de agregados Fino; El peso específico (gravedad específica) es la característica generalmente usada para calcular el volumen ocupado por el agregado en varias mezclas que contienen agregados incluyendo concreto de cemento Pórtland, concreto bituminoso, y otras mezclas que son proporcionadas y analizadas en base al volumen. También es usado en el cálculo de vacíos en el agregado del ensayo MTC E 203.

El peso específico aparente y peso específico relativo aparente atañen al material sólido de las partículas constituyentes que no incluyen el espacio poroso dentro de ellas que es accesible al agua. Este valor no es ampliamente usado en la tecnología de agregados de construcción.

Los valores de absorción son usados para calcular el cambio en la masa de un agregado debido al agua absorbida entre los espacios de los poros entre las partículas constituyentes, comparado a la condición seca, cuando es estimado que el agregado ha estado en contacto con el agua lo suficiente para satisfacer la mayor absorción potencial.



El objetivo es determinar el peso específico seco, peso específico saturado con superficie seca, el peso específico aparente y la absorción después de 24 horas de sumergido en agua el agregado fino.

Se define como índice de aplanamiento de una fracción de agregado el porcentaje en peso, de las partículas que la forman, cuya dimensión mínima (espesor) es inferior a $3/5$ de la dimensión media de la fracción.

Índice de aplanamiento y alargamiento de los agregados para carreteras; Se define como índice de alargamiento de una fracción de agregado el porcentaje en peso, de las partículas que la forman, cuya dimensión máxima (longitud) es superior a $9/5$ de la dimensión media de la fracción.

Aditivo; Se define un aditivo de acuerdo ACI 116,200, como un material distinto del agua, o del cemento, el cual es utilizado como un componente del concreto y que se añade a éste antes o durante el mezclado a fin de modificar una o algunas de sus propiedades en su estado fresco, fraguado o propiedades en su estado endurecido.

El aditivo puede tener un efecto si participa en las reacciones químicas de la hidratación y por lo tanto cambia la termodinámica del proceso (ya sea acelerándola o inhibiéndola) o si cambia los efectos físicos que alteran la transferencia de calor de los materiales de la mezcla (es decir, promoviendo o inhibiendo la transferencia de calor) (ACI 231, 2003).

Compuestos como ácidos lignosulfatos, hidróxido carboxílico, azúcares y sales inorgánicas, pueden actuar como retardadores y algunas sales orgánicas e inorgánicas solubles pueden actuar como aceleradores del proceso de hidratación (ACI 212, 2010).

Los retardantes extienden el período de inducción durante la hidratación, sin embargo, pueden aumentar la tasa de hidratación después de este período, acortando el tiempo en que se alcanza la máxima evolución de calor.



Los aditivos acelerantes están compuestos principalmente de sales solubles inorgánicas o compuestos orgánicos solubles. El clorhidrato de calcio (CaCl_2) es uno de los acelerantes más usados.

Con respecto a aditivos reductores de agua, éstos se usan generalmente para mejorar la fluidez, trabajabilidad y la resistencia a temprana edad y a largo plazo, disminuyendo la porosidad y la permeabilidad del concreto. En general son ácidos lignosulfatos, ácidos hidroxilatos carboxílicos. Algunos superplastificantes incluyen condensados formaldehidos de melanina sulfonatada y condensados. Estos aditivos actúan sobre la superficie de la partícula de cemento, cambiando su polaridad y separándolas entre ellas para mejorar así su hidratación. En algunos casos esta dispersión de partículas acelera el proceso de fraguado, sin embargo, en otros casos lo desacelera ya que cubre las partículas temporalmente y retrasa la hidratación. Algunos estudios indican que este tipo de aditivos, no sólo cambia la edad en que la evolución de temperatura comienza o llega a su máximo, sino que también disminuye el calor total generado por la pasta (datos de Jolicoeur y Simard, reportados por ACI 213). Este fenómeno no está del todo estudiado, pero es posible que el aditivo sea adsorbido durante el período de inducción y así disminuya el calor total generado. En la **Tabla 3.5** se muestra un cuadro comparativo del tipo y clasificación de aditivos



Tabla 3.5 Tipos y clasificación de aditivos

Fuente: Concreto Simple, autor Ing. Gerardo A. Rivera L. Pág. 252

TIPO DE ADITIVO	EFECTO DESEADO EN EL CONCRETO
Acelerantes	<ul style="list-style-type: none"> • Aceleran el desarrollo de resistencia
Inclusores de aire	<ul style="list-style-type: none"> • Usualmente mejoran la trabajabilidad • Disminuyen el sangrado • Inducen el control de los efectos por congelamiento y deshielo
Reductores de agua y controladores de fraguado	
(A) Reductores de agua simple	<ul style="list-style-type: none"> • Disminuye el contenido de agua
(B) Retardantes	<ul style="list-style-type: none"> • Inducen un retardo controlado sobre el tiempo de fraguado
(C) Retardante y reductor de agua	<ul style="list-style-type: none"> • Induce retardo en el tiempo de fraguado del agua • Reducción en el contenido de agua
(D) Acelerante y reductor de agua	<ul style="list-style-type: none"> • Acelera el desarrollo de resistencia • Reducción en el contenido de agua
(E) Reductor de agua de alto rango (plastificante)	<ul style="list-style-type: none"> • Reduce radicalmente el contenido de agua • Puede incrementar el revenimiento sin incremento del agua • Incrementa la fluidez de la mezcla
(F) Reductor de agua de alto rango y retardante	<ul style="list-style-type: none"> • Marcada reducción del contenido de agua • Incrementa la fluidez de la mezcla
Minerales finamente divididos	<ul style="list-style-type: none"> • Mejora la resistencia contra el ataque de los sulfatos • Reduce la permeabilidad • En algunos casos controla la reacción álcali-agregado • Disminuye los efectos por lixiviación • Producen disminución del calor de hidratación
Diversos	
Formadores de gas	<ul style="list-style-type: none"> • Para producir concretos celulares
Para mezclas de inyección	<ul style="list-style-type: none"> • Induce estabilidad, reduce la contracción de la mezcla
Para control de expansión	<ul style="list-style-type: none"> • Regula la expansión
Adhesivos integrales	<ul style="list-style-type: none"> • Aumentan la adherencia de concreto nuevo con Concreto endurecido
Auxiliares de bombeo	<ul style="list-style-type: none"> • Incrementa la cohesión y viscosidad de la mezcla
Repelentes de humedad	<ul style="list-style-type: none"> • Reducen la velocidad de penetración del agua en el concreto
Reductores de permeabilidad	<ul style="list-style-type: none"> • Reducen la permeabilidad
Inhibidores de reacción tipo de álcali-agregado	<ul style="list-style-type: none"> • Reducen las expansiones causadas por esta reacción
Inhibidores de la corrosión	<ul style="list-style-type: none"> • Reducen la permeabilidad del concreto del acero

En la tabla **Tabla 3.6** se muestra el tipo de aditivo, el efecto deseado y sus aplicaciones



Tabla 3.6 Tipos de aditivos, efectos y aplicaciones

Fuente: Tecnología del hormigón, Autor Ing. Ma. Fernanda Carrasco

Tipo de aditivo	Efecto deseado	Aplicaciones
Acelerante	Acortar el tiempo de fraguado y el desarrollo de la resistencia temprana	Hormigón premoldeado, de rápida habilitación al tránsito (fast track), hormigonado en clima frío.
Mejora de la adherencia	Incrementar la resistencia de adherencia de la mezcla cementícea	Hormigones y morteros de reparación. Morteros adhesivos
Agente Espumante	Incorporar a la masa un volumen de aire entre el 20% y 80%.	Hormigones livianos y rellenos de densidad controlada (RDC)
Anti-deslave, Anti wash – out	Aumentar la cohesión del hormigón	Hormigón colocado bajo agua
Hidrófugos de masa	Reducir la permeabilidad	Hormigones impermeables, en contacto con líquidos
Auxiliar de bombeo	Mejorar las condiciones de bombeo	Hormigones bombeables con bajo contenido de cemento o mala granulometría de los agregados
Pigmentos	Modificar el color de los hormigones	Hormigones arquitectónicos. Hormigones estampados
Estabilizadores de la hidratación	Suspender la hidratación del cemento por tiempo prolongado	Hormigones proyectados. Hormigones con transporte o espera prolongada
Activadores de la hidratación	Acortar el endurecimiento (rigidización) del hormigón	Hormigones proyectados.
Expansores por formación de gas	Generar expansión antes del fraguado	Grouts. Hormigones y morteros de reparación para relleno de oquedades
Expansores por formación de sólidos (ettringita)	Aumentar el volumen del hormigón después del fraguado	Hormigones de contracción compensada: pisos industriales y elementos de grandes superficies
Biocidas (fungicida, germicida, insecticida)	Inhibir o controlar el crecimiento de bacterias y hongos	Se añade para contrarrestar el efecto de hormigones ante de compuestos orgánicos
Incorporador de aire	Incorporar pequeñas burbujas de aire en dosis baja (4 % al 7 % aproximadamente)	Mejorar la durabilidad de hormigones sometidos ciclos de congelamiento y deshielo. Hormigones bajo agua. Mejorar la docilidad del hormigón
Inhibidor de reacción álcali-agregado	Reducir la expansión por reacción álcali-agregado	Hormigones elaborados con agregados potencialmente reactivos
Inhibidor de la corrosión de armaduras	Reducir la corrosión del acero en el hormigón armado	Hormigones en ambientes con alto contenido de cloruros (mar, natatorios)
Depresor de aire	Disminuir el contenido de aire en el hormigón	Hormigones con contenidos de aire mayores a los deseados
Reductor de agua convencional	Reducir entre un 5 % y 8 % el contenido de agua para una consistencia dada	Hormigones en general. Normalmente también retardan el fraguado
Reductor de agua de medio rango	Reducir entre un 6% y 12% el contenido de agua para una consistencia dada	Hormigones en general. No tienden a retardar el fraguado en dosis bajas
Reductor de agua de alto rango (Superfluidificante Hiperfluidificante)	Reducir más del 12 % el contenido de agua. Aumentar la fluidez del hormigón	Hormigones fluidos en general. Hormigones autocompactantes
Reductor de Contracción	Disminuir la contracción por secado	Hormigones de baja contracción, colocados en grandes superficies
Retardador	Retardar el tiempo de fraguado	Hormigones en clima caluroso. Hormigón con alto tiempo de transporte y espera

Agua; Se tiene que tener en cuenta el agua de mezclado en la cantidad total contenida en el concreto fresco. Esta cantidad es utilizada para el cálculo de la relación agua/cemento (a/c) y está compuesta por el agua agregada a la mezcla y la humedad superficial de los



agregados. El agua de amasado cumple una doble función en el concreto; por un lado, permite la hidratación del cemento y por el otro es indispensable para asegurar la trabajabilidad y la buena compactación del concreto. Está prohibido el empleo de aguas ácidas, calcáreas, minerales ya sea carbonatadas o minerales; aguas provenientes de minas o relaves, aguas que contengan residuos industriales, agua con contenido de sulfatos mayor del 1%, agua que contengan algas, materia orgánica, humus o descargas de desagües, aguas que contengan azúcares o sus derivados, igualmente aquellas aguas que contengan porcentajes significativos de sales de sodio o de potasio disueltas, que puedan producir efectos desfavorables sobre el fraguado, la resistencia o la durabilidad del concreto o sobre las armaduras. Podrá utilizarse aguas naturales no potables, únicamente si están limpias y libres de cantidades perjudiciales de aceites, ácidos, álcalis, sales, materia orgánica u otras sustancias que puedan ser dañinas al concreto, acero de refuerzo o elemento embebidos. Al seleccionar el agua deberá recordarse que aquellas con alta concentración de sales deberán ser evitadas en la medida que no sólo pueden afectar el tiempo de fraguado, la resistencia del concreto y su estabilidad de volumen, sino que, adicionalmente, pueden originar eflorescencias o corrosión del acero de refuerzo.

El agua empleada en la preparación del concreto deberá cumplir con los requisitos de la norma NTP 339.088 y ser de preferencia, potable

3.16. Diseño de mezcla de concreto.

El diseño de mezclas, consiste en determinar las cantidades relativas de los materiales que forman parte de una estructura de concreto, la proporcionalidad se puede basar en datos obtenidos por experiencia práctica e investigaciones de ensayos que pueden resultar de diversas dosificaciones para la obtención del concreto. Los materiales que forman parte del concreto de vanguardia: (Material cementante + Agregado grueso + Agregado fino + H_2O + Materiales cementantes adicionales + Aditivos + Fibras) (Zapata Mar & Bosh Giral, 2009), influyen grandemente en las propiedades de resistencia y durabilidad del concreto, razón por la cual



deberán ser seleccionadas cumpliendo requerimientos exigidos en sus propiedades: Físicas, químicas y mecánicas. Existen diversos métodos de diseño para el concreto Pórtland a nivel mundial y son esencialmente similares, excepto que cada país dispone de su propio conjunto de tablas y gráficos para el cálculo de la densidad, agua requerida para la trabajabilidad y resistencia, basado en la disponibilidad del tipo de agregados, cementos y los otros componentes del concreto.

Una mezcla de concreto bien proporcionada deberá poseer las siguientes propiedades:

- ❖ En el concreto fresco: trabajabilidad adecuada, sin presencia de segregación, exudación y consistencia conveniente, entre otros.
- ❖ En el concreto endurecido: durabilidad, resistencia mecánica, apariencia libre de fisuras entre otros.
- ❖ Economía: logrando un concreto durable y resistente a bajo costo (Zapata Mar & Bosh Giral, 2009).

Antes de efectuar el proporcionamiento de una mezcla, se analiza las solicitaciones a las cuales estarán expuestas el concreto, tomando en cuenta las propiedades físico-mecánicas y químicas del concreto.

La resistencia a la compresión es la medida para la calidad del concreto empleado universalmente, por la facilidad en la determinación de este parámetro. La resistencia a la compresión se relaciona inversamente con la relación agua-cemento.

La resistencia de la pasta de cemento en el concreto depende de la calidad y cantidad de los componentes reactivos y del grado al cual se completa la reacción de hidratación. El concreto se vuelve más resistente con el pasar del tiempo, siempre y cuando exista humedad disponible y se tenga una temperatura favorable.

Los métodos de proporcionamiento han evolucionado desde el arbitrario método volumétrico (1:2:3 – cemento: arena: grava) de principios de siglo pasado, hasta los actuales



de peso y de volumen absoluto descritos en la práctica estándar para el proporcionamiento de mezclas de concreto del Comité ACI 211.1. Los métodos de proporcionamiento por peso son muy simples y rápidos para estimar las proporciones de las mezclas, utilizando un peso supuesto o conocido de concreto por unidad de volumen. Un método más exacto es el de volumen absoluto, que involucra el uso de los valores de la densidad de todos los componentes que ocupará en la unidad de volumen de concreto.

La resistencia a compresión del concreto, es la propiedad que frecuentemente se toma como medida de su endurecimiento y como índice de sus propiedades mecánicas. Es por ello que se propone como una alternativa el método de la madurez del concreto, para obtener información de la etapa anterior al endurecimiento, con tres fines principales:

- ❖ Obtener información temprana, que permita establecer la evolución del endurecimiento (fraguado) del concreto (Zapata Mar & Bosh Giral, 2009)
- ❖ Determinar la resistencia del concreto a edades cortas, medianas y largas, para seguir su evolución y
- ❖ Para poder verificar el cumplimiento del nivel de resistencia que es requerido en las especificaciones de la obra.

3.16.1. Asentamiento o Slump.

El asentamiento es un índice de la consistencia del concreto, relacionado con su estado de fluidez. No se debe confundir trabajabilidad con asentamiento.

Proporciona información útil sobre la uniformidad de las mezclas. Los valores de asentamiento y tiempo deben recomendados por el ACI 211.3 son los siguientes:

El concreto deberá ser lo suficientemente trabajable para que con el procedimiento de compactación seleccionado adecuadamente utilizado, se obtenga la consolidación deseada. El exceso de fluidez puede ser indeseable debido a que se puede incrementar el costo de la mezcla



y reducir la calidad del concreto endurecido. Cuando existe exceso de fluidez es el resultado de la utilización de demasiada agua en la mezcla, está generalmente inestable y muy posiblemente ha de segregarse durante el proceso de consolidación. Mezclas que tienen un asentamiento altamente moderado, agregado grueso de pequeño tamaño máximo y exceso de agregado fino, son frecuentemente empleadas debido a que su exceso de flujo permite un menor trabajo en el proceso de colocación. Se realizarán no menos de cuatro ensayos diarios para cada clase de concreto, en horas de vaciado diferentes antes de la colocación del concreto, y siempre que se verifique que la mezcla es más seca o más fluida que la consistencia deseada. Los resultados de este ensayo no deben ser tomados como criterio para rechazar el concreto, debiéndose considerar lo indicado en el Capítulo correspondiente. Los ensayos de asentamiento o "slump" del concreto, deberán estar comprendidos dentro de los límites indicados en las especificaciones, aceptándose una tolerancia de 13 mm para las mezclas de consistencia seca, y de 25 mm para las mezclas de consistencia plástica o fluida. Estas tolerancias sólo se permitirán para tandas individuales siempre que el promedio de los ensayos realizados en las últimas cinco tandas no exceda del asentamiento máximo permitido. El resultado de una sola prueba no se considerará como criterio suficiente para el rechazo de la mezcla, pero se deberá realizar inmediatamente un nuevo ensayo de comprobación con otra porción de la misma mezcla de concreto. Si este segundo ensayo no cumple, se considerará que el concreto no satisface los requisitos de las especificaciones.

3.16.2. Peso unitario y rendimiento.

El peso unitario normalmente está entre 2240 kg/m^3 a 2460 kg/m^3 . Abanto Castillo (2009) afirma que "un concreto es de peso normal si su peso unitario varía entre 2300 a 2500 kg/m^3 ".

Se refiere a la determinación del peso unitario del concreto recién mezclado, proporcionando fórmulas para calcular el rendimiento concreto. El rendimiento se define como



el volumen del concreto logrado con una mezcla de cantidades conocidas de sus materiales componentes.

3.16.3. Contenido de aire en el concreto fresco.

El contenido de aire entrampado en el concreto está en función de las proporciones en que se han combinado en la mezcla; las características físicas de los agregados y del método de la compactación.

El ensayo consiste de un recipiente y una cubierta de ensamble. El principio de operación de este medidor está basado en el hecho de igualar un volumen conocido de aire con una presión también conocida, en una cámara de aire cerrada, con un volumen desconocido de aire en la muestra de concreto. La carátula del medidor de presión (manómetro) se calibra en términos de porcentaje de aire para la presión observada, la cual se iguala, que tenga una carátula con marcas que indiquen el porcentaje de aire.

La variación aceptable en el contenido de aire será de 1 % para concretos de peso normal. Si el contenido del aire medido no cumple con los requisitos de las especificaciones de obra, dentro de los límites de variación indicados, se deberá realizar inmediatamente un nuevo ensayo de comprobación con otra porción de la misma mezcla de concreto. En caso que este segundo ensayo no cumpla, se considerará que el concreto satisface los requisitos de las especificaciones, debiéndose tomar disposiciones análogas a las indicadas para los ensayos de consistencia.

3.17. Recepción del concreto Premezclado.

La aceptación y recepción del concreto es uno de los temas de vital importancia en cualquier obra civil y es muy importante para el ingeniero encargado conocer todas las acciones a tomar en cuenta antes de iniciar el vaciado del concreto y las verificaciones más comunes que deben tener en cuenta a la hora de decepcionar el concreto fresco:



- ❖ Verificación del recibo de envió o factura del proveedor de concreto.
- ❖ Comprobación de características del concreto o pruebas al concreto fresco, esto varía de acuerdo a las especificaciones técnicas de la obra o exigencias del cliente o dueño del proyecto.
- ❖ Revisión de las condiciones de mezclado y transporte.
- ❖ Control del volumen de la mezcla.

3.17.1. Normatividad

Luego de descargado $\frac{1}{4}\text{m}^3$ del camión mezclador, la muestra combinada preliminar se realizará el ensayo de asentamiento ASTM C 94 punto 6.2 y 16.6

El ajuste inicial de asentamiento permitido, en el caso que la desviación del asentamiento sea por defecto (asentamiento menor al requerido, el encargado de entrega podrá agregar agua a la mezcla ajustándola uniformemente al asentamiento requerido [ASTM C 172 punto 5.2.3 y ASTM C 94 puntos 11.7 y 16.6.2].

La empresa encargada de suministrar el concreto premezclado, no será responsable del requerimiento de asentamiento luego que hayan transcurrido 30 minutos contados a partir de la hora de llegada del camión mezclador a la obra o contados a partir del ajuste inicial de asentamiento permitido, de acuerdo con la norma internacional, Ready Mixed Concrete ASTM C 94 ítem 6.2.

El muestreo del concreto, elaboración de especímenes de concreto y el ensayo de asentamiento formal, debe obtenerse durante la descarga $\frac{2}{3}$ del volumen transportado, de acuerdo a lo que establece la norma internacional Concreto Fresco Muestreo de la Mezcla ASTM C 172 punto 5.2.3.



3.17.2. Módulo de Elasticidad.

El módulo de elasticidad del concreto, es una propiedad mecánica que indica la rigidez del material, que sirve como parámetro para determinar las deformaciones que puede sufrir un material bajo un esfuerzo. Es importante conocer el valor real del módulo de elasticidad del concreto, para ser empleado en el diseño estructural, y permitirá predecir el comportamiento de la estructura bajo condiciones de servicio. Una mala selección del valor del módulo de elasticidad puede sobreestimar o subestimar el comportamiento de la estructura en condiciones de servicio, Beer, Johnston, & Dewolf (2007) afirman que “la mayor parte de las estructuras de ingeniería se diseñan para sufrir deformaciones relativamente pequeñas, que involucran solo la parte recta del diagrama de esfuerzo – deformación correspondiente”. (p.56)

3.17.2.1. Teoría de la elasticidad de los materiales.

El término elasticidad designa la propiedad mecánica de ciertos materiales de sufrir deformaciones reversibles cuando se encuentran sujetos a la acción de fuerzas exteriores y de recuperar la forma original si estas fuerzas exteriores se eliminan.

Timoshenko S. (1957), explica más detalladamente el fenómeno: Suponemos que un cuerpo está formado por partículas pequeñas o moléculas entre las cuales actúan fuerzas. Estas fuerzas moleculares se oponen a cambios de forma del cuerpo cuando sobre el actúan fuerzas exteriores. Si un sistema exterior de fuerzas se aplica al cuerpo, sus partículas se desplazan y estos desplazamientos mutuos continúan hasta que se establece equilibrio entre el sistema exterior de fuerzas y las fuerzas interiores. Se dice en este caso que el cuerpo está en estado de deformación. Durante la deformación, las fuerzas exteriores que actúan sobre el cuerpo realizan trabajo, y este trabajo se transforma completa o parcialmente en energía potencial de deformación. Si las fuerzas causan de la deformación del cuerpo disminuyen gradualmente, el cuerpo vuelve total o parcialmente a su forma primitiva y durante esta deformación inversa la



energía potencial de deformación acumulada en el cuerpo se recupera en forma de trabajo exterior. La propiedad que tienen los cuerpos de recuperar su forma primitiva al descargarlos se denomina elasticidad. Se dice que el cuerpo es perfectamente elástico si recobra su forma original de un modo completo al descargarlo, y que es parcialmente elástico si la deformación producida por las fuerzas exteriores no desaparece por completo al descargarlo. En el caso de un cuerpo perfectamente elástico, el trabajo realizado por las fuerzas exteriores durante la deformación se transforma completamente en energía potencial de deformación. En el caso de un cuerpo parcialmente elástico, parte de aquel trabajo se transforma en calor desarrollado en el cuerpo durante la deformación no elástica. Experimentalmente se ha visto que cuerpos talos como el acero, la madera, el concreto, y las piedras pueden considerarse como perfectamente elásticos por debajo de cierto límite que depende de las propiedades del material. Suponiendo que las fuerzas externas que actúan sobre una estructura son conocidas, es un problema fundamental para el proyectista dimensionar las partes de la estructura para que estén en condiciones perfectamente elásticas en todos los casos de carga. Solamente en tales condiciones la estructura tendrá una vida larga y segura y no presentara deformaciones permanentes en sus elementos. (p.1-2).

Cuando un cuerpo que está sometido a una carga externa es seccionado, hay una distribución de fuerza que actúa sobre el área seccionada, cuya intensidad de esta fuerza interna en un punto del cuerpo se denomina esfuerzo. (Hibberler, 1994, p.27)

El esfuerzo normal de un material, es el resultado de dividir una carga axial (P) entre el área de la sección transversal.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \text{Ecuación 3.11}$$

Debido a la fuerza axial aplicada el material sufre una deformación unitaria, que según Hooke, es el cociente de la deformación (δ) entre la longitud (L) en la que se ha producido.

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} \quad \text{Ecuación 3.12}$$



Desde el origen de la curva esfuerzo – deformación hasta un punto llamado límite de proporcionalidad, el diagrama es un segmento rectilíneo, de donde se deduce la tan conocida relación de proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación que representa la elasticidad del material, enunciada en el año 1678 por Robert Hooke.

Hibberler (1994), afirma que “Un diagrama esfuerzo – deformación, es importante en la ingeniería ya que proporciona un medio para obtener datos sobre la resistencia a tensión o compresión del material sin importar el tamaño o forma física del material”. (p.97)

3.17.2.2. *Definición del módulo de elasticidad de los materiales.*

Respecto al módulo de elasticidad de los materiales Schackelford (2005) indica que: El módulo de elasticidad (E), proporciona información muy práctica. Ya que representa la rigidez del material, resistencia a la deformación elástica (En el rango elástico), y se manifiesta como la cantidad de deformación durante la utilización normal del material por debajo de su límite elástico y también como el grado de recuperación elástica del material conformado luego de retirada las cargas externas. (p.183)

Thomas Young (1773 – 1829), fue el primero en definir el módulo elástico de un material, anteriormente conocido como Modulo de Young. Se dice que un material es elásticamente lineal, cuando exhibe una relación lineal entre el esfuerzo y la deformación unitaria producida en la misma dirección del esfuerzo. La relación lineal entre el esfuerzo y la deformación unitaria en un elemento sometido a tensión o compresión simple se expresa por la siguiente ecuación: (Gere & Timoshenko, 1986)

$$\sigma = E \cdot \epsilon \quad \text{Ecuación 3.13}$$

La ecuación se conoce también como la ley de Hooke, donde σ es el esfuerzo axial, ϵ es la deformación unitaria axial y E es el módulo de elasticidad del material.



En términos matemáticos el módulo de elasticidad es la pendiente del diagrama esfuerzo – deformación unitaria en la región elástica lineal. También se puede calcular como el cociente entre el esfuerzo y la deformación unitaria.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad \text{Ecuación 3.14}$$

Como la pendiente tiene unidades del esfuerzo dividido entre las deformaciones unitarias (adimensional), el módulo de elasticidad (E), posee las mismas unidades que el esfuerzo. Los valores comunes referenciales de módulos de elasticidad (E), para distintos materiales de ingeniería están a menudo tabulados en códigos de ingeniería y en libros de referencia. No obstante tengamos en cuenta que son solo valores referenciales. (Hibberler, 1994)

3.17.2.3. Módulo de elasticidad del concreto según el Reglamento Nacional de Edificaciones.

El módulo de elasticidad para concretos de peso normal según el Reglamento Nacional de Edificaciones E.060 se determina mediante la siguiente expresión.

$$E_c = 15\,000 \sqrt{f'_c} \left(\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \right) \quad \text{Ecuación 3.15}$$

El módulo de elasticidad del concreto (E_c), según el ACI-318, se determina mediante la siguiente ecuación. Para concretos de peso normal:

$$E_c = 57\,000 \sqrt{f'_c} \text{ (lb/in}^2\text{)} \quad \text{Ecuación 3.16}$$

Los estudios que condujeron a la expresión para el módulo de elasticidad del concreto están resumidos en Pauw (1960), en donde el módulo de elasticidad del concreto se define como la pendiente de la línea trazada desde un esfuerzo nulo hasta un esfuerzo de compresión de $0.45 f'_c$. El módulo de elasticidad del concreto es sensible al módulo de elasticidad del agregado y la dosificación de la mezcla de concretos, los valores medidos del módulo de elasticidad pueden variar entre el 80 y el 120 por ciento de los valores calculados, la norma



ASTM C 469 - 87 da un método de ensayo para determinar el módulo de elasticidad para el concreto en compresión. (ACI-318-02)

3.17.2.4. Factores que afectan al módulo de elasticidad del concreto.

La microestructura del concreto es heterogénea y exhibe diferentes comportamientos durante el proceso de carga debido a las diversas fases de los agregados, la matriz de pasta y a la interface de agregado de pasta (Topcu y Ugurlu, 2007). De esta manera, un cambio en la calidad de cualquiera de los componentes fundamentales representa un cambio en la respuesta del módulo y en general en el comportamiento del concreto, en la **Figura 3.19** podemos apreciar gráficamente lo anteriormente mencionado

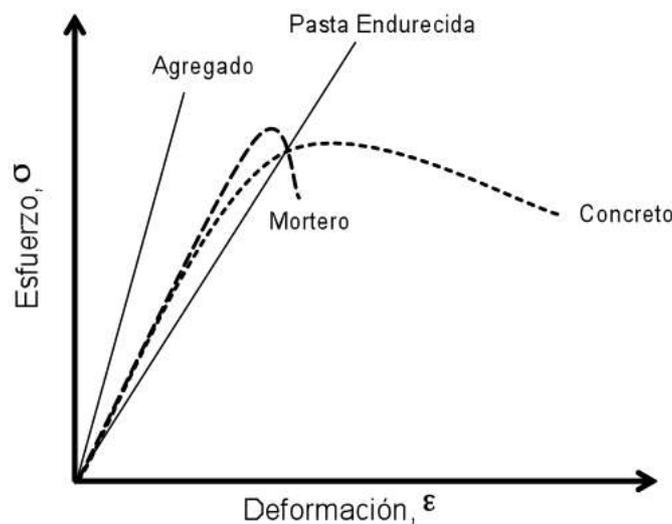


Figura 3.19. Relación esfuerzo – deformación en agregado, concreto, pasta endurecida y mortero.
Fuente: Serrano Guzmán & Pérez Ruiz (2010)

Según Topcu y Ugurlu (2007) la resistencia a compresión de los agregados y de la pasta endurecida es mucho mayor que la resistencia del concreto o del mortero. Sin embargo, el concreto exhibe mayor comportamiento dúctil que cada uno de los componentes considerado en forma individual. En otras palabras, el comportamiento inelástico del concreto es más alto que las otras fases y los otros componentes de la mezcla.



Son varios los factores que afectan el módulo de elasticidad de un concreto, unos tendrán relación con los materiales y otros con las reacciones que se dan en estado plástico y endurecido. Véase **Tabla 3.7**. La porosidad y el módulo de elasticidad de los agregados también son elementos importantes en la determinación de la rigidez. Es así como módulos de elasticidad de materiales no porosos con alta densidad producen módulos de elasticidad extremadamente altos. La relación agua/cemento influye también en el módulo de elasticidad tanto de la pasta como del concreto. Morteros con relaciones agua - cemento bajas ocasionan un incremento en el módulo de elasticidad del concreto.

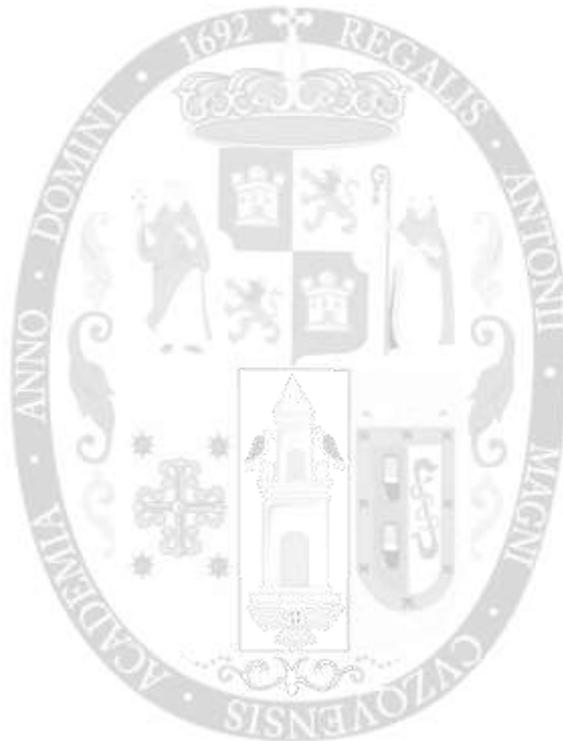
Tabla 3.7. Factores que afectan al módulo de elasticidad del concreto
Fuente: Serrano Guzmán & Pérez Ruiz, 2010

Concreto Fresco		Concreto Endurecido
Pasta	Agregado	Experimentales
Módulo de elasticidad de la matriz de pasta	Módulo de elasticidad de los agregados	Aplicación de la carga
Porosidad de la mezclas	Porosidad	Contenido de humedad de los especímenes
Condiciones de la matriz de pasta	Fracción volumétrica de los agregados	

Generalmente el módulo de elasticidad para los concretos estructurales livianos varían entre $\frac{1}{2}$ a $\frac{3}{4}$ del de los concretos arena y grava de la misma resistencia, la variación en la granulometría de los agregados livianos generalmente tiene pequeños efectos sobre el módulo de elasticidad si los volúmenes relativos de pasta y agregado permanecen constantes. Ottazzi Pasino (2004) indica que “el módulo de elasticidad del concreto es función del módulo de elasticidad de sus constituyentes”, en general el módulo de elasticidad del agregado incrementa el módulo de elasticidad del concreto, y que conforme el volumen de agregado incrementa se incrementa el módulo de elasticidad del concreto. El módulo del concreto se aproxima al módulo de elasticidad del agregado. Rivva Lopez (2004) enuncia: Sin embargo, cuando el módulo de elasticidad del concreto debe de ser conocido muy aproximadamente, se recomienda



ensayos del concreto en lugar de la computación del módulo de elasticidad a partir de las propiedades del agregado basando en relaciones empíricas y teóricas. (p.33)





CAPITULO 4. HIPÓTESIS Y VARIABLES.

4.1. Hipótesis general.

HG: La relación del índice de madurez a edades tempranas influye en la resistencia a compresión para diseño de mezcla de pavimento rígido $f'_c = 245 \text{ kg/cm}^2$, en la ciudad del Cusco-2016.

4.2. Hipótesis específicas.

HE1: La temperatura influye en el índice de madurez a edades tempranas y resistencia a compresión para diseño de mezcla de pavimento rígido $f'_c = 245 \text{ kg/cm}^2$.

HE2: El tiempo de curado afecta al índice de madurez a edades tempranas y resistencia a compresión para diseño de mezcla de pavimento rígido $f'_c = 245 \text{ kg/cm}^2$.

HE3: Es posible estimar en situaciones y tiempos reales el índice de madurez a edades tempranas y resistencia a compresión para diseño de mezcla de pavimento rígido $f'_c = 245 \text{ kg/cm}^2$.

4.3. Identificación de las variables.

En esta investigación existen variables para evaluar los resultados obtenidos con el método de madurez, relacionados con la temperatura interna del concreto en estudio, de ellas se derivan las variables a analizar.

4.3.1. Variables Independientes.

4.3.1.1. Índice de Madurez.

Un indicador de madurez que es calculado de la historia de temperatura de la mezcla cementante, mediante el uso de una función de madurez (ASTM C 1074).



4.3.1.1.1. *La temperatura de curado.*

Acelera los procesos de hidratación y esto afecta benéficamente la resistencia inicial del concreto; sin embargo, una temperatura muy alta durante la colocación y durante el fraguado, puede afectar adversamente las resistencias posteriores.

4.3.1.1.2. *Tiempo de fraguado.*

El término fraguado tiene relación con el tiempo de ganancia de propiedades resistentes y con el tiempo en que la mezcla deja de ser trabajable (Mehta y Monteiro, 2006)

4.3.1.1.3. *Diseño de mezcla.*

La característica de las mezclas de concreto y la dosificación de los materiales permiten realizar un diseño de mezcla para una resistencia determinada, que coladas y curadas bajo diferentes condiciones, diferirán unas de otras; debido al historial de temperatura y el tiempo de curado. Se tendrá en cuenta:

- ❖ Tipo de cemento.

Cemento Pórtland alta resistencia tipo HE: Es un cemento de alta resistencia inicial, tal como es mencionado en la NTP 334.082 (2008) Cementos Portland. Especificación de la Performance, muestra los requisitos de performance física de los cementos y no existen restricciones a la composición química del cemento o de sus constituyentes

- ❖ Relación agua cemento 0.65

- ❖ En el presente estudio, la relación agua cemento para el diseño de mezcla se mantendrá fija, entendiéndose que es un parámetro que influye grandemente en la resistencia del concreto.

- ❖ Agregados.

Existe una influencia en la resistencia del concreto ya que a mayor tamaño de agregado menor superficie adherente existirá entre la pasta y el agregado; y por otra parte la pasta poseerá



menos libertad para experimentar deformaciones sin que sufra una microfisuración que debilite la resistencia (Canovas 1991). El agregado es un componente importante del concreto debido a que interviene en un alto porcentaje entre el sesenta y setenta por ciento contribuyendo en la resistencia mecánica del concreto (Zapata Mar & Bosh Giral, 2009)

- ❖ Aditivos.
- ❖ Se entiende por aditivo aquellas sustancias o productos que; incorporados al concreto antes o durante del amasado, producen la modificación deseada en estado fresco o endurecido de alguna de sus características y propiedades físico – mecánicas del diseño de mezcla en estudio.

4.3.2. Variables Dependientes.

4.3.2.1. Resistencia.

La resistencia a flexión y compresión del concreto.



4.4. Operacionalización de variables.

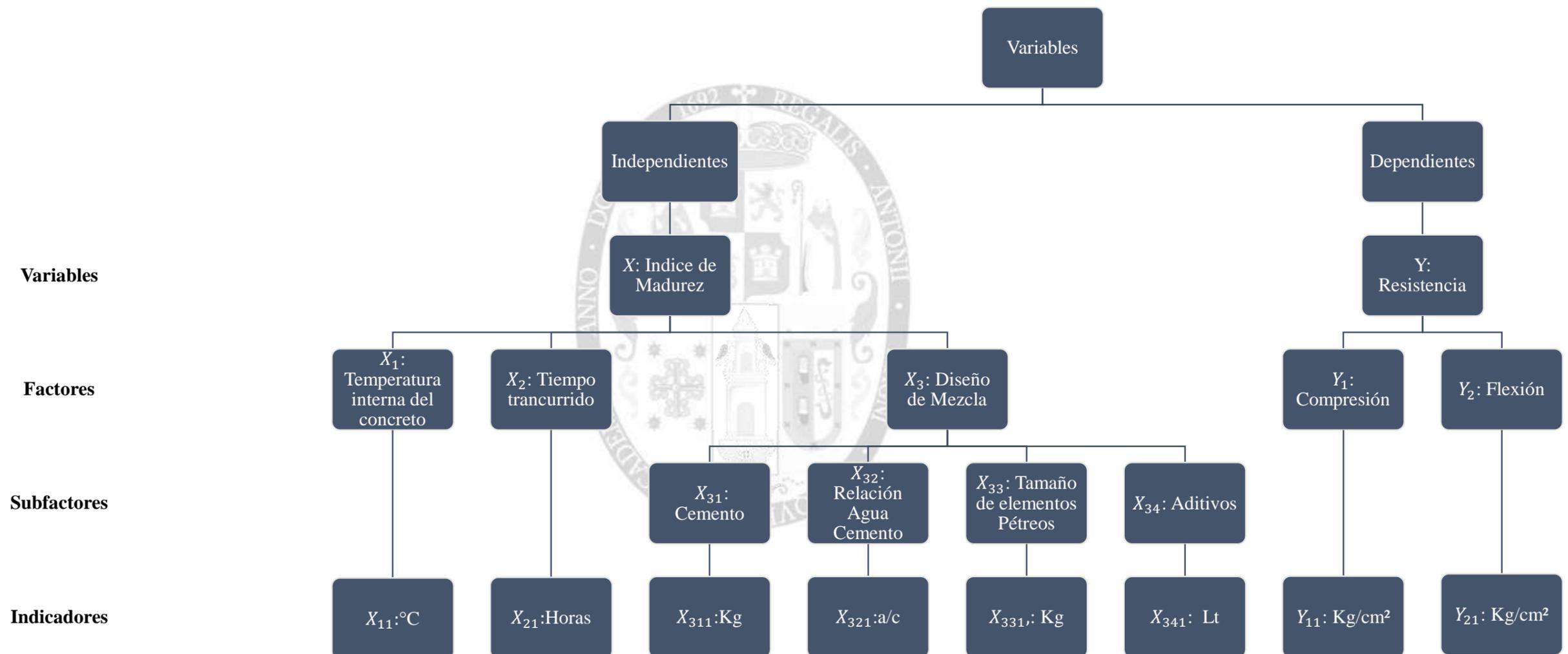


Figura 4.1 Operacionalización de variables.
Fuente: elaboración propia.



4.1. Matriz de consistencia.

Tabla 4.1 Matriz de consistencia.
Fuente: Elaboración Propia.

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	INDICADORES	METODOLOGÍA
<p>PROBLEMA GENERAL PG: ¿Es posible estudiar la relación del índice de madurez a edades tempranas y resistencia a compresión para diseño de mezcla de pavimento rígido $f'_c = 245 \text{ kg/cm}^2$?</p> <p>X: °C·hr ↔ Y: Kg/cm²</p>	<p>OBJETIVO GENERAL OG: Determinar la relación del índice de madurez a edades tempranas y resistencia a compresión para diseño de mezcla de pavimento rígido $f'_c = 245 \text{ kg/cm}^2$, en la ciudad del Cusco-2016.</p>	<p>HIPÓTESIS GENERAL HG: La relación del índice de madurez a edades tempranas influye en la resistencia a compresión para diseño de mezcla de pavimento rígido $f'_c = 245 \text{ kg/cm}^2$, en la ciudad del Cusco-2016.</p>	<p>VARIABLES INDEPENDIENTES X: Índice de madurez X_1: Temperatura interna del concreto. X_2: Tiempo transcurrido X_3: Diseño de mezcla X_{31}: Tipo de cemento X_{32}: Relación agua cemento X_{33}: Agregado X_{34}: aditivos</p>	<p>VARIABLES INDEPENDIENTES X: °C·hr X_1: °C X_2: Hr X_3: X_{31}: Kg X_{32}: Kg/Kg X_{33}:kg X_{34}:kg</p>	<p>El procedimiento para calcular la resistencia a flexión y compresión del pavimento rígido in situ utilizando el índice de madurez constará de: elaborar el índice de madurez en laboratorio y posteriormente estimar la resistencia mecánica a flexión y compresión in situ.</p> <p>Elaborar el índice de madurez. El procedimiento será llevado a cabo en el laboratorio antes de la construcción del pavimento. Realizándose la caracterización de materias primas de componentes del concreto en estudio, Posteriormente se elaborará el concreto y se moldeará 44 cilindros de concreto y 32 vigas de concreto, Seguidamente se procederá a la instrumentación de dos especímenes de vigas y cilindros de concreto, con sensores de temperatura para registrar el historial de temperatura durante 70 días de estudio. Se realizará ensayos de concreto en estado fresco; realizando muestreo y características tales como; temperatura, asentamiento, peso unitario, rendimiento y contenido de aire. Durante los 70 días de estudio, se realizará ensayos de las propiedades mecánicas de resistencia a flexión y compresión. Por último, se determinará el índice de madurez relacionando el historial de temperatura con valores de resistencia a flexión y compresión.</p>
<p>PROBLEMAS ESPECÍFICOS ¿La temperatura influye en el índice de madurez a edades tempranas y resistencia a compresión para diseño de mezcla de pavimento rígido $f'_c = 245 \text{ kg/cm}^2$? X_1: Temperatura interna del concreto.: [X_1: °C]</p> <p>¿El tiempo de curado, afecta al índice de madurez a edades tempranas y resistencia a compresión para diseño de mezcla de pavimento rígido $f'_c = 245 \text{ kg/cm}^2$? X_2: Tiempo transcurrido: [X_2: Hr]</p> <p>¿Será posible estimar in-situ y tiempos reales el índice de madurez a edades tempranas y resistencia a compresión para diseño de mezcla de pavimento rígido $f'_c = 245 \text{ kg/cm}^2$? X_1: Temperatura interna del concreto. X_2: Tiempo transcurrido</p>	<p>OBJETIVOS ESPECÍFICOS Determinar la influencia de la temperatura en el índice de madurez a edades tempranas y resistencia a compresión para diseño de mezcla de pavimento rígido $f'_c = 245 \text{ kg/cm}^2$.</p> <p>Cuantificar el efecto de historial de tiempo de curado en el índice de madurez a edades tempranas y resistencia a compresión para un diseño de mezcla de pavimento rígido $f'_c = 245 \text{ kg/cm}^2$.</p> <p>Estimar in-situ y tiempos reales el índice de madurez a edades tempranas y resistencia a compresión para un diseño de mezcla de pavimento rígido $f'_c = 245 \text{ kg/cm}^2$.</p>	<p>HIPÓTESIS ESPECIFICAS La temperatura influye en el índice de madurez a edades tempranas y resistencia a compresión para diseño de mezcla de pavimento rígido $f'_c = 245 \text{ kg/cm}^2$.</p> <p>El tiempo de curado afecta al índice de madurez a edades tempranas y resistencia a compresión para diseño de mezcla de pavimento rígido $f'_c = 245 \text{ kg/cm}^2$.</p> <p>Es posible estimar en situaciones y tiempos reales el índice de madurez a edades tempranas y resistencia a compresión para diseño de mezcla de pavimento rígido $f'_c = 245 \text{ kg/cm}^2$.</p>	<p>VARIABLES DEPENDIENTES Y: Resistencia del Concreto. Y1: Resistencia a compresión. Y2: Resistencia a Flexión.</p>	<p>VARIABLES DEPENDIENTES Y_{11}: Kg/cm² Y_{21}: Kg/cm²</p>	<p>Estimación de la resistencia in situ. El procedimiento será llevado a cabo in situ, en la construcción del pavimento, siguiendo los siguientes pasos: En esta etapa del planteamiento experimental se deberá verificar la procedencia de los materiales componentes del concreto y condiciones de elaboración del concreto in situ, que será un componente del plan de control de calidad global para este proyecto de investigación, se procederá a la instrumentación de la estructura en estudio, con sensores del equipo de madurez in situ, se elaborará vigas y cilindros de concreto in situ para posterior validación del índice de madurez. Se tendrá un control de calidad del concreto en estado fresco, verificando los parámetros establecidos, se realizará la medición del índice de madurez in situ y se dará validez al índice de madurez, comparando las resistencias pronosticadas y resistencias reales in situ.</p>



CAPITULO 5. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

5.1. Alcances de la investigación.

La presente investigación es de tipo cuantitativo, tomando en consideración el objetivo principal que pretende medir el valor de las propiedades mecánicas del concreto en base al índice de madurez del concreto a edades tempranas y en referencia a los objetivos específicos tendrá un alcance correlacional debido a que evalúa el grado de influencia de la temperatura y tiempo de curado en el índice de madurez

5.2. Características de la investigación.

5.2.1. Tipo de Investigación cuantitativo.

- ❖ Por el propósito : Tecnológica
- ❖ Por el nivel de Conocimiento : Científico

5.2.1.1. Diseño de Investigación Correlacional.

La presente investigación evalúa la relación existente entre el índice de madurez y resistencia a edades tempranas; para un diseño de mezcla de pavimento rígido $f'_c = 245 \text{ kg/cm}^2$.

La **Figura 5.1** muestra la correlación entre estas dos variables.

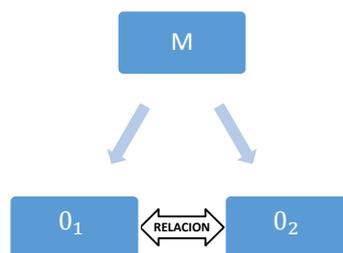


Figura 5.1 Correlación de Variable independiente y Variable dependiente.
Fuente: Elaboración propia.

Donde:

M = Muestra de Diseño de mezcla.

O_1 = Índice de Madurez.

O_2 = Resistencia del Concreto.



5.2.2. Unidad de análisis.

La unidad de análisis fue la relación entre el índice de madurez y la resistencia. El índice de madurez se cuantificó de acuerdo a los indicadores de; temperatura interna del concreto y tiempo [temperatura interna del concreto + tiempo = historial de temperatura], manteniéndose constante los indicadores de diseño de mezcla. El valor de resistencia se midió en resistencia a compresión y resistencia a flexión. Obteniéndose la relación existente entre las variables, mediante: la unidad de observación del historial de temperatura [medida en horas- grados Celsius], y evaluado en el valor [dato] de la resistencia a compresión y flexión.

El intervalo de tiempo de registro fue de un minuto y tuvo una precisión de $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$, el dispositivo utilizado registró y almacenó la información, mediante termocuplas y memoria de almacenamiento, con software que permitió el cálculo del factor temperatura tiempo y edad equivalente.

5.2.3. Población en estudio.

Basados en la norma ASTM C-1074 "Estimación de la resistencia del concreto por el método de la madurez" establece que se prepare como mínimo 17 especímenes tanto en vigas y cilindros de concreto.

5.2.3.1. Selección y tamaño de muestras.

Tomando en consideración el estudio a edades tempranas, se programó un estudio de acuerdo a la **Tabla 5.1**, donde con fines de investigación, para cada tipo de espécimen (cilindro y viga de concreto) en estudio se programaron ensayos para las edades uno, dos, tres, cuatro, cinco, seis, siete, 14, 21, 28, 32, 42, 49, 56 y 70 días para ensayos de resistencia a compresión y edades de uno, tres, cinco, siete, 14, 21, 28 y 32 días para ensayos de resistencia a flexión en laboratorio.



Tabla 5.1 Tamaño de Muestra para la relación índice de madurez y resistencia (laboratorio y campo).
Fuente. Elaboración Propia

Cemento Pórtland tipo HE						
Edad	Cilindros de concreto				Vigas de concreto	
	Gradación continua (laboratorio)		Gradación usada en planta de premezclado		Gradación usada en planta de premezclado	
	Con aditivo	Sin aditivo	Laboratorio	In-situ	Laboratorio	In-situ
1			3		3	
2			3		3	
3			3	6	3	6
4			3		3	
5			3		3	
6			3		3	
7			3		3	
8				3		3
9				3		3
14			3		3	
15				3		3
16				3		3
21			3		3	
22				3		
28	3	3	3		3	
29				3		3
35			3	3		3
42			3			
43				3		
49			3			
70			3			
Briqueta de control			2	6 ⁽¹⁹⁾	2	6 ⁽²⁰⁾
Subtotal	3	3	44	36	32	30
Total			86	148		62

De la tabla podemos indicar que el número total de especímenes de concreto preparado para los ensayos en laboratorio como en campo fueron 148.

⁽¹⁹⁾ se puso 3 sensores en cada progresiva (1+045 y 1+150).
⁽²⁰⁾ se puso 3 sensores en cada progresiva (1+045 y 1+150).



5.3. Metodología de la investigación aplicada.

Índice de madurez, resistencia a flexo-compresión, pavimento rígido, in situ

El procedimiento para calcular la resistencia a flexión y compresión del pavimento rígido in situ utilizando el índice de madurez constó de: elaborar el índice de madurez en laboratorio y posteriormente estimar la resistencia mecánica a flexión y compresión in situ.

5.3.1. Elaborar el índice de madurez.

El procedimiento fue llevado a cabo en el laboratorio antes de la construcción del pavimento, tal como se indican a continuación:

1. Se realizó la caracterización de materias primas de componentes del concreto en estudio.
2. A continuación, se elaboró el concreto y se moldeó 44 cilindros de concreto y 32 vigas de concreto.
3. Seguidamente se procedió a la instrumentación de dos especímenes de vigas y cilindros de concreto, con sensores de temperatura para registrar el historial de temperatura durante 70 días de estudio.
4. Posteriormente se realizó ensayos de concreto en estado fresco; realizando muestreo y características tales como; temperatura, asentamiento, peso unitario, rendimiento y contenido de aire.
5. Durante los 70 días de estudio, se estableció ensayos de las propiedades mecánicas de resistencia a flexión y compresión, durante todos los días de edad temprana y a mayores edades.
6. Por último, se determinó el índice de madurez relacionando el historial de temperatura con valores de resistencia a flexión y compresión.



5.3.2. Estimación de la resistencia in situ.

El procedimiento fue llevado a cabo in situ, en la construcción del pavimento, siguiendo los siguientes pasos:

1. En esta etapa del planteamiento experimental se verificó la procedencia de los materiales componentes del concreto y condiciones de elaboración del concreto in situ, que fue un componente del plan de control de calidad global para este proyecto de investigación.
2. Luego se procedió a la instrumentación de la estructura en estudio, con sensores del equipo de madurez in situ.
3. A continuación, se elaboró vigas y cilindros de concreto in situ para posterior validación del índice de madurez.
4. Seguidamente se tuvo un control de calidad del concreto en estado fresco, verificando los parámetros establecidos.
5. Posteriormente se realizó la medición del índice de madurez in situ.
6. Por último, se dio validez al índice de madurez, comparando las resistencias pronosticadas y resistencias reales in situ.



CAPITULO 6. PLANTEAMIENTO DEL MODELO EXPERIMENTAL.

6.1. Introducción.

Con el objeto de aplicar el método de madurez para la estimación de resistencias a edades tempranas en pavimentos de concreto, se desarrolló el siguiente estudio experimental de pruebas en laboratorio. Se realizó un análisis y caracterización del: cemento, elementos pétreos, aditivo y agua; para la fabricación de concreto. En efecto se realizó análisis de tipo físico-químico y mecánico para el control de calidad del concreto en estudio.

A continuación, se hará una descripción de las características propias del método de investigación y la metodología que se empleó para evaluar las propiedades físico –mecánicas de las mezclas de concreto, el proceso, estrategias para estimar el índice de madurez y, por último, se describirá el procedimiento para la verificación de la relación índice de madurez y posterior evaluación de resistencia in situ.

6.1.1. Técnica de recolección de datos de información.

6.1.1.1. *Equipo utilizado.*

Para la realización de las campañas experimentales, se utilizaron tres equipos de madurez, la primera fue construida con la ayuda del estudiante Efraín Chino Ugarte en las instalaciones de la empresa Cuscotec SA, la segundo y tercer equipo fue elaborado por el estudiante Leónidas Peláez, ambos estudiantes de ingeniería electrónica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. Dichos Equipos son capaces de ser programados para almacenar una capacidad de 32 Gigabyte de datos de registros de historial de temperatura y tiempo. Los equipos fueron utilizados en la primera campaña experimental de laboratorio y posteriormente fueron llevados a la segunda campaña realizada in-situ, donde se utilizaron sondas termopares conectadas a los equipos de madurez para la obtención de los perfiles térmicos.



Asimismo, el sensor de temperatura que se utilizó es del modelo: DS18B20, que es un termómetro digital de alta precisión que opera en el rango de -10 a 85 grados Celsius con una precisión de $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$. el equipo de madurez está programado para almacenar datos cada minuto, las 24 horas del día durante los 70 días de estudio programado, se esperó la obtención de 100,800.00 datos de temperatura para cada espécimen de estudio y el medio de curado. En la **Figura 6.1** y **Figura 6.2** se muestran el Equipo de madurez N° 01 y N° 02 respectivamente.

De acuerdo con la norma ASTM C-1074, establece que el sistema de medición de temperatura debe tener una precisión $\pm 1^\circ\text{C}$; medidas que se registran al menos cada 20 minutos como tiempo máximo durante las primeras 24 horas y 30 minutos posterior a las 24 horas.

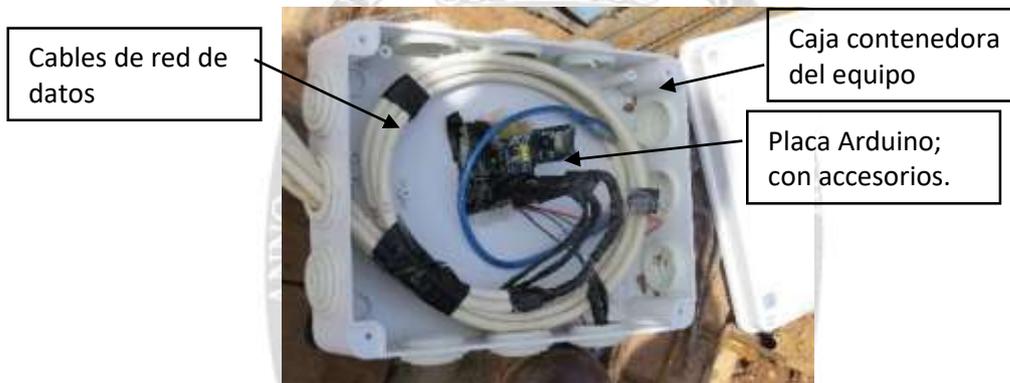


Figura 6.1 Equipo de madurez N° 01.
Fuente: Elaboración propia.

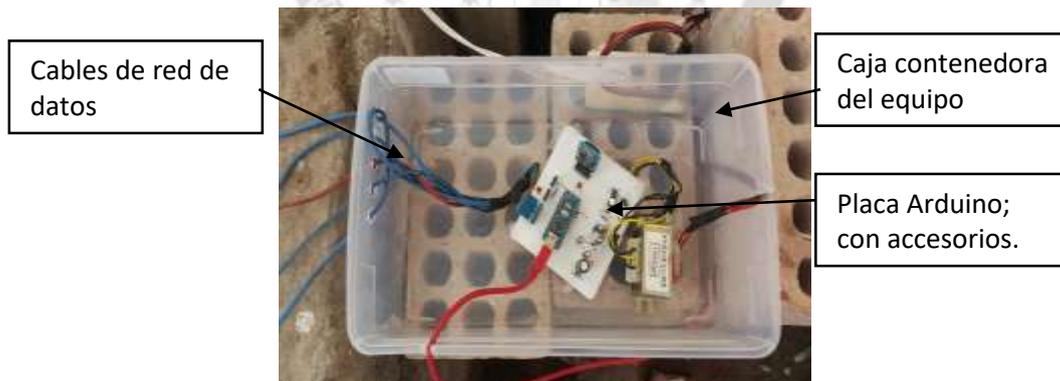


Figura 6.2 Equipo de madurez N° 02.
Fuente: Elaboración propia.



6.1.2. Mezclas de Concreto en Estudio.

Para el presente estudio se utilizó un diseño de concreto premezclado para pavimento rígido $f'_c = 245 \text{ kg/cm}^2$, módulo de rotura 36 Kg/cm^2 , slump 4" y tamaño máximo nominal de 1" de elemento pétreo.

6.2. Caracterización de Materias Primas.

Los componentes del concreto premezclado utilizados son: el cemento, agregados, aditivo y el agua. Los ensayos de caracterización para cada uno de ellos, se muestran a continuación.

6.2.1. Cemento.

El cemento empleado por la planta de premezclados es Cemento Pórtland de alta resistencia Tipo HE. Producido por cemento Yura Arequipa. En efecto en la **Tabla 6.1**, **Tabla 6.2** y **Tabla 6.3** se presentan los requisitos físicos, químicos y mecánicos que el cemento Pórtland tipo HE debe cumplir respectivamente, de acuerdo a la NTP 334.082 y ASTM 1157; así mismo en cada tabla se presenta la comparación de requisitos de acuerdo a las respectivas normas del cemento tipo 1 y cemento HE.

Tabla 6.1 Requisitos físicos del cemento Pórtland de alta resistencia tipo HE.
Fuente: Elaboración propia.

Requisitos Físicos	Requisitos norma Técnica NTP 334.082 ASTM 1157	Requisitos norma Técnica Cemento Tipo I NTP 334.082/ASTM C 150
Peso Específico (g/cm ³)	No especifica	No especifica
Superficie específica Blaine (cm ² /g)	-	2600 mínimo
Expansión en Autoclave (%)	0.80 Máximo	0.80 Máximo
Fraguado Vicat Inicial (minutos)	45 mínimo	45 Mínimo
Fraguado Vicat final (minutos)	420 máximo	420 Máximo
Contenido aire mortero (%)	-	12.00 Máximo



Tabla 6.2 Requisitos químicos del cemento Pórtland de alta resistencia tipo HE.
Fuente: Elaboración propia.

Requisitos Químicos	Requisitos norma Técnica NTP 334.082 ASTM 1157	Requisitos norma Técnica Cemento Tipo I NTP 334.082/ASTM C 150
Oxido de Magnesio, MgO (%)	No especifica	6 Máximo
Trióxido de Azufre, SO ₃ (%)	No especifica	3 Máximo
Perdida por ignición o al Fuego, P.F (%)	No especifica	3 Máximo

Tabla 6.3 Requisitos mecánicos del cemento Pórtland de alta resistencia tipo HE.
Fuente: Elaboración propia.

Requisitos Mecánicos	Requisitos norma Técnica NTP 334.082 ASTM 1157		Requisitos norma Técnica Cemento Tipo I NTP 334.082/ASTM C 150	
	Kg-f/cm ²	MPa	Kg-f/cm ²	MPa
Resistencia a la Compresión				
1 día	122	12	-	-
3 días	245	24	122	12
7 días	-	-	194	19
28 días	-	-	-	-

6.2.2. Elementos pétreos.

Las características evaluadas del componente pétreo del concreto fueron análisis físico-químico y análisis físico mecánico.

Para la realización de la investigación se utilizaron agregado grueso y agregado fino.

El agregado grueso utilizado por la planta de premezclado es de la cantera de Abrill y son: Piedra chancada de ¾” que se conocerá como Grueso 01 y la piedra chancada de ½” que se conocerá como grueso 02. Así mismo el agregado fino utilizado por la planta de premezclado es de la cantera de Abrill y Sertraq que son: arena gruesa procedente de la cantera Abrill, que se conocerá como fino 01 y arena fina procedente de la cantera Sertraq, que se conocerá como fino 02.

La cantera Abrill se ubica en el distrito de Caicay de la Provincia de Paucartambo del departamento de cusco, a una altitud de 3075 msnm a Latitud 13°33'55.23"S y Longitud 71°43'26.70"O. El agregado de la cantera es de origen ígneo, las composiciones mineralógicas de los clastos están constituidas principalmente de rocas volcánicas y microdioritas, razón por la cual la empresa hace uso de esa cantera.



La cantera Abrill se ubica en el distrito de Saylla, provincia de Cusco y departamento de Cusco, a una altitud de 3150 msnm a Latitud 13°34'13" S y Longitud 71°49'35" O. El agregado de la cantera es de origen aluvial, las composiciones mineralógicas de la matriz son de arena media principalmente de cuarzo y accesoriamente de feldespato y limo, razón por la cual la empresa hace uso de esa cantera.

6.2.2.1. Análisis físico-químico.

Las propiedades físicas y químicas analizadas ha sido: Sales Solubles totales, PH, Carbonatos, Materia Orgánica, Sulfatos, Cloruros y Durabilidad (48h/MgSO₄⁽²¹⁾) de los elementos pétreos (agregado grueso y agregado fino) que estarán basados en la normatividad que se muestra en la **Tabla 6.4** descripción de análisis físico-químicos que se realizara de acuerdo a la norma ASTM, MTC y NTP.

Tabla 6.4 Normas Análisis Físicoquímico de los elementos pétreos.
Fuente: Elaboración propia.

Análisis físicoquímico		
Descripción	Normas	
Sales Solubles totales ppm	ASTM D-516, MTC E 219	Sales solubles totales
pH	ASTM D-512, MTC E 718	PH
Carbonatos %	ASTM D-512	Cantidad de carbonatos
Materia Orgánica %	ASTM D-512, MTC E 717 y NTP 339.071:	Contenido de materia orgánica
Sulfatos ppm	ASTM D-1293, MTC E 719	Contenido de sulfatos
Cloruros ppm	ASTM D-1293, MTC E 720	Contenido de cloruros
Durabilidad (48h/MgSO ₄) %	ASTM C-88, NTP 400.16 y MTC E 209	Durabilidad al sulfato de sodio y magnesio en agregado fino o grueso

6.2.2.2. Análisis físico mecánico.

Las propiedades físico mecánicas a realizar en los agregados son: determinación del contenido de humedad, cantidad de material fino que pasa el tamiz de 75 µm (n° 200) por

⁽²¹⁾ sulfato de magnesio



lavado, análisis granulométrico de agregado fino y grueso, peso específico y absorción de agregados finos, peso específico y absorción de agregados gruesos, peso unitario y vacíos de los agregados, índice de aplanamiento y alargamiento de los agregados para carreteras y abrasión los ángeles (l.a.) al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37,5 mm. Estos ensayos se muestran en la **Tabla 6.5** con su normatividad correspondiente.

Tabla 6.5 Normatividad de las propiedades físico-mecánicas.
Fuente: Elaboración propia.

Nombre de ensayo	Norma
Determinación del contenido de humedad	MTC E 108, NTP 339.185 y ASTM D2216-71
Cantidad de material fino que pasa el tamiz de 75 μm (n° 200) por lavado.	MTC E 202, NTP 400.018, ASTM C-117 y AASHTO T-11
Análisis granulométrico de agregado fino y grueso.	MTC E 204, NTP 400.012, ASTM C-136 y AASHTO T-27
Peso específico y absorción de agregados Finos.	MTC E 205, NTP 400.022, ASTM C-128 y AASHTO T-85
Peso específico y absorción de agregados gruesos.	MTC E 206, NTP 400.021 y ASTM C127-15,
Peso unitario y vacíos de los agregados.	MTC E 203, NTP 400.017 y ASTM C-29
Índice de aplanamiento y alargamiento de los agregados para carreteras.	MTC E 221 u NTL - 354
Abrasión los ángeles (l.a.) al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37,5 mm.	NTP 400.019

6.2.2.2.1. *Determinación Del Contenido De Humedad.*

Este ensayo se realizó de acuerdo a la normatividad siguiente:

- ❖ MTC E 108. Determinación del contenido de humedad de un suelo.
- ❖ ASTM D2216-71. Standard method of laboratory determination of moisture content of soil and rock.
- ❖ NTP 339.185. Método de ensayo normalizado para contenido de humedad total evaporable de agregados por secado.

Para la determinación de la humedad de los agregados se utilizó el procedimiento descrito por la normatividad antes mencionada; el cual consiste en tomar una muestra de 500 g del material e introducirla en un recipiente previamente pesado, esto se coloca en un horno a



110° ± 5 °C hasta que el peso permanezca constante. Al retirar la muestra del horno se vuelve a pesar junto con el recipiente. La humedad se determina según la ecuación:

$$w = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_c} \cdot 100\% \quad \text{Ecuación 6.1}$$

Donde:

w: Humedad de la muestra (%).

W₁: Masa del recipiente y del espécimen húmedo (g).

W₂: Masa del recipiente y del espécimen seco (g).

W_c: Masa del recipiente.

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

$$\text{Correccion de agua} = w_a \cdot (w \pm abs) \quad \text{Ecuación 6.2}$$

Donde:

w_a: Peso del agregado (g)

w: Humedad de la muestra (%)

abs: Absorción de la muestra (%)

$$\text{Correccion peso agregado} = w_a \cdot (w + 1) \quad \text{Ecuación 6.3}$$

w_a: Peso del agregado (g)

w: Humedad de la muestra (%)

La dosificación final de la mezcla se hizo en base a estos resultados obtenidos; posteriormente se planteó la elaboración de cilindros y vigas para los ensayos respectivos; en estado fresco y endurecido.

Una vez planteado el diseño de mezcla se procedió al mezclado de sus componentes y el proceso de extraído del concreto de la mezcladora en moldes no absorbentes, previamente humedecidos para realizar los ensayos.

6.2.2.2.2. Cantidad de material fino que pasa el tamiz de 75 μm (n° 200) por lavado.



Este método de ensayo cubre la determinación de la cantidad de material más fino que el tamiz de 75µm (Nº. 200) en agregados por lavado. Partículas de arcilla y otras que son dispersadas por el agua de lavado, así como materiales solubles al agua, serán removidas del agregado durante el ensayo.

En la Tabla 6.6 se muestra el Peso mínimo aproximado de material fino que pasa el tamiz de 75 µm.

Este ensayo se realizó de acuerdo a la normatividad siguiente:

- ❖ MTC E 202. Cantidad de material fino que pasa el tamiz de 75 µm (nº 200) por lavado.
- ❖ NTP 400.018. Método de ensayo normalizado para determinar materiales más finos que pasan por el tamiz normalizado Cantidad de 75µm (Nº 200) por lavado en agregados.
- ❖ ASTM C-117. Standard Test Method for Materials Finer than 75-µm (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing.
- ❖ AASHTO T-11. Sieve analysis of fine and coarse aggregates.

La **Tabla 6.6** muestra los pesos mínimos de material fino de acuerdo al tamaño nominal máximo.

Tabla 6.6 Peso mínimo aproximado de material fino que pasa el tamiz de 75 µm.
Fuente: MTC E 202. Cantidad de material fino que pasa el tamiz de 75 µm (nº 200) por lavado.

Tamaño nominal máximo de tamices	Peso mínimo aproximado de la muestra en gramos (g)
Nº4 (4,75 mm) o menos	300
3/8'' (9,5 mm)	1000
3/4'' (19,0 mm)	2500
1 1/2'' (37,5 mm) o mayor	5000

Se calculó la cantidad de material que pasa el tamiz de 75 µm (Nº 200), por lavado de la siguiente forma:

$$A = \frac{B-C}{B} \cdot 100 \qquad \text{Ecuación 6.4}$$



Donde:

A = Porcentaje del material fino que pasa el tamiz de 75 μm (N° 200) por lavado.

B = Peso original de la muestra seca, en gramos.

C = Peso de la muestra seca, después de ser lavada, en gramos.

6.2.2.2.3. *Análisis granulométrico de agregado fino y grueso.*

Este ensayo se realizó de acuerdo a la normatividad siguiente:

- ❖ MTC E 204. Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos.
- ❖ NTP 400.012. Análisis granulométrico del agregado fino, grueso y global.
- ❖ ASTM C-136. Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates.
- ❖ AASHTO T-27. Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates.

De acuerdo a la **Tabla 6.7**, las muestras de agregado grueso para el análisis granulométrico, después de secadas, deberán tener aproximadamente los siguientes pesos:

Tabla 6.7 Cantidad mínima de muestra de ensayo granulométrico de agregado grueso.
Fuente: MTC E 204. Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos.

Tamaño máximo nominal		Cantidad mínima de muestra de ensayo
mm	(pulg)	Kg
9.5	3/8	1
12.5	1/2	2
19.0	3/4	5
25.0	1	10
37.5	1 1/2	15
50.0	2	20
63.0	2 1/2	35
75.0	3	60
90.0	3 1/2	100
100.0	4	150
125.0	5	300

Para llevar a cabo la caracterización granulométrica del agregado grueso y fino se procedera de acuerdo a la **Tabla 6.8** y **Tabla 6.9** limites de granulometria según el ASTM C-33.



Tabla 6.8 Límites de granulometría según el ASTM C 33 para agregados finos.
Fuente: Tecnología del Concreto, Abanto Castillo 2009, p 24

MALLA		% QUE PASA (ACUMULATIVO)		
3/8"	9.5 mm			100
Nº4	4.75 mm	95	a	100
Nº8	3.36 mm	80	a	100
Nº16	1.18 mm	50	a	85
Nº30	600 µm	25	a	60
Nº50	300 µm	5	a	30
Nº100	150 µm	0	a	10

Tabla 6.9 Requisitos de granulometría de agregado grueso según el ASTM C 33.
Fuente: Tecnología del Concreto, Abanto Castillo 2009, p 27

Huso	Tamaño máximo nominal		% QUE PASA POR LOS TAMICES NORMALIZADOS														
			100 mm	90.00 mm	75 mm	63 mm	50 mm	37.50 mm	25 mm	19 mm	12.50 mm	9.50 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm	300 mm	
			4 pulg	3 1/2 pulg	3 pulg	2 1/2 pulg	2 pulg	1 1/2 pulg	1 pulg	3/4 pulg	1/2 pulg	3/8 pulg	Nº4	Nº8	Nº16	Nº50	
1	90mm a 37.5mm	3.5 pulg a 1.5pulg	100	90 a 100		25a60		0a15		0a15							
2	63mm a 37.5mm	2.5 pulg a 1.5pulg			100	90a100	35a70	0a15		0a5							
3	50mm a 25mm	2pulg a 1pulg				100	90a100	35a70	0a15		0a15						
357	50mm a 4.75mm	2pulg a Nº4pulg				100	95a100		35a70		10a30		0a5				
4	37.5mm a 19mm	1.5pulg a 0.75pulg					100	90a100	20a55	0a5		0a5					
467	37.5mm a 4.75mm	1.5pulg a Nº4pulg					100	95a100		35a70		10a30	0a5				
5	25mm a 9.5mm	1pulg a 0.375pulg						100	90a100	20a55	0a10	0a5					
56	25mm a 9.5mm	1pulg a 0.375pulg						100	90a100	40a85	10a40	0a15	0a5				
57	25mm a 4.75mm	1pulg a Nº4						100	95a100		25a60		0a10	0a5			
6	19mm a 9.5mm	0.75pulg a 0.375mm							100	90a100	20a55	0a15	0a5	0a5			
67	19mm a 4.75mm	0.75pulg a Nº4							100	90a100		20a55	0a10	0a5			
7	12.5mm a 4.75mm	0.5pulg a Nº4								100	90a100	40a70	0a15	0a5			
8	9.5mm a 2.36mm	0.375pulg a Nº8									100	85a100	10a30	0a10	0a5		
89	9.5mm a 1.18mm	0.375pulg a Nº16										100	90a100	25a55	5a30	0a10	0a5
9	4.75mm a 1.18mm	Nº4 a Nº16											100	85a100	10a40	0a10	0a5

6.2.2.2.4. *Peso específico y absorción de agregados Fino.*

Este ensayo se realizó de acuerdo a la normatividad siguiente:

- ❖ MTC E 205. Gravedad específica y absorción de agregados finos.
- ❖ NTP 400.022. Peso Específico y absorción del agregado Fino.
- ❖ ASTM C-128. Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate.



❖ AASHTO T-85. Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate.

Cálculos.

Peso específico de masa (Pe_m).

$$Pe_m = \frac{w_0}{V - V_a} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 6.5}$$

Donde.

Pe_m : Peso específico de masa.

w_0 := Peso en el aire de la muestra secada en el horno, g;

V := Volumen del frasco en cm³.

V_a : Peso en gramos o volumen en cm de agua añadida al frasco.

❖ Peso específico de masa saturado con superficie seca (Pe_{sss})

$$Pe_{sss} = \frac{500}{V - V_a} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 6.6}$$

❖ Peso específico aparente (Pe_a)

$$Pe_a = \frac{w_0}{(V - V_a) - (500 - W_0)} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 6.7}$$

❖ Absorción (Ab)

$$A_b = \frac{500 - W_0}{W_0} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 6.8}$$

6.2.2.2.5. *Peso específico y absorción de agregados gruesos.*

El objetivo es determinar el peso específico seco, el peso específico saturado con superficie seca, el peso específico aparente y la absorción (después de 24 horas) del agregado grueso. El peso específico saturado con superficie seca y la absorción están basadas en agregados remojados en agua después de 24 horas. Este modo operativo no es aplicable para agregados ligeros.

Una muestra de agregado se sumerge en agua por 24 horas aproximadamente para llenar los poros esencialmente. Luego se retira del agua, se seca el agua de la superficie de las partículas, y se pesa. La muestra se pesa posteriormente mientras es sumergida en agua.



Finalmente, la muestra es secada al horno y se pesa una tercera vez. Usando los pesos así obtenidos y fórmulas en este modo operativo, es posible calcular tres tipos de peso específico y de absorción.

Este ensayo se realizó de acuerdo a la normatividad siguiente:

- ❖ MTC E 206. Peso específico y absorción de agregados gruesos.
- ❖ NTP 400.021. Método de ensayo normalizado para peso específico y absorción del agregado grueso.
- ❖ ASTM C127-15. Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate.

Cálculos Peso Específico:

a) Peso Específico de masa.

$$Pe_m = \frac{A}{B-C} \cdot 100$$

Ecuación 6.9

Donde:

A: Peso de la muestra seca en el aire, gramos;

B: peso de la muestra saturada superficialmente seca en el aire, gramos;

C: peso en el agua de la muestra saturada.

b) Peso específico de masa saturada con superficie seca ($P_{e_{SSS}}$).

$$Pe_{SSS} = \frac{B}{B-C} \cdot 100$$

Ecuación 6.10

c) Peso específico aparente (Pe_a)

$$Pe_m = \frac{A}{A-C} \cdot 100$$

Ecuación 6.11

Peso específico aparente (Pe_a)

$$Pe_a = \frac{w_0}{(V-v_a)-(500-w_0)} \cdot 100$$

Ecuación 6.12

Absorción (Ab)

$$Ab(\%) = \frac{B-A}{A} \cdot 100$$

Ecuación 6.13

6.2.2.2.6. *Peso unitario y vacíos de los agregados.*



El objetivo es determinar el peso unitario suelto o compactado y el porcentaje de los vacíos de los agregados finos, gruesos o una mezcla de ambos.

El método se aplica a agregados de tamaño máximo nominal de 150 mm (6").

Se utiliza siempre para determinar el valor del peso unitario utilizado por algunos métodos de diseño de mezclas de concreto.

También se utiliza para determinar la relación masa/volumen para conversiones en acuerdos de compra donde se desconoce la relación entre el grado de compactación del agregado en una unidad de transporte o depósito de almacenamiento (que usualmente contienen humedad superficial absorbida) y los llevados a cabo por este ensayo que determina el peso unitario seco.

Este ensayo se realizó de acuerdo a la normatividad siguiente:

- ❖ MTC E 203. Peso unitario y vacíos de los agregados.
- ❖ NTP 400.017. Método de ensayo normalizado para determinar la masa por unidad de volumen o densidad ("Peso Unitario") y los vacíos en los agregados.
- ❖ ASTM C-29. Standard Test Method for Bulk Density (& liquor; Unit Weight& rdquo;) and Voids in Aggregate.

Para el cálculo del peso unitario de los agregados sea suelto o varillado se usa la formula siguiente:

$$PU = \frac{P_a}{V_p} \quad \text{Ecuación 6.14}$$

Donde:

PU = Peso unitario suelto o varillado

P_a = Diferencia del peso de la muestra más el proctor menos el peso proctor

V_p = Volumen del proctor utilizado

Los vacíos en los agregados pueden calcularse de la siguiente forma, empleando el peso unitario obtenido mediante apisonado, o simplemente mediante llenado a paladas.



$$\%vacios = \frac{(A \cdot W) - B}{A \cdot W}$$

Ecuación 6.15

Dónde:

A = Peso específico aparente o peso específico

B = Peso unitario de los agregados determinado

W = Peso unitario del agua 1000 kg/cm^3 .

6.2.2.2.7. Índice de aplanamiento y alargamiento de los agregados para carreteras.

El objetivo es determinar los índices de aplanamiento y de alargamiento, de los agregados que se van a emplear en la construcción del pavimento en estudio.

Este modo operativo se aplica a los agregados de origen natural o artificial, incluyendo los agregados ligeros y no es aplicable a los tamaños de partículas menores de 6.3 mm ($1/4''$) o mayores de 63 mm ($2 \frac{1}{2}''$).

En la **Tabla 6.10** y **Tabla 6.11** se muestran las dimensiones de los calibradores y el peso mínimo de material para ensayo de índice de aplanamiento y alargamiento respectivamente. Este ensayo se realizó de acuerdo a la normatividad siguiente:

- ❖ NTL - 354: Índice de lajas y agujas de los áridos para carreteras.
- ❖ MTC E 221 Índice de aplanamiento y alargamiento de los agregados para carreteras.



Tabla 6.10 Dimensiones de los calibradores para índice de aplanamiento y alargamiento.
Fuente: MTC E 221 Índice de aplanamiento y alargamiento de los agregados para carreteras.

Dimensiones de los calibradores grosor y longitud y peso mínimo para subdivisión de la fracción						
Tamices				Dimensiones del calibrador (mm)		Peso mínimo para subdivisión (kg)
Pasa		retiene		Aplanamiento	alargamiento	
mm	(pulg)	Mm	(pulg)	Abertura de la rotura ⁽²²⁾	Separación de la barra ⁽²³⁾	
63	(2 ½")	50	(2")	33.9	-----	50
50	(2 ")	37.5	(1 ½")	26.3	78.8	35
37.5	(1 ½")	25	(1")	18.8	56.3	15
25	(1 ")	19	(¾")	13.2	39.6	5
19	(¾")	12.5	(½")	9.5	28.4	2
12.5	(½")	9.5	(⅜")	6.6	19.8	1
9.5	(⅜")	6.3	(¼")	4.7	14.2	0.5

Tabla 6.11 Peso mínimo del material para ensayo de índice de aplanamiento y alargamiento.
Fuente: MTC E 221 Índice de aplanamiento y alargamiento de los agregados para carreteras.

Tamaño nominal del agregado (mm)		Peso mínimo del material para ensayo, tamaño de agregado entre 63,0 mm (2 ½") y 6,3 mm (¼") kg
mm	Pulg	Kg
50	(2)	35
40	(1 ½)	15
25	(1)	5
20	(¾)	2
12.5	(½)	1
10	(⅜)	0.5

Cálculos:

El índice de aplanamiento de cada fracción de ensayo se calcula, en tanto por ciento, mediante la relación entre el peso de las partículas, P_{ai} , que pasa a través de la correspondiente ranura y el peso inicial, P_i , de dicha fracción.

$$\text{índice de aplanamiento de la fracción } (I_{ai}) = \frac{P_{ai}}{P_i} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 6.16}$$

El índice de alargamiento de cada fracción de ensayo se calcula, en tanto por ciento, mediante la relación entre el peso de las partículas, P_{li} , retenidas entre las correspondientes barras y el peso inicial, P_i , de dicha fracción.

⁽²²⁾ Esta dimensión es igual a 0,6 veces el promedio de las aberturas de los tamices que definen la fracción.

⁽²³⁾ Esta dimensión es igual a 1,8 veces el promedio de las aberturas de los tamices que definen la fracción



$$\text{índice de aplanamiento de la fracción } (I_{ii}) = \frac{P_{ii}}{P_i} \cdot 100$$

Ecuación 6.17

Para expresar los índices de aplanamiento y alargamiento totales, se calcula el promedio ponderado de los respectivos índices de todas las fracciones ensayadas, empleando como factores de ponderación los porcentajes retenidos, R, de acuerdo con las siguientes fórmulas.

$$\text{Índice de aplanamiento } (I_a) = \frac{\sum (I_{ai} \cdot R_i)}{\sum R_i}$$

Ecuación 6.18

$$\text{Índice de alargamiento } (I_l) = \frac{\sum (I_{li} \cdot R_i)}{\sum R_i}$$

Ecuación 6.19

Donde:

I_a : Índice de aplanamiento de la fracción i

I_{li} : Índice de alargamiento de la fracción i

R_i : Porcentajes retenidos en cada fracción i

6.2.2.2.8. Abrasión los ángeles (l.a.) al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37,5 mm.

El objetivo es ensayar agregados gruesos de tamaños menores que 37,5 mm (1 ½") para determinar la resistencia a la degradación utilizando la Máquina de Los Ángeles.

Este Modo Operativo es una medida de la degradación de agregados minerales de gradaciones normalizadas resultantes de una combinación de acciones, las cuales incluyen abrasión o desgaste, impacto y trituración, en un tambor de acero en rotación que contiene un número especificado de esferas de acero, dependiendo de la gradación de la muestra de ensayo. Al rotar el tambor, la muestra y las bolas de acero son recogidas por una pestaña de acero transportándolas hasta que son arrojadas al lado opuesto del tambor, creando un efecto de trituración por impacto. Este ciclo es repetido mientras el tambor gira con su contenido. Luego de un número de revoluciones establecido, el agregado es retirado del tambor y tamizado para medir su degradación como porcentaje de pérdida. En la Tabla 6.13

Este ensayo se realizó de acuerdo a la normatividad siguiente:

- ❖ MTC E 207. Abrasión los Ángeles (l.a.) Al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37,5 mm (1 ½").



❖ NTP 400.019: Agregados. Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la degradación en agregados gruesos de tamaños menores por Abrasión e Impacto en la Máquina de Los Ángeles. La **Tabla 6.12** muestra las especificaciones del número de esferas y masa de carga del ensayo de Abrasión de los Ángeles.

Tabla 6.12 Numero de esferas y masa de la carga.

Fuente: MTC E 207. Abrasión los Ángeles (l.a.) Al desgaste de los agregados de tamaños menores de 37,5 mm (1 1/2").

Gradación	Nº de esferas	Masa de la carga (g)
A	12	5000 ± 25
B	11	4584 ± 25
C	8	3330 ± 20
D	6	2500 ± 15

6.2.3. Aditivo.

El aditivo usado fue ULMEN W-80, y la empresa ULMEN SA certifica que el producto cumple con las especificaciones de acuerdo a la norma, ULMEN W-80 es un plastificante y reductor de agua que cumple con los requisitos de uniformidad indicados en la norma ASTM C-949 / NTP 334.089 de acuerdo a los estándares de calidad. La **Tabla 6.13** muestra las especificaciones de acuerdo a la ASTM C 494 para uso del aditivo.

Tabla 6.13 Especificaciones de la norma ASTM C – 494 para uso de Aditivo.
Fuente: Elaboración Propia.

ENSAYO	ESPECIFICACIÓN NORMA ASTM C- 494
Densidad	1.05±0.02 (g/ml)
Viscosidad	14±2 (seg.)
pH	6±1

6.2.4. Agua.

El agua empleada fue de la fuente Santa Rosa (Distrito de San Sebastián), bombeable y recolectado en camiones cisternas para luego llevar al almacén de agua que se encuentra en la planta de premezclado.

Este ensayo se realizó de acuerdo a la normatividad siguiente:



- ❖ MTC E 728. Agua de mezcla utilizada en la producción de concreto de cemento Pórtland.
- ❖ ASTM C 1602/C 1602M-2004. Standard specification for mixing water used in the production of hydraulic cement concrete.
- ❖ NTP 339.088:2006. Agua de mezcla utilizada en la producción de concreto de cemento Pórtland. Requisitos.

Asi mismo se considerarán aptas para el mezclado del concreto el empleo de aguas no potables cuyas propiedades y contenidos en sustancias disueltas sean como máximo las que se muestran en la **Tabla 6.14** basados en la norma.

Tabla 6.14 Requisitos de agua para concreto

Fuente: MTC E 728. Agua de mezcla utilizada en la producción de concreto de cemento Pórtland.

Descripción	Manante vivo	Tolerancia máxima
pH	7.25	> 7
Cloruros ppm	53.60	300 ppm
Sulfatos ppm	1 34.20	300 ppm
Alcalinidad ppm NaHCO_3	180.00	1500 ppm
Materia Orgánica ppm	1.36	10 ppm
Sales Solubles totales ppm	579.20	1500 ppm

6.3. Elaboración del índice de Madurez.

En este apartado se expondrá la metodología para la obtención de Madurez que servirá de base para la calibración de la mezcla, que consiste en determinar la relación Resistencia-Madurez.

Como se explicó en el capítulo 3, sección 3.7.4 existen dos funciones de madurez, una se basa en la teoría de Arrhenius (edad equivalente) y la otra en la teoría de Nurse-Saúl (Factor-Temperatura-Tiempo). Esta investigación profundizara el estudio sobre las dos teorías utilizadas. Para elaborar el índice de madurez se utilizó el diseño de mezcla del concreto premezclado. Posteriormente el desarrollo del índice de madurez de la mezcla de concreto se



realizó en laboratorio, dos meses antes de la construcción del pavimento, con similitud de características y propiedades del concreto premezclado.

6.3.1. Elaboración del concreto.

La elaboración de la mezcla de concreto se realizó de acuerdo a la práctica estándar ASTM C 192, donde se indica la práctica normalizada para preparación y curado de especímenes de ensayo de concreto en laboratorio. En una mezcladora de 11 ft de capacidad, se mezclaron el agregado grueso con un tercio de agua durante 90 segundos, posteriormente se añadió el agregado fino, cemento y se mezcló durante 60 segundos, por último, se añadió el agua restante combinada con el aditivo y se mezcló durante dos minutos más; tras lo cual se procedió a la ejecución de los ensayos del concreto en estado fresco y a la elaboración de especímenes para ensayos en estado endurecido. La **Figura 6.3** muestra la elaboración del concreto y en la **Figura 6.4** se muestra los especímenes de concreto elaborados.



Figura 6.3 Elaboración del concreto
Fuente: Elaboración Propia



Figura 6.4 Elaboración de vigas y cilindros de concreto.
Fuente: Elaboración Propia



6.3.1.1. Fabricación de cilindros de Concreto.

De acuerdo al procedimiento descrito en la ASTM C-192 y MTC E 702 se fabricaron cilindros de concreto usando moldes de 150 mm de diámetro por 300 mm de alto.

Se colocó el concreto con la ayuda de un palustre en tres capas del mismo volumen, se apisono cada capa con la parte redondeada de la varilla con 25 golpes y se dieron golpes laterales con un martillo de goma posteriormente se aliso la cara superior, la **Figura 6.5** muestra el cilindro a usar.



Figura 6.5 Fabricación de cilindros de concreto.
Fuente: Elaboración Propia

Los moldes de los cilindros de concreto pasado las 24 horas se procedieron a retirar e introducirlos en agua hasta su edad de falla.

Tipo de Mezcla	N° de cilindros
Pavimento rígido $f'_c = 245 \text{ kg/cm}^2$	44

6.3.1.2. Fabricación de vigas de Concreto.

Siguiendo el procedimiento descrito en la ASTM C-192, para la fabricación de las vigas se usaron moldes rectangulares estándar (con un largo de 540 mm, un alto de 150mm por 150 mm de ancho). Se colocó el concreto con la ayuda de un palustre en dos capas del mismo volumen, se apisono cada capa con la parte redondeada de la varilla con 55 golpes y se dieron golpes laterales con un martillo de goma posteriormente se aliso la cara superior.

A las 24 horas se procedió a retirar los moldes y se introdujeron las vigas en agua, en la cámara de curado hasta su edad de falla. La cantidad de vigas fabricados se muestra en la

Tipo de Mezcla	N° de vigas
Pavimento rígido MR= 36 kg/cm^2	17



6.3.1.3. Curado de especímenes de concreto.

Después de la fabricación, los especímenes de concreto se mantuvieron en sus respectivos moldes durante las primeras 24 horas, protegidos de la intemperie manteniéndose a temperatura ambiente de laboratorio, después de 24 horas, los especímenes se desmoldaron y fueron introducidos en la cámara de curado a temperaturas de agua expuestas a la intemperie (temperaturas con controladas).

Para la resistencia a flexión las vigas de concreto estuvieron sumergidos a edades de dos, cuatro, seis, 13, 20, 27 y 31 días. Para la resistencia a compresión los cilindros de concreto estuvieron sumergidos a edades de uno, dos, tres, cuatro, cinco, seis, 13, 20, 27, 31, 41, 50, 55 y 69 días, durante los 70 días de estudio de acuerdo a su edad de falla.

6.3.2. Instrumentación con sensores de Temperatura a especímenes de concreto.

Con el fin de construir la relación índice de madurez y resistencia, se registró por medio del equipo de madurez, la temperatura de vigas y cilindros de concreto; dichos especímenes fueron sometidos a esfuerzos a flexión y compresión para cuantificar la resistencia en base al procedimiento descrito en el ítem 3.10. Una vez elaborado los especímenes de concreto y encontrándose en estado fresco se introdujo el sensor de temperatura (ver **Figura 6.6**, termocuplas), en el centro del espécimen de concreto preparado, con el fin de registrar datos del historial de temperatura y posteriormente construir la relación índice de madurez y resistencia.



Figura 6.6 Introducción de sensor de temperatura en Cilindro de concreto.
Fuente: Elaboración Propia



6.3.3. Concreto en estado fresco.

En este ítem se describen los ensayos de muestreo y clase de concreto fresco.

6.3.3.1. Muestreo y clase de concreto fresco.

Para la selección del número diario de muestras de ensayo del concreto fresco a ser tomadas, se considerará como "clase de concreto" a:

- ❖ Las muestras de concreto deberán ser obtenidas de acuerdo a lo indicado en las especificaciones de la Norma ASTM C 172 - NTP 339.036.
- ❖ La muestra deberá ser empleada dentro de los 15 minutos siguientes a ser tomada, debiendo durante este periodo estar protegida de la acción de cualquier agente atmosférico que puede causar la evaporación del agua de la misma.

Este ensayo se realizó de acuerdo a la normatividad siguiente:

- ❖ MTC E 701. Toma de muestras de concreto fresco.
- ❖ NTP 339.036. Práctica normalizada para muestreo de mezclas de concreto fresco.
- ❖ ASTM C 172. Standard Practices for Sampling Freshly Mixed Concrete.
- ❖ AASHTO T 141. Standard Method of Test for Sampling Freshly Mixed Concrete.

Los ensayos de concreto deberán incluir los mencionados en la **Tabla 6.15**.

Tabla 6.15 Resumen de Normatividad de ensayos del concreto en estado fresco.
Fuente: elaboración propia

Nombre de ensayo	Norma
Ensayo de temperatura del concreto fresco	MTC E 724, NTP 339.184 y ASTM C 1064
Asentamiento o Slump	MTC E 705, ASTM C 143, NTP 339.035 y AASHTO
Peso unitario y Rendimiento	MTC E 714, NTP 339.046, ASTM C-138 y AASHTO T 121
Contenido de aire de concreto fresco	MTC E 706, NTP 339.083, ASTM C 231 y AASHTO T 152



Nota: Los resultados de estos ensayos no pretenden pronosticar la calidad del concreto en la estructura ya que existen variables que van más allá del control del producto final del concreto.

6.3.3.2. Determinación de la temperatura del concreto fresco.

La temperatura del concreto depende del aporte calorífico de cada uno de sus componentes, además del calor liberado por la hidratación del cemento, la energía de mezclado y el medio ambiente.

Se determinó la temperatura del concreto fresco para verificar el cumplimiento de los requerimientos especificados.

Este ensayo se realizó de acuerdo a la normatividad siguiente:

- ❖ MTC E 724. Método de ensayo normalizado para determinar la temperatura de mezclas de concreto.
- ❖ NTP 339.184. Método de ensayo normalizado para determinar la temperatura de mezclas de concreto.
- ❖ ASTM C 1064. Temperature of Freshly Mixed. Hydraulic-Cement Concrete.

No hay un método estandarizado para medir la temperatura del concreto fresco. Si las especificaciones de obra fijan límites para la misma, podrá emplearse termómetros especialmente diseñados para esta finalidad, o calcularse a partir de la temperatura de los ingredientes de la mezcla. la **Tabla 6.16** muestra criterios de aceptación de temperatura.

Tabla 6.16 Criterios de aceptación de temperaturas.
Fuente: MTC E 724. Método de ensayo normalizado para determinar la temperatura de mezclas de concreto.

Descripción	Criterio de aceptación ASTM C94/C 94M-07-NTP339.				
	Sección mm.	<300	300-900	900-1800	>1800
Clima frío	Temperatura mínima (°C)	13	10	7	5
	Temperatura máxima (°C)	32			
Clima cálido	T = Más baja posible. Si T ≈ 32 °C se puede encontrar dificultades				



6.3.3.3. Asentamiento o Slump.

Este ensayo se realizó de acuerdo a la normatividad siguiente:

- ❖ MTC E 705. Asentamiento del concreto (Slump).
- ❖ ASTM C 143. Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete.
- ❖ NTP 339.035. Método de ensayo para la medición del asentamiento del concreto de cemento Pórtland.
- ❖ AASHTO: T 119M. Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete.

La **Tabla 6.17** muestra especificaciones para el asentamiento de acuerdo a la NTP 339.114 y la **Tabla 6.18** muestra los equipos a utilizarse para el asentamiento.

Tabla 6.17 Especificaciones de la NTP 339.114 para asentamiento.
Fuente: MTC E 705. Asentamiento del concreto (slump).

Especificaciones	Tolerancias ASTM 94/C 94M NTP339.114
Asentamiento nominal	$<2''$ (50mm) $\pm 1/2''$ (15mm) $2'' - 4''$ (50-100mm) $\pm 1''$ (25mm) $>4''$ (100mm.) $\pm 1 1/2''$ (40mm)
Asentamiento "máximo" o "no debe exceder".	3'' (75 mm) o menos En exceso 0'' (0 mm) En defecto 1 1/2'' (40 mm)
	más que 3'' (75 mm) En exceso 0'' (0 mm) En defecto 2 1/2'' (65 mm)
Tiempo de conservación en estos rangos (responsabilidad del productor)	30 min desde llegada a obra

Tabla 6.18 Equipos utilizados para el asentamiento:
Fuente: MTC E 705. Asentamiento del concreto (slump).

Equipo	Especificaciones	Tolerancias ASTM 94/C 94M NTP339.114
Cono de Abrams	\emptyset inferior	200 mm
	\emptyset superior	100 mm
	Altura	300mm
	Tolerancia	± 3 mm
	Espesor minino	1.5 mm, 1.15 mm repujado
Barra compactadora	Barra de acero liso con punta semiesférica	$\emptyset 5/8''$ (16 mm) x 24'' (600 mm)
Instrumento de medida	Regla de metal rígido (flexómetro)	Long ≥ 12 ", divisiones de 1/4'' (5 mm)
Herramientas pequeñas	Cucharón pequeño, Placa para prueba de revenimiento (50 cm x 50cm)	



6.3.3.4. *Peso unitario y rendimiento.*

Este ensayo se realizó de acuerdo a la normatividad siguiente:

- ❖ MTC E 714. Peso unitario de producción (rendimiento) y contenido de aire (gravimétrico).
- ❖ NTP 339.046. Método de ensayo gravimétrico para determinar el peso por metro cúbico, rendimiento y contenido de aire del concreto.
- ❖ ASTM C-138. Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete.
- ❖ AASHTO T 121. Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete.

En la **Tabla 6.19** se muestra las especificaciones y tolerancias para el peso unitario

Tabla 6.19 especificaciones y tolerancias para peso unitario
Fuente: MTC E 714. Peso unitario de producción (rendimiento) y contenido de aire (gravimétrico).

Equipo	Especificaciones y Tolerancias ASTM 94/C 94M NTP339.114
Balanza	Exactitud 45 g. o dentro del 3% de prueba.
Varilla o vibrador	Varilla de Ø 5/8" (16 mm) x 24" (600mm)
Recipiente cilíndrico	Capacidad de acuerdo a TM
Placa de Enrasado	Espesor $\geq 1/4"$ (6mm), Largo y ancho Ø recipiente + 2"
Mazo de goma	

Peso unitario: Calcúlese el peso neto del concreto en kilogramos o libras, sustrayéndose el peso del medidor del peso total de medidor más concreto. Calcule el peso unitario, multiplicando el peso neto por el factor de calibración para el medidor usado.

$$PU_c = \frac{P_c}{V_r} \tag{Ecuación 6.20}$$

PU_c = Peso unitario del concreto, en kg

P_c = Peso de recipiente más el concreto menos el peso del recipiente, en kg

V_r = Volumen del recipiente, en m³

Peso total de la tanda: Es la relación entre el peso real del concreto obtenido y el volumen tal como fue diseñado para la bachada, calculado como sigue:



$$PPT = \frac{P_m}{V_d}$$

Ecuación 6.21

PPT = Peso total de la tanda para un m^3 ; (kg).

P_m = Peso real del concreto en kg.

V_d = Volumen total para el cual fue diseñado en m^3 .

Rendimiento: Es la relación entre el volumen real del concreto obtenido y el volumen tal como fue diseñado para la bachada, calculado como sigue:

$$R = \frac{PTT}{PU_c}$$

Ecuación 6.22

R = Rendimiento del concreto.

Un valor de R superior a 1.00 indica un exceso del concreto que está siendo producido mientras que el valor menor lo contrario.

6.3.3.5. *Contenido de aire en el concreto fresco.*

Este ensayo se realizó de acuerdo a la normatividad siguiente:

- ❖ MTC E 706. Contenido de aire en el concreto fresco método de presión
- ❖ NTP 339.083. Método de ensayo normalizado para contenido del aire de mezcla de concreto fresco por el método de presión.
- ❖ ASTM C 231. Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method.
- ❖ AASHTO T 152. Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method.

Equipo:

- ❖ Recipiente de acero
- ❖ Cubierta de ensamble con manómetro
- ❖ Pipeta y recipiente para agua
- ❖ Franela



❖ Regla de acero.

En la **Figura 6.7** se muestra las partes de la Olla de Washington.

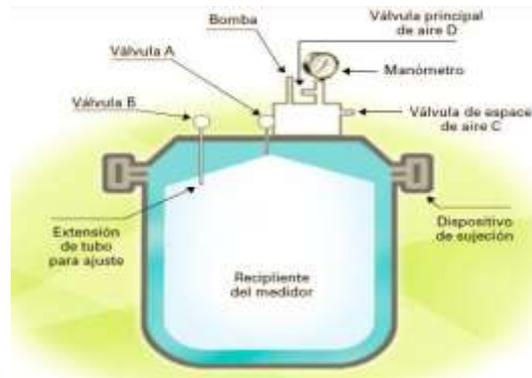


Figura 6.7 Olla de Washington.

Fuente: MTC E 706. Contenido de aire en el concreto fresco método de presión.

Donde: Válvula A de purga de agua, Válvula B para escape de aire del recipiente, Válvula C de escape de aire en la cámara de presión, para ajuste del manómetro, Válvula D para paso de aire de la cámara de presión al recipiente (válvula principal de aire).

6.3.4. Concreto en estado endurecido.

En este apartado se describen los ensayos utilizados para caracterizar las principales propiedades mecánicas del concreto como la resistencia a compresión y resistencia a la flexión

Los ensayos se realizaron para cada tipo de especímenes en estudio y se programaron ensayos de control de calidad a diferentes edades de estudio.

6.3.4.1. *Ensayo de Resistencia a la Compresión de Cilindros de Concreto.*

Los ensayos de resistencia a compresión se realizaron según la norma ASTM C39 / C39M como se muestra en la **Figura 6.8**, se utilizaron probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura, se retiraron del baño de agua de la cámara de curado horas antes a ser ensayados. Se ensayaron dos cilindros por cada edad y en algunos casos tres (de acuerdo a la dispersión). Las edades de falla fueron: uno, dos, tres, cuatro, cinco, seis, siete, 14, 21, 28, 32, 42, 49, 56 y 70 días.



Figura 6.8 Ensayo de Resistencia a compresion .
Fuente :Elaboracion propia.

6.3.4.2. Ensayo Flexión en Vigas.

Para determinar la resistencia a la flexión del concreto se siguió el procedimiento descrito en la norma ASTM C 78 -10 y MTC E 709 se utilizaron vigas de 500 mm de largo, por 150 mm de alto y por 150 mm de ancho. Se colocó la viga como se muestra en la **Figura 6.9**. Las edades de falla fueron: uno, tres, cinco, siete, 14, 21, 28 y 32 días.

Se aplicó la carga de forma constante en los tercios de la luz de la viga, esto se hizo hasta el momento que ocurrió la rotura de la viga, como se muestra en la **Figura 6.9**.

El módulo de rotura se calcula de acuerdo a la ecuación siguiente. Si la falla se da en el tercio medio de la luz libre ASTM C-78.

$$\diamond R = \frac{P \cdot l}{b \cdot d^2} \tag{Ecuación 6.23}$$

Donde:

R: Módulo de rotura (MPa).

P: Carga máxima (KN).

l: Longitud libre entre apoyos (m).

b: Ancho promedio de las muestras (m).

d: altura promedio de la muestra (m).

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

$$R = \frac{3 \cdot P \cdot a}{b \cdot d^2} \tag{Ecuación 6.24}$$

Donde:

R: Módulo de rotura (MPa).



P: Carga máxima (KN).

l: Longitud libre entre apoyos (m).

a: Distancia promedio entre la línea de fractura y el soporte más cercano, medida sobre la zona de tensión de la viga (m).

b: Ancho promedio de las muestras (m)



Figura 6.9 Ensayo de Resistencia a flexión .
Fuente :Elaboracion propia.

6.3.4.3. *Módulo de Elasticidad Estático por compresión simple.*

Con el fin de determinar el módulo de elasticidad los ensayos se realizaron según la norma ASTM C 469 como se muestra en la **Figura 6.10**, se utilizaron probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura, se retiraron del baño de agua de la cámara de curado horas antes a ser ensayados. Se ensayaron dos cilindros por cada edad y en algunos casos tres (de acuerdo a la dispersión). Las edades de falla fueron: uno, dos, tres, cuatro, cinco, seis, siete, 14, 21, 28, 32, 42, 49, 56 y 70 días.

El ensayo consistió en conectar un dispositivo que mide la deformación del cilindro a medida que este está sometido a carga como se muestra en la **Figura 6.10**. Los ensayos se realizaron en la máquina universal que además registra las cargas y deformaciones por medio del software instalado, las cuales fueron de gran aporte para el estudio pues se pudo comparar los resultados de deformación de la maquina universal con los resultados del extensómetro y validar dichos resultados en el presente estudio.



Figura 6.10 Montaje ensayo de módulo de elasticidad en cilindros de concreto.
Fuente :Elaboracion propia.

Los cálculos de módulo de elasticidad se realizaron con las recomendaciones que indica la norma ASTM C-469-87, como se muestra a continuación:

$$E = \frac{(0.4 f_c - f_{c(0.00005)})}{(\epsilon_{(0.4 f_c)} - 0.00005)} \quad \text{Ecuación 6.25}$$

Donde:

E = módulo de elasticidad del concreto, en kg/cm^2

$0.4 f_c =$: 40% de la resistencia a la compresión, en kg/cm^2 .

$f_{c(0.00005)} =$: Resistencia a la compresión en la deformación unitaria 0.00005, en kg/cm^2

$\epsilon_{(0.4 f_c)} =$: Deformación unitaria al 40% de la resistencia a compresión, unidad adimensional.

Adicionalmente al registro de cargas, se procedió con los registros de carga y deformación por medio de la maquina universal, la cual posee un software que representa la gráfica como se ve a continuación ver **Figura 6.11**.

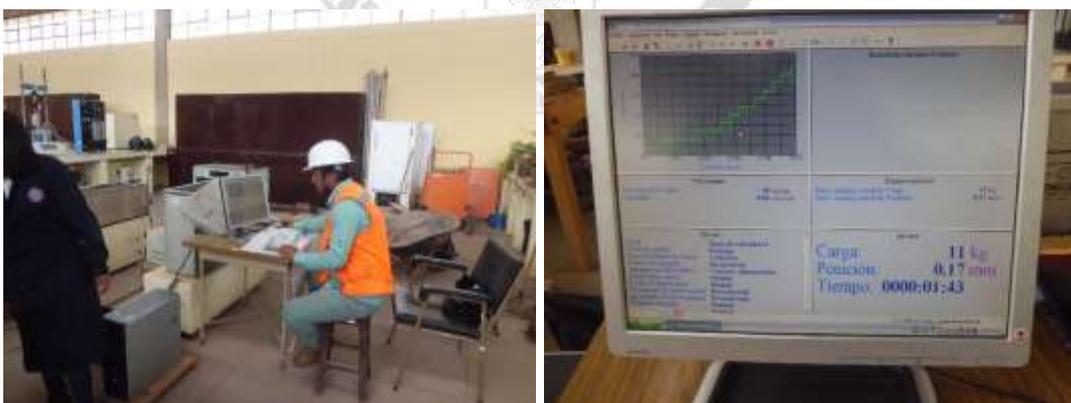


Figura 6.11 módulo de elasticidad en cilindros de concreto.
Fuente :Elaboracion propia.



CAPITULO 7. RESULTADOS.

En el presente capítulo se presentan los resultados para la elaboración del índice de madurez descritas en el capítulo 6. Los resultados están clasificados en secciones que corresponden a los diferentes ensayos realizados.

En el apartado 7.1 se muestran los resultados de los ensayos realizados de caracterización de los componentes del concreto en estudio. Los ensayos realizados buscan establecer un control de calidad de materias primas y su efecto en las principales propiedades mecánicas del concreto.

En el apartado 7.2 se presentan resultados de los ensayos del concreto en estado fresco y resultado de las propiedades mecánicas del concreto en estado endurecido, correspondiente a los ensayos de resistencia a compresión y flexión.

En el apartado 7.3 se presentan resultados de la temperatura interna de los especímenes de concreto, donde se muestran perfiles térmicos de vigas y cilindros de concreto.

Por último, en el apartado 7.4 se presentan resultados del índice de madurez relacionados con el historial de temperatura y valores de resistencia mecánica del concreto.

7.1. Características de Materias Primas.

7.1.1. Cemento.

El cemento usado para el diseño de mezcla es Cemento Pórtland de alta resistencia Tipo HE, producido por cemento Yura Arequipa. En la **Tabla 7.1** se presentan las características físicas, en la **Tabla 7.2** las características físicas y en la **Tabla 7.3** los resultados de las propiedades mecánicas del cemento Pórtland de alta resistencia tipo HE. Estos parámetros fueron obtenidos de la empresa proveedora, en el anexo A 1 se muestra el certificado de calidad del cemento Pórtland tipo HE, con los requerimientos químicos, físicos y mecánicos de acuerdo a la NTP 334.082 y ASTM C 1187.



Tabla 7.1 Resultados de características físicas del cemento Pórtland de alta resistencia tipo HE.

Fuente: Elaboración Propia.

Requisitos Físicos	Requisitos norma Técnica NTP 334.082 ASTM 1157	Cemento Pórtland tipo HE	Requisitos norma Técnica Cemento Tipo I NTP 334.082/ASTM C 150
Peso Específico (g/cm^3)	No especifica	2.89	No especifica
Superficie específica Blaine (cm^2/g)	-	4400	2600 mínimo
Expansión en Autoclave (%)	0.80 Máximo	0.01	0.80 Máximo
Fraguado Vicat Inicial (minutos)	45 mínimo	182	45 Mínimo
Fraguado Vicat final (minutos)	420 máximo	224	420 Máximo
Contenido aire mortero (%)	-	3.44	12.00 Máximo

Tabla 7.2 Resultados de características químicas del cemento Pórtland de alta resistencia tipo HE.

Fuente: Elaboración Propia.

Requisitos Químicos	Requisitos norma Técnica NTP 334.082 ASTM 1157	Cemento Pórtland tipo HE	Requisitos norma Técnica Cemento Tipo I NTP 334.082/ASTM C 150
Oxido de Magnesio, MgO (%)	No especifica	2.13	6 Máximo
Trióxido de Azufre, SO_3 (%)	No especifica	2.20	3 Máximo
Perdida por ignición o al Fuego, P.F (%)	No especifica	2.49	3 Máximo

Tabla 7.3 Resultados de propiedades mecánicas del cemento Pórtland de alta resistencia tipo HE.

Fuente: Elaboración Propia

Requisitos Mecánicos	Requisitos norma Técnica NTP 334.082 ASTM 1157		Cemento Pórtland tipo HE		Requisitos norma Técnica Cemento Tipo I NTP 334.082/ASTM C 150	
	Kg-f/cm ²	MPa	Kg-f/cm ²	MPa	Kg-f/cm ²	MPa
Resistencia a la Compresión						
1 día	122	12	135-145	13.2-14.20	-	-
3 días	245	24	252-272	24.7-26.67	122	12
7 días	-	-	306-366	30.3-35.90	194	19
28 días	-	-	410-435	40.2-42.70	-	-

7.1.2. Elementos pétreos.

Se han realizado estudios de las propiedades de los agregados utilizados, en este ítem se muestran los resultados de análisis químico y análisis físico mecánico de los agregados utilizados. Así mismo los ensayos y cálculos se basaron en procedimientos metodológicos descritos en el ítem 6.2.2 (con su respectiva norma), los datos obtenidos del ensayo en laboratorio se muestran en el anexo A y anexo B.



7.1.2.1. Análisis físico-químico.

Estos resultados se han desarrollado de acuerdo a la norma que se presenta en la Tabla 6.4 *normas de análisis físico-químicos de los elementos pétreos* que se presentan en el ítem 6.2.2.1. En la **Tabla 7.4** se muestra el resumen de los resultados del análisis químico de los elementos pétreos (agregado grueso y fino). Así mismo, en el anexo A 2 se presenta el informe de análisis fisicoquímico del agregado de la cantera Sertraq y en el anexo A 3 se muestra en análisis fisicoquímico del agregado de la cantera Abrill.

Tabla 7.4 Análisis químico de elementos pétreo.
Fuente: Elaboración Propia.

Descripción	Tipo de agregado		Normas	Requisito A. Grueso	Requisito Afino
	Cantera Abrill	Cantera Sertraq			
	Agregado grueso	Agregado fino			
Sales Solubles totales (ppm)	1630	3328	ASTM D-516 y MTC E 219	-	-
pH	7.80	7.50	ASTM D-512 y MTC E 718	-	-
Carbonatos %	4.20	7.22	ASTM D-512	-	-
Materia Orgánica %	0.06	0.28	ASTM D-512 y MTC E 212	3% max.	3% máx.
Sulfatos %	0.05	0.07	ASTM D-1293 y MTC E 719	1.0% máx.	1.2% máx.
Cloruros %	0.01	0.01	ASTM D-1293 y MTC E 720	0.10 % máx.	0.10 % máx.
Durabilidad (48h/MgSO4) %	1.20	0.94	ASTM C-88, NTP 400.16 y MTC E 209	18%	15%

7.1.2.1. Análisis físico mecánico.

7.1.2.1.1. Agregado fino.

Las propiedades analizadas para el agregado fino fueron: el tipo de agregado, contenido de humedad, porcentaje de finos, módulo de fineza, peso específico, capacidad de absorción, peso unitario sueltos y porcentaje de vacíos sueltos para los agregados finos, el resumen de las características físico-mecánicas del agregado fino se presentan en la **Tabla 7.5**, el



procedimiento se realizó en base al ítem 6.2.2, donde se utilizó la Tabla 5.6 Normatividad de las propiedades físico-mecánicas para cada uno de los ensayos respectivamente.

Tabla 7.5 Resumen de características físico-mecánicas de agregado fino.
Fuente: Elaboración Propia.

AGREGADO	FINO 01	FINO 02	Requisitos
CANTERA	ABRILL(Confitillo)	SERTRAQ (Arena Fina)	
Tipo de Agregado	Arena Gruesa	Arena Media	-
Contenido de Humedad	8.95%	5.20%	-
Porcentaje de Finos	4.52%	17.89%	-
Módulo de Fineza	4.52	2.61	2.3-3.1
Peso Específico	2.71 gr/cm3	2.52 gr/cm3	
Capacidad de absorción	1.47%	3.64%	4% Max.
Peso Unitario Suelto	1702.74 Kg/m3	1823.3 Kg/m3	
Porcentaje de Vacíos Suelto	37.20%	27.77%	

La **Figura 7.1** muestra el análisis granulométrico de la mezcla de agregado fino 01 y el agregado fino 02, la proporción de mezclado de los agregados finos son de acuerdo al diseño de mezcla de la empresa de premezclado. El cálculo del módulo de fineza es de 2.75, resultado de la corrección del agregado fino mediante la mezcla de 92.46% de arena fina de Sertraq y 7.54% de arena gruesa de Abrill.

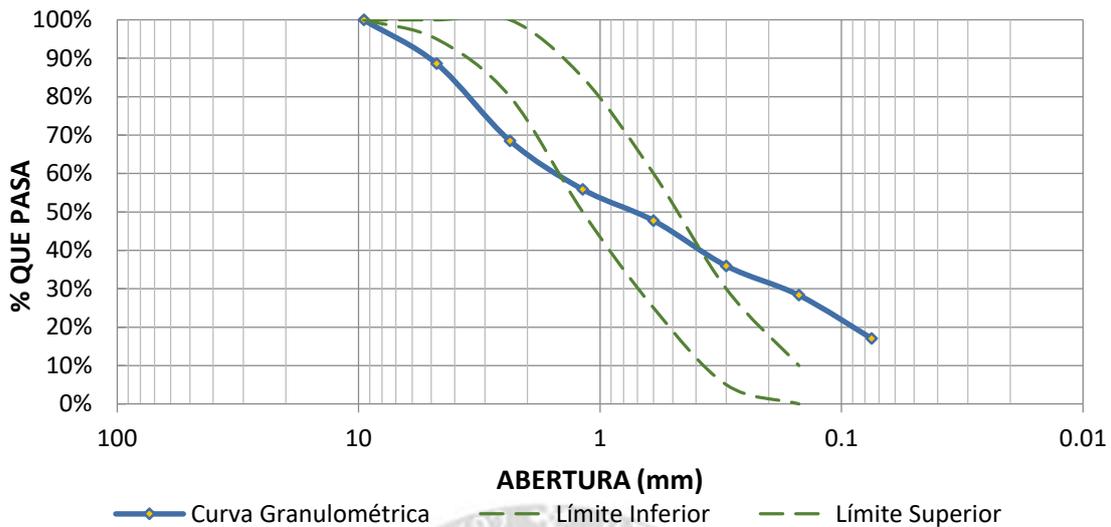


Figura 7.1 Curva Granulométrica de la mezcla de agregado fino.
Fuente: Elaboración Propia.

En la **Figura 7.1**. Se observa que el agregado fino resultante de la corrección no cumple con los límites estipulados por el reglamento ASTM C -33, con módulo de fineza aceptable **2.75** (arena Media), y porcentaje de finos para Fino 01 de 4.52% y para Fino 02 de 17.89% siendo no apto para la elaboración del concreto, de acuerdo a lo que recomienda Rivva Lopez (2015), inferior al 5 % recomendable para concretos convencionales y menor al 3 % utilizado para concretos sujetos a abrasión.

7.1.2.1.1. Agregado Grueso.

Las características analizadas para el agregado grueso fueron: el tipo de agregado, contenido de humedad, porcentaje de finos, tamaño máximo absoluto, tamaño máximo nominal, módulo de fineza, peso específico, capacidad de absorción, peso unitario varillado, porcentaje de vacíos varillado, peso unitario sueltos, porcentaje de vacíos sueltos, índice de alargamiento, índice de aplanamiento y porcentaje de Abrasión para los agregados gruesos, el resumen de la caracterización para el agregado grueso se muestra en la **Tabla 7.6**.



Tabla 7.6 Resumen de características físico-mecánicas de agregado grueso.
Fuente: Elaboración Propia.

AGREGADO	GRUESO 01	GRUESO 02	Requisitos
CANTERA	ABRILL (Piedra Chancada de 3/4")	ABRILL (Piedra Chancada de 1/2")	_____
Tipo de Agregado	Anguloso	Anguloso	-
Contenido de Humedad	0.51%	1.10%	-
Porcentaje de Finos	0.31%	0.34%	1%
Tamaño Máximo Absoluto	2"	1"	-
Tamaño Máximo Nominal	1"	3/4"	-
Módulo de Fineza	7.94	7.02	-
Peso Específico	2.66 gr/cm3	2.66 gr/cm3	-
Capacidad de absorción	1.26%	1.12%	-
Peso Unitario Varillado	1584.14 Kg/m3	1594.30 Kg/m3	-
Porcentaje de Vacíos Varillado	40.52%	40.14%	-
Peso Unitario Suelto	1414.71 Kg/m3	1419.79 Kg/m3	-
Porcentaje de Vacíos Suelto	46.89%	46.69%	-
Índice de Aplanamiento	16.82%	6.30%	-
Índice de Alargamiento	22.72%	17.84%	-
% De Abrasión	21.20%		40% max.

La **Figura 7.2** muestra los datos obtenidos en laboratorio del análisis granulométrico de la mezcla de los agregados gruesos de acuerdo a los rangos recomendables estipulados por la Norma ASTM C -33, el cálculo del módulo de fineza resultado de la corrección del agregado grueso mediante la mezcla con un 30 % de agregado Grueso 01 y 70 % de agregado grueso 02, presenta un tamaño máximo absoluto de 2", tamaño máximo nominal de 1" y módulo de fineza de 7.29. En la **Figura 7.2** se presenta la granulométrica de la mezcla de agregados gruesos, se puede observar que el agregado grueso resultante de la corrección cumple aceptablemente los límites recomendables estipulados por el reglamento ASTM C -33.

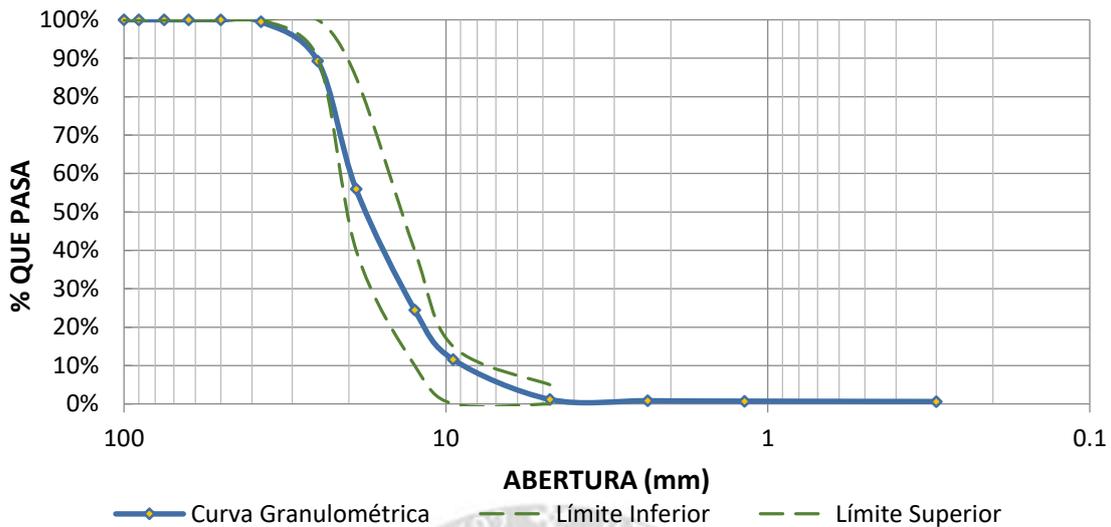


Figura 7.2 Curva Granulométrica de la mezcla de agregados gruesos. Fuente: Elaboración Propia.

En la **Figura 7.2** se observa que el agregado grueso resultante de la mezcla cumple con los límites recomendables estipulados por el reglamento ASTM C -33, con un módulo de fineza **7.29**, y porcentaje de finos de Grueso 01 de 0.31% y para Grueso 02 de 0.34% siendo apto para la elaboración del concreto, de acuerdo a lo que recomienda Rivva Lopez (2015) , ya que es inferior al 5 % recomendable para concretos convencionales y menor al 3 % utilizado para concretos sujetos a abrasión.

7.1.3. Aditivo.

El aditivo químico empleado en las campañas experimentales corresponde a un aditivo poli funcional en base a nano sílices Las especificaciones del lote se muestra en la **Tabla 7.7** y las condiciones de uso del aditivo se muestran en la **Tabla 7.8** brindadas por el fabricante.

Tabla 7.7 Características del aditivo. Fuente: ULMEN SA.

Producto	W-80
Lote	6380816
Fabricado	04/08/2016
Vence	Febrero / 2017



Tabla 7.8 Especificaciones del Aditivo.
Fuente: ULMEN SA.

ENSAYO	ESPECIFICACIÓN NORMA ASTM C- 494	RESULTADO
Densidad	1.05±0.02 (g/ml)	1.053
Viscosidad	14±2 (seg.)	15.34 seg.
pH	6±1	6.4

7.1.4. Agua.

Se han realizado estudios de las propiedades del agua, en este ítem se muestran los resultados de análisis químico. Los resultados cumplen con los requisitos de la norma NTP 339.088. En la **Tabla 7.9** se muestra el resumen de los resultados del análisis físico-químico del agua y en el *Anexo A 5 se presenta el Informe de análisis Físicoquímico del agua.*

Tabla 7.9 Resultado análisis fisicoquímico del agua.
Fuente: Elaboración Propia.

Descripción	Planta de producción de concreto Conarena	Tolerancia máxima
pH	7.10	> 7
Cloruros ppm	225	300 ppm
Sulfatos ppm	568.90	300 ppm
Carbonatos ppm	0	
Alcalinidad ppm NaHCO3	362.30	1500 ppm
Materia Orgánica ppm	3.42	10 ppm
Sales Solubles totales ppm	1562.80	1500 ppm
Solidos totales ppm	214.10	
Turbiedad NTU	6.22	

7.2. Elaboración del concreto.

7.2.1. Diseño de mezcla.

El diseño de la mezcla utilizada corresponde a un concreto de fabricación comercial cuya resistencia nominal es de $f'_c = 245 \text{ Kg/cm}^2$, con relación nominal agua/cemento (a/c) de 0,65 y tamaño máximo del agregado de 1" de origen ígneo. La dosificación utilizada se muestra en la **Tabla 7.10**, para unidades de kg/m^3 (peso) así como sus correspondientes porcentajes en peso de cada material utilizado. El contenido de agua en esta tabla corresponde al contenido



total corregido de agua que considera el agua necesaria para el mezclado e hidratación (agua libre) y el agua de absorción de los agregados.

Para cumplir con el número de ensayos requeridos para las diferentes edades en estudio, se elaboraron un m^3 de concreto distribuidos en cuatro batchadas.

Tabla 7.10 Resumen de diseño de mezcla de planta concretora [Peso por un metro cubico de concreto Fuente: Elaboración Propia.

Diseño de Mezcla	Cemento		A/C	Arena		Grava		Aditivo	
	Cemento	Kg/m ³		Arena gruesa (Kg)	Arena fina (Kg)	Piedra ¾ (Kg)	Piedra ½ (Kg)	Aditivo	1.6 % de cemento (Lt)
M1 ⁽²⁴⁾	Pórtland tipo HE	285	0.649	317.18	752.83	492.40	373	Aditivo Ulmen W-80	4.56

Cabe mencionar que la elaboración del índice de madurez, se realizara con el diseño de mezcla M1 presentada en la **Tabla 7.10**.

7.2.2. Determinación de la Resistencia Promedio Requerida.

La empresa de premezclado CONARENA SAC. Para el diseño de mezclas tiene una desviación estándar de 30 kg/cm^2 , y aplicando las ecuaciones del ACI se tiene la resistencia promedio de diseño:

$$f'_{cr} = f'_c + 1.34\sigma$$

$$f'_{cr} = f'_c + 2.33\sigma - 35$$

Ecuación 7.1

Ecuación 7.2

Sustituimos

$$f'_{cr} = 245 + 1.34 * 30 = 285.2$$

$$f'_{cr} = 245 + 2.33 * 30 - 35 = 279.9$$

De acuerdo a lo anterior seleccionamos el mayor valor obtenido $f'_{cr} = 285.2$

²⁴ Diseño de mezcla utilizado por la empresa de premezclado CONARENA



En la **Tabla 7.11** se presenta dos diseño de mezcla con gradación continua sin aditivo denominado como M2 y diseño de mezcla con gradación continua con aditivo denominado como M3.

Tabla 7.11 Resumen de diseño de mezcla.
Fuente: Elaboración Propia.

Diseño de Mezcla	Cemento		A/C	Arena	Grava	Aditivo	
	Cemento	Kg/m ³		Arena Con gradación continua (Kg)	Grava Con gradación continua (Kg)	aditivo	1.6 % de cemento, (Lt)
M2 ⁽²⁵⁾	Pórtland tipo HE	285	0.677	832.37	996.41	Sin aditivo	0.00
M3 ⁽²⁶⁾	Pórtland tipo HE	285	0.649	836.78	1001.69	Aditivo Ulmen W-80	4.56

7.2.3. Concreto en estado fresco.

7.2.3.1. *Determinación de contenido de aire, temperatura, asentamiento, peso unitario y rendimiento en el concreto fresco.*

El contenido de aire, temperatura, asentamiento, peso unitario y rendimiento en el concreto fresco fue previamente definido al momento de realizar el diseño de mezclas, se realizaron tres ensayos para cada uno de ellos y en la **Tabla 7.12** se presenta el Resumen de resultados del concreto en estado fresco.

Tabla 7.12 Resumen de resultados del concreto en estado fresco.
Fuente: Elaboración Propia.

Diseño de mezcla	Contenido de Aire (%)	Temperatura (° C)		Asentamiento (Pulgadas)	Peso Unitario (Kg/m ³)	Rendimiento
		Concreto	Ambiente			
M1	2.2	20.52	19.04	3.0	2249.16	1.07

²⁵ Diseño de mezcla sin aditivo, utilizando el método combinación del módulo de fineza (misma cantidad de cemento de la M1 .285 Kg/m³ [6.71 bolsas por metro cubico])

²⁶ Diseño de mezcla con aditivo, utilizando el método combinación del módulo de fineza (misma relación agua cemento de la M2 0.65 [185 Lt agua por m³ y 285 Kg cemento por m³])



Los resultados y cálculos se basaron en procedimientos metodológicos descritos en el ítem 6.3. Los datos obtenidos de cada ensayo en estado fresco del concreto en laboratorio se muestran en el anexo D. Así mismo el procedimiento para los ensayos de concreto en estado fresco se presentan en las figuras: **Figura 7.3** temperatura en estado fresco, **Figura 7.4** asentamiento del concreto en estado fresco, **Figura 7.5** Peso unitario y rendimiento del concreto en estado fresco y **Figura 7.6** contenido de aire en el concreto fresco



Figura 7.3 Temperatura del concreto en estado fresco. 1) Muestra del concreto, 2) Verificación de registro de datos de temperatura del concreto, 3) lectura de temperatura promedio para un minuto, 4) toma de datos del espécimen de concreto y 5) control de la temperatura del concreto para espécimen de concreto
Fuente: Elaboración Propia.



1)



2)

Figura 7.4 Asentamiento del concreto en estado fresco 1) procedimiento del ensayo y 2) después del ensayo
Fuente: Elaboración Propia.



Figura 7.5 Peso Unitario del concreto en estado fresco.
Fuente: Elaboración Propia.



1)



2)

Figura 7.6 Contenido de aire del concreto en estado fresco 1) Ejecución del ensayo y 2) lectura del Dial.
Fuente: Elaboración Propia.

7.2.1. Concreto en estado Endurecido.

En esta sección se muestran los resultados obtenidos de los ensayos practicados al concreto en estado endurecido, con fines de investigación cada tipo de espécimen en estudio fue ensayado a edades uno, dos, tres, cuatro, cinco, seis, siete, 14, 21, 28, 32, 42, 49, 56 y 70 días. Para cada edad se fabricaron: tres cilindros para determinar la resistencia a compresión y tres vigas de concreto, todos ellos de acuerdo a la edad de estudio. Esto debe hacerse siguiendo el procedimiento de ensayo que establece la ASTM C 39 "Resistencia a compresión de



especímenes cilíndricos de concreto” y la ASTM C78 “Método de prueba estándar para resistencia a la flexión del concreto (Uso de viga simple con carga en los tercios del claro)”.

Se procedió a ensayar los especímenes dentro de las tolerancias de acuerdo a la **Tabla**

7.13 para cada edad.

Tabla 7.13 Tolerancias permitidas para la edad de ensayo.
Fuente: Elaboración Propia.

Edad de ensayo	Tolerancia permitida
24 h-48 h	± 0.50 h. o 2.1%
3 días-6 días	2 h. o 2.8 %
7 días – 27 días	6 h. o 3.6 %
28 días a mas	20 h. o 3.0 %

7.2.1.1. Resistencia a compresión del Concreto.

Los ensayos y cálculos se basaron en procedimientos metodológicos descritos en ASTM C – 39, los datos obtenidos del ensayo en laboratorio se muestran en el anexo E. En la **Tabla 7.14** presenta los resultados del ensayo de resistencia a compresión y se observa los valores promedios de la resistencia a compresión simple (f'_c).

Tabla 7.14 Resistencia de Cilindros de concreto.
Fuente: Elaboración Propia.

EDAD (días)	Resistencia Compresión Promedio (Kg/cm ²)	% DE EVOLUCIÓN DEL f'_c
1	42,93	17,52%
2	150,05	61,24%
3	190,12	77,60%
4	211,28	86,24%
5	229,48	93,67%
6	243,20	99,26%
7	251,87	102,80%
14	268,72	109,68%
21	284,96	116,31%
28	292,35	119,33%
32	297,04	121,24%
42	300,63	122,71%
56	308,58	125,95%
70	313,62	128,01%



En la **Tabla 7.14** se observa que el diseño elaborado supera la resistencia de diseño para los 28 días, en un porcentaje de 19.33 %; así mismo, la resistencia de diseño es alcanzada a una edad temprana de siete días con un porcentaje de 102.80 %, adicionalmente se observa que a la edad de dos días el concreto ha desarrollado más de un 50 % de la resistencia de diseño, esto es de suma importancia para concreto en pavimento rígido debido a la necesidad de apertura al tráfico a edades tempranas.

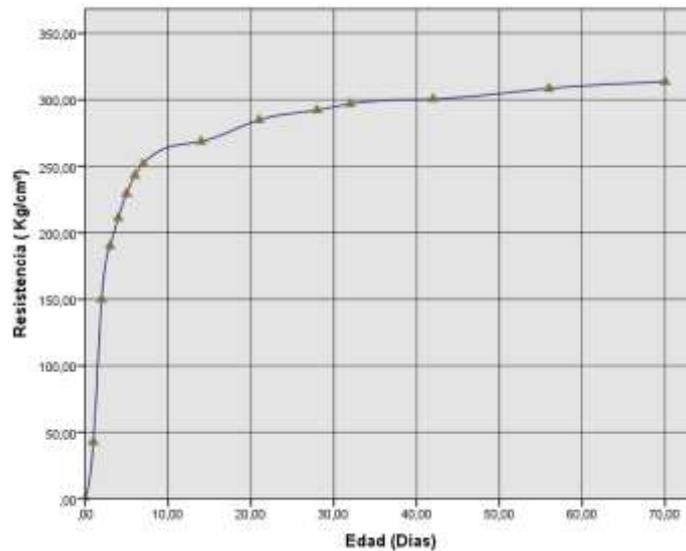


Figura 7.7 Resistencia de Cilindros de concreto.
Fuente: Elaboración Propia.

En la **Figura 7.7**, se muestra gráficamente la evolución de la resistencia a compresión con respecto al tiempo, presentando esta una curva de evolución típica de adquisición de resistencia del concreto. Se observa que el comportamiento de la resistencia del concreto con respecto a la edad de falla de los cilindros, es el esperado, ya que a los 28 días presenta una evolución de 119.33 % de resistencia a compresión del concreto. Así mismo en la **Figura 7.8** y **Figura 7.9** se muestra las imágenes antes y después del ensayo.



Figura 7.8 Ensayo de Resistencia a Compresion. Fuente: Elaboración Propia.



Figura 7.9 Despues de ensayo de Compresion Simple. Fuente: Elaboración Propia.

7.2.1.2. Resistencia a Flexión en Vigas.

Los ensayos y cálculos se basaron en procedimientos metodológicos descritos en ASTM C – 78, los datos obtenidos del ensayo en laboratorio se muestran en el anexo D. En la **Tabla 7.15** se muestra el resumen de resultados de resistencia a flexión de vigas de concreto, se observa los valores promedios de la resistencia a flexión producido en los 2/3 tercios de luz.

Tabla 7.15 Resumen de Resistencia a flexión para la mezcla en estudio. Fuente: Elaboración Propia.

Edad	Resistencia promedio (kg/cm2)	% de evolución del Mr.
1	6,33	17,58%
3	24,57	68,26%
5	31,59	87,75%
7	36,17	100,46%
14	39,17	108,81%
21	39,56	109,90%
28	39,86	110,71%
32	40,49	112,47%



En la **Tabla 7.15** se observa que el diseño elaborado supera la resistencia de diseño para los 28 días, en un porcentaje de 10.71%; así mismo, la resistencia de diseño de módulo de rotura es alcanzada a una edad temprana de siete días con un porcentaje de 100.46 % y a la edad de tres días el concreto ha desarrollado más de un 50 % de la resistencia de diseño, esto es de suma importancia para concreto en pavimento rígido debido a la necesidad de apertura al tráfico a edades tempranas.

En la **Figura 7.10** se relaciona la resistencia a flexión vs su edad de falla, se puede observar que a edades tempranas la evolución del módulo de rotura es mayor que en las últimas edades.

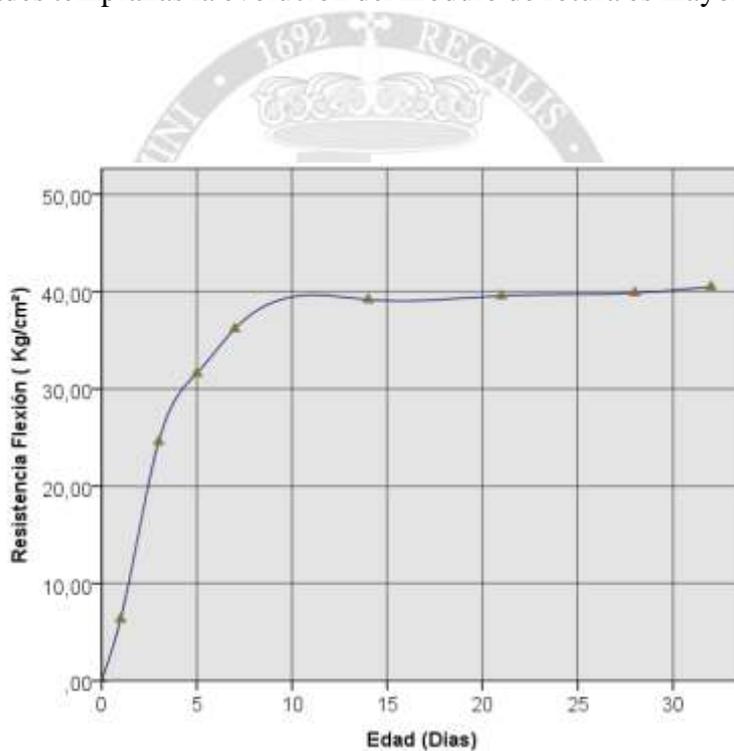


Figura 7.10 Resistencia a flexión.
Fuente: Elaboración Propia.

La **Figura 7.10** muestra gráficamente la evolución de la resistencia a compresión con respecto al tiempo, presentando esta una curva de evolución típica de adquisición de resistencia del concreto. Se observa que los resultados son los esperados y el comportamiento de la resistencia a flexión del concreto con respecto a la edad de falla para los 28 días, presenta una evolución de 119.33 % de resistencia a compresión del concreto. Asi mismo en la **Figura 7.11**



se muestra el equipo de ensayo a flexión, la **Figura 7.12** muestra el ensayo a flexión y la **Figura 7.13** muestra la falla producida después del ensayo.



Figura 7.11 Equipo de Ensayo a Flexión.
Fuente: Elaboración Propia.



Figura 7.12 Ensayo a Flexión en Vigas
Fuente: Elaboración Propia.



Figura 7.13 Falla en los 2/3 de la viga.
Fuente: Elaboración Propia.

En la **Figura 7.13** se puede apreciar el tipo de falla que se presentó en todas las vigas ensayadas para la mezcla. Las fallas ocurrieron en el tercio medio de la luz de forma vertical, como se esperaba. Esto es debido a que las vigas no tenían acero de refuerzo haciendo que la falla se diera únicamente por flexión.



7.2.1.3. Módulo de Elasticidad Estático por Compresión Simple.

Los ensayos y cálculos se basaron en procedimientos metodológicos descritos en el ítem 6.3.4.3, con el fin de evaluar la evolución de esta propiedad en el tiempo. Los resultados obtenidos se muestran de forma resumida en la **Tabla 7.16** y su grafica correspondiente se observa en la **Figura 7.14**. Los resultados detallados de este ensayo se encuentran en el Anexo E.

Tabla 7.16 Modulo de Elasticidad Estático por Compresión Simple.
Fuente: Elaboración Propia.

EDAD (días)	RESISTENCIA PROMEDIO (Kg/cm ²)	Módulo de Elasticidad Promedio (Kg/cm ²)
1	42,93	16841.63
2	150,05	67367.99
3	190,12	76588.36
4	211,28	83628.12
5	229,48	91263.27
6	243,20	97405.06
7	251,87	104876.06
14	268,72	121815.91
21	284,96	144715.27
28	292,35	151551.96
32	297,04	154212.86
42	300,63	177385.80
56	308,58	195121.61
70	313,62	214890.87

En la **Tabla 7.16** se observa que el módulo de elasticidad no es el mismo para cada edad, siendo este un parámetro de suma importancia para concreto en pavimento rígido debido a la necesidad de apertura al tráfico a edades tempranas.

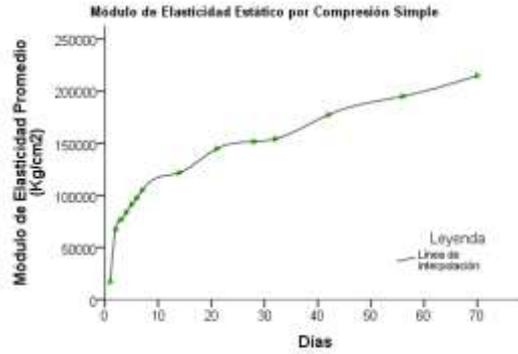


Figura 7.14 Módulo de Elasticidad Estático por Compresión Simple.
Fuente: Elaboración Propia.

En la **Figura 7.14**, se muestra gráficamente la evolución del modulo de elasticidad con respecto al tiempo, presentando esta una curva de evolución típica de adquisición de resistencia del concreto. Asi mismo en la **Figura 7.15** y **Figura 7.16** se muestra las imágenes antes y después del ensayo.



Figura 7.15 Ensayo de Módulo de Elasticidad.
Fuente: Elaboración Propia.



Figura 7.16 Después de ensayo de Compresion Simple.
Fuente: Elaboración Propia.



7.2.1.4. Resumen de las propiedades Físico – Mecánicas.

La información obtenida de los ensayos se consolida en la **Tabla 7.16**, donde se resume las propiedades físico-mecánicas de resistencia a flexión y compresión.

Tabla 7.17 Resumen de propiedades físico mecánicas a flexión y compresión.
Fuente: Elaboración Propia.

Resumen de propiedad físico-mecánicas						
Edad (días)	Ensayo a compresión		Módulo de Elasticidad	Ensayo a flexión		
	Resistencia a compresión (kg/cm ²)	% de evolución del f'c	Módulo de Elasticidad Promedio (Kg/cm ²)	Resistencia a flexión (kg/cm ²)	% de evolución del MR	% de Resistencia a compresión
1	42.93	17.52	16841.63	6.33	17.58	14.74
2	150.05	61.24	67367.99	-	-	-
3	190.12	77.60	76588.36	24.57	68.26	12.92
4	211.28	86.24	83628.12	-	-	-
5	229.48	93.67	91263.27	31.59	87.75	13.77
6	243.20	99.26	97405.06	-	-	-
7	251.87	102.80	104876.06	39.17	108.81	15.55
14	268.72	109.68	121815.91	-	-	-
21	284.96	116.31	144715.27	39.56	109.90	13.88
28	292.35	119.33	151551.96	39.86	110.71	13.63
32	297.04	121.24	154212.86	40.49	112.47	13.63
42	300.63	122.71	177385.80	-	-	-
56	308.58	125.95	195121.61	-	-	-
70	313.62	128.01	214890.87	41.49	115.24	13.23

La **Tabla 7.17** muestran las resistencias, así como los porcentajes de evolución de las propiedades mecánicas del concreto en estudio, que se utilizaran para construir la relación existente entre la resistencia de propiedades mecánicas de flexión, compresión y el índice de madurez.

7.3. Perfiles térmicos

Para establecer la correlación entre índice de madurez y resistencia mecánica es necesario que estos dos parámetros se grafiquen simultáneamente en el mismo plano y que sus resultados sean obtenidos en idénticas condiciones, independientemente que se trate de dos



propiedades diferentes. Según el procedimiento estandarizado por la ASTM C 1074, deben ser ensayados dos especímenes por edad; y un tercero, solamente si el rango de resistencia a compresión de estos, excede el 10% del promedio, el valor requerido será el promedio de los tres ensayos.

Para obtener esta relación es necesario ensayar cada tipo de especímenes e instrumentar dos de cada tipo, con el fin de registrar el historial de temperatura interna del concreto y la temperatura del medio de curado y así poderse comparar.

7.3.1. Historial de temperatura.

Con el fin de calibrar el modelo de obtención de resistencia por el método de madurez, a continuación, se muestran los resultados de perfiles térmicos registrados en Vigas, cilindros de concreto y medio de curado de los especímenes.

La **Figura 7.17** muestra el perfil térmico de las primeras 24 horas de edad, la **Figura 7.18** muestra el Perfil térmico durante los primeros 3 Días, la **Figura 7.19** muestra Perfil térmico durante los 7 días y la **Figura 7.20** muestra Perfil térmico durante 70 Días.

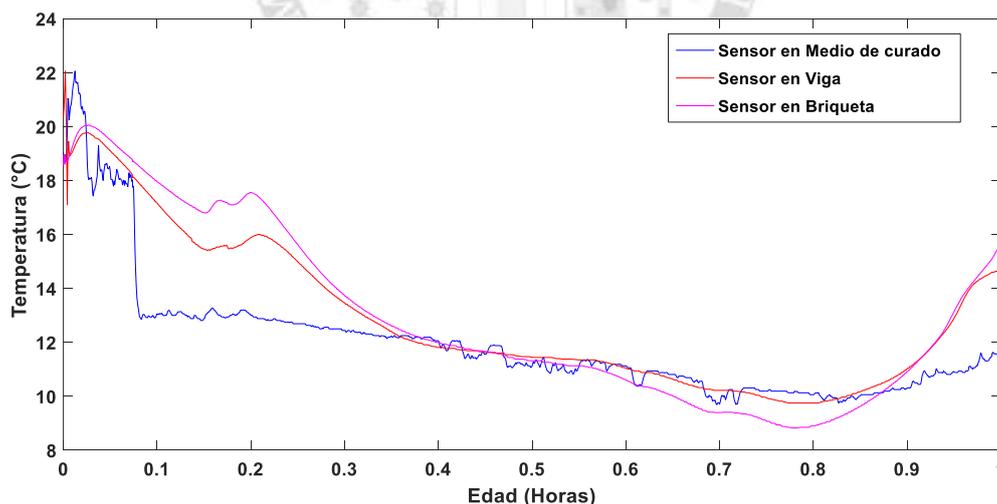


Figura 7.17 Perfil térmico durante las primeras 24 horas.
Fuente: Elaboración Propia.

En la **Figura 7.17** durante las primeras 24 horas, el medio de curado (entorno) fue el medio ambiente y posterior a este el medio de curado fue el agua, analizando la temperatura de



referencia, puede verse que la temperatura para las primeras 24 horas es inferior a 20°C, lo que significa que la energía de activación es de 33,500 J/mol, de acuerdo al modelo planteado por Freiesleben Hansen y Pedersen (ver ítem 3.8.5, pg. 34)

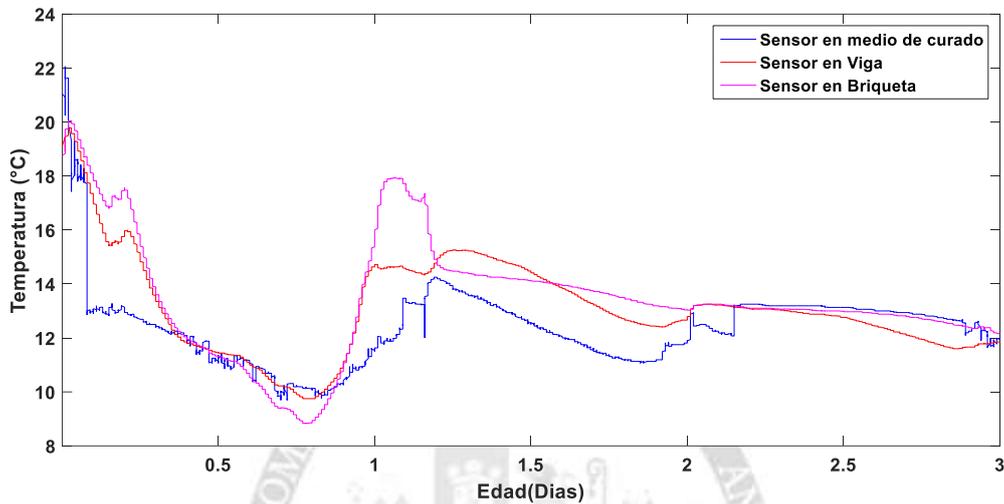


Figura 7.18 Perfil térmico durante los primeros tres Días.
Fuente: Elaboración Propia.

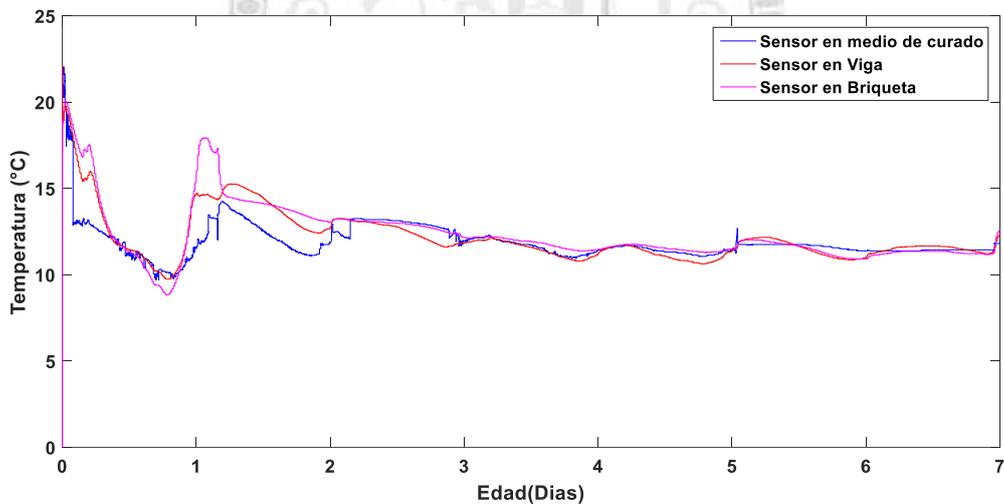


Figura 7.19 Perfil térmico durante los siete días.
Fuente: Elaboración Propia.

Las figuras representan las medidas de temperatura tomadas con los sensores en el interior de cada tipo de especímenes. Se tomaron el registro de historial de temperatura en dos vigas y dos cilindros de concreto, en cada espécimen se tenían un sensor embebido en el centro. de acuerdo con los datos obtenidos, la diferencia entre la temperatura de cada espécimen es insignificante.



En la **Figura 7.20** se muestra la temperatura promedio de las dos briquetas, dos vigas y la temperatura del medio de curado para los 70 días de estudio, observando que la temperatura máxima se presenta cuando el medio de curado es a condiciones ambientales y a inicios del proceso de hidratación del cemento.

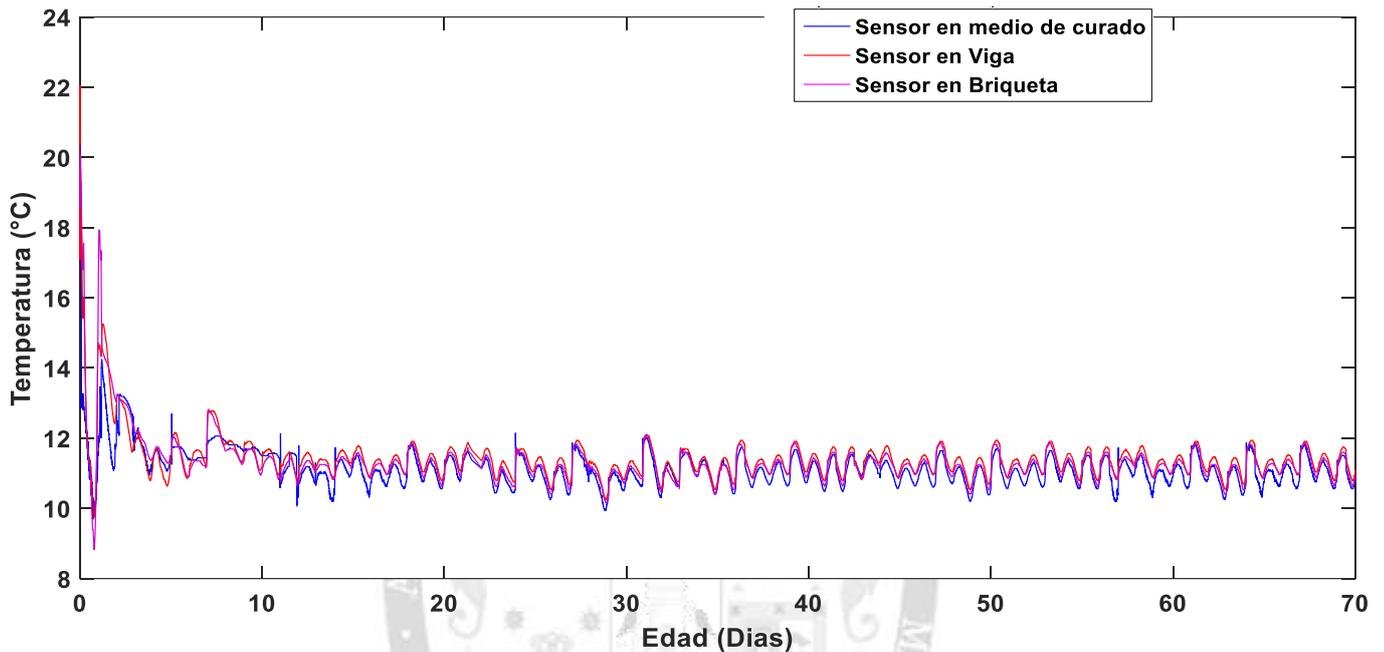


Figura 7.20 Perfil térmico durante 70 Días.
Fuente: Elaboración Propia.

Puede verse en las figuras anteriores que la temperatura máxima alcanzada para los cilindros de concreto fue de 22,0 °C y la mínima de 8.5 °C y para las vigas de concreto la temperatura máxima alcanzada fue de 20 °C y la mínima de 10 °C; las temperaturas medias son de 32.1 °C y 5.0 °C respectivamente. También puede apreciarse la clásica distribución sinusoidal a lo largo del día con una zona de máximos en el entorno de las 12:00- 14:00 horas, mientras que la zona de mínimos se sitúa en el entorno de la 3.00 – 4:00 horas. Por otro lado, se observa que los perfiles térmicos de los cilindros de concreto son mayores que las vigas de concreto.

Como se ve en la **Figura 7.20** , las temperaturas iniciales de las mezclas están por debajo de la temperatura controlada de 20 °C, este comportamiento se debe a que el mezclado



se hizo en condiciones no contraladas de temperaturas. Así mismo en el transcurso, el concreto empiezan a incrementar la temperatura a medida que se lleva a cabo el proceso de hidratación. Al cabo de aproximadamente 12 días las temperaturas de los especímenes se asemejan con la temperatura del medio de curado.

En la **Figura 7.20** puede verse que los perfiles térmicos de los especímenes fabricados presentan el mismo comportamiento en todas las series durante los 70 días, habiendo algunas excepciones durante los siete primeros días, donde el historial de temperatura presenta un comportamiento con un diferencial térmico. De igual forma las relaciones entre los valores medidos de ΔT ⁽²⁷⁾ y Δt ⁽²⁸⁾ presentan las mismas tendencias para los 70 días de estudio.

7.4. Relación índice de madurez y resistencia.

Luego de obtener los resultados de las propiedades en estado endurecido del concreto realizado en laboratorio (compresión simple y flexión) junto con las lecturas de tiempo y temperatura (historial de temperatura). Se procedió a vincular ambos parámetros mediante la función de madurez de Nurse Saúl y la función de madurez de Arrhenius, donde el eje de las ordenadas (Y) se grafican valores de resistencia obtenidas en laboratorio y en el eje de las abscisas (X) el historial de temperatura.

A continuación, se detalla la aplicación para las dos funciones de madurez de Nurse-Saul y Arrhenius.

7.4.1. Índice de Madurez de Nurse-Saul.

El índice de madurez Nurse-Saul calcula un “factor temperatura-tiempo”, en base a un historial de temperatura – tiempo, tal como se observa en la **Figura 7.21**.

⁽²⁷⁾ ΔT variación de temperatura

⁽²⁸⁾ Δt intervalo de tiempo

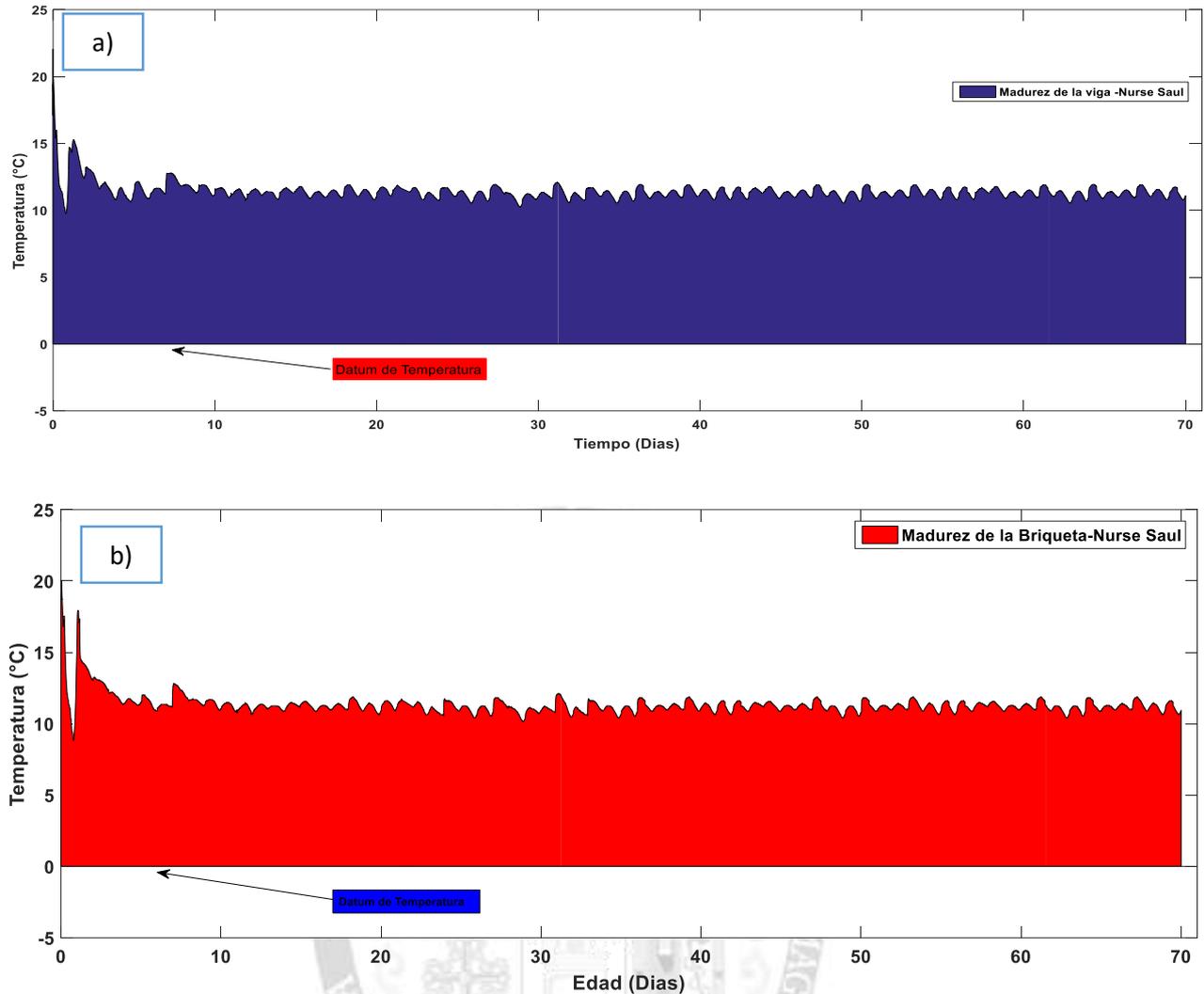


Figura 7.21 Diagrama de Madurez Usando la Función de Madurez de Nurse-Saul:
a) Madurez de la viga de Concreto, b) Madurez del cilindro de Concreto.
Fuente: Elaboración Propia.

El área bajo la curva de historial temperatura – tiempo mostrada en la **Figura 7.21**, representa el factor temperatura – tiempo para; a) Factor temperatura tiempo de la Viga de concreto y b) Factor temperatura tiempo del cilindro de concreto. El datum de temperatura usado en ambos especímenes fue de cero grados Celsius.

7.4.1.1. Resistencia a Compresión e Índice de madures Nurse-Saul.

La **Tabla 7.18** muestran los resultados obtenidos de resistencia a compresión y el factor de temperatura – tiempo, seguidamente, la **Figura 7.22** se muestra la relación existente entre



estos dos parámetros y la **Figura 7.23** muestran las funciones de regresión de mejor ajuste de coeficiente de determinación.

Tabla 7.18 Resumen de Índice de Madurez Nurse-Saul para Cilindros de concreto.
Fuente: Elaboración Propia.

Días	Resistencia a compresión promedio (Kg/cm ²)	Factor Temperatura Tiempo (°C·hr)
1	42.93	337.520343
2	150.05	683.787068
3	190.12	979.175743
4	211.28	1264.21925
5	229.48	1530.16791
6	243.20	1803.81264
7	251.87	2087.69399
14	268.72	4003.74167
21	284.96	5870.89
28	292.35	7759.16
32	297.04	8864.31
42	300.63	11490.8947
56	308.58	15258.5876
70	313.62	19019.0305

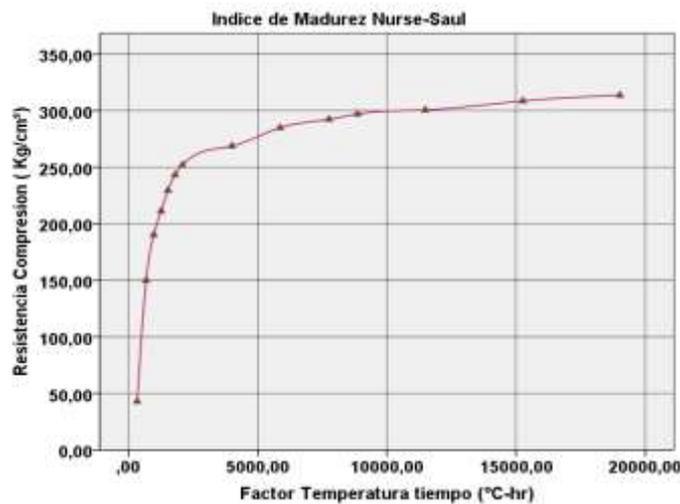


Figura 7.22 Curva Índice de Madurez Nurse-saul y resistencia a Compresion.
Fuente: Elaboración Propia.

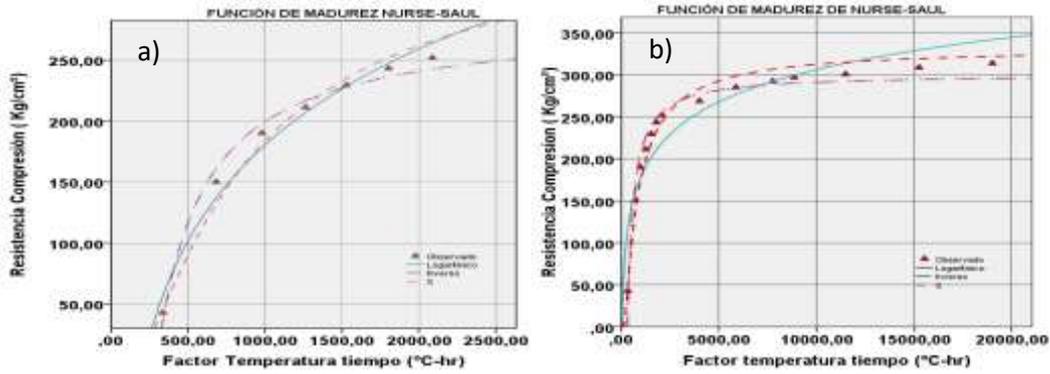


Figura 7.23 Funciones de Madurez de Nurse Saul para resistencia a compresion.

- a) funciones de regresion para los siete primeros dias [edades tempranas] y
- b) funciones de regresion para los 70 dias [mayores edades]

Fuente: Elaboración Propia.

La Figura 7.23 a) muestra las funciones de regresión; logarítmico con $R^2= 0.978$, hiperbólico con $R^2= 0.988$ y Exponencial con $R^2= 0.989$

La Figura 7.23 b) muestra las funciones de regresión; logarítmico con $R^2= 0.852$, hiperbólico con $R^2= 0.974$ y Exponencial con $R^2= 0.98$

7.4.1.1. Resistencia a Flexión e Índice de madures Nurse-Saul.

En la Tabla 7.19 se muestran los resultados obtenidos de resistencia a flexión y factor temperatura - tiempo, seguidamente en la Figura 7.24 se muestra la relación existente entre estos dos parámetros y en la Figura 7.25 se muestran las funciones de regresión de mejor ajuste de coeficiente de determacion.

Tabla 7.19 Resumen de Índice de Madurez Nurse-Saul para vigas.
Fuente: Elaboración Propia.

Días	Resistencia a flexión promedio (Kg/cm ²)	FTT (°C hr)
1	6.33	328.42
3	24.57	954.68
5	31.59	1493.36
7	36.17	2057.19
14	39.17	3996.80
21	39.56	5882.31
28	39.86	7787.49
32	40.49	8907.73
70	41.49	19165.50

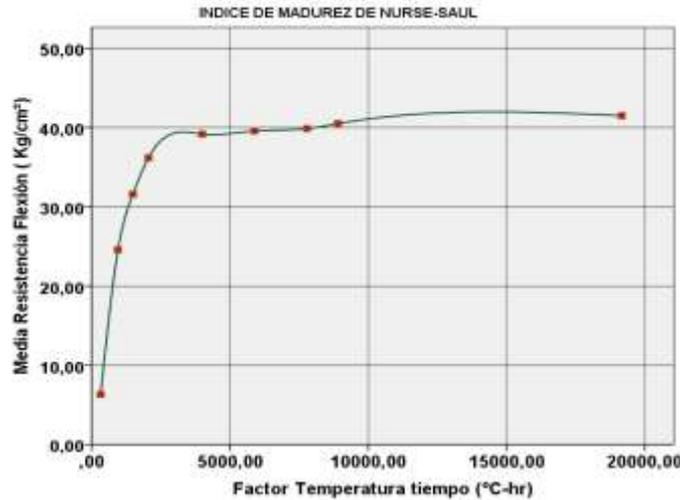


Figura 7.24 Curva Índice de Madurez Nurse-Saul para resistencia a Flexión. Fuente: Elaboración Propia.

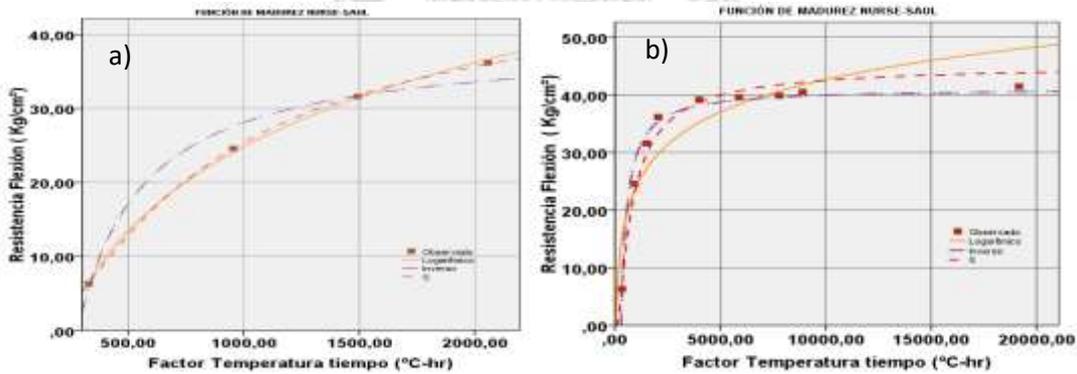


Figura 7.25 Funciones de Madurez Nurse-Saul para resistencia a flexión. a) funciones de regresión para los siete primeros días [edades tempranas] y b) funciones de regresión para los 70 días [mayores edades] Fuente: Elaboración Propia.

La Figura 7.25 a) muestra las funciones de regresión; logarítmico con $R^2 = 0.999$, hiperbólico con $R^2 = 0.970$ y Exponencial con $R^2 = 1.00$

La Figura 7.25 b) muestra las funciones de regresión; logarítmico con $R^2 = 0.814$, hiperbólico con $R^2 = 0.976$ y Exponencial con $R^2 = 0.992$

7.4.1.2. Módulo de Elasticidad Estático por Compresión Simple.

La Tabla 7.20 muestran los resultados obtenidos de resistencia a compresión y el factor de temperatura – tiempo, seguidamente, la Figura 7.26 se muestra la relación existente entre estos dos parámetros y la Figura 7.27 muestran las funciones de regresión de mejor ajuste de coeficiente de determinación.



Tabla 7.20 Resumen de Índice de Madurez Modulo de Elasticidad Nurse-Saul para Cilindros de concreto. Fuente: Elaboración Propia.

Días	Módulo de Elasticidad Promedio (Kg/cm ²)	Factor Temperatura Tiempo (°C·hr)
7	104876.06	2087.69399
14	121815.91	4003.74167
21	144715.27	5870.89
28	151551.96	7759.16
32	154212.86	8864.31
70	214890.87	19019.0305

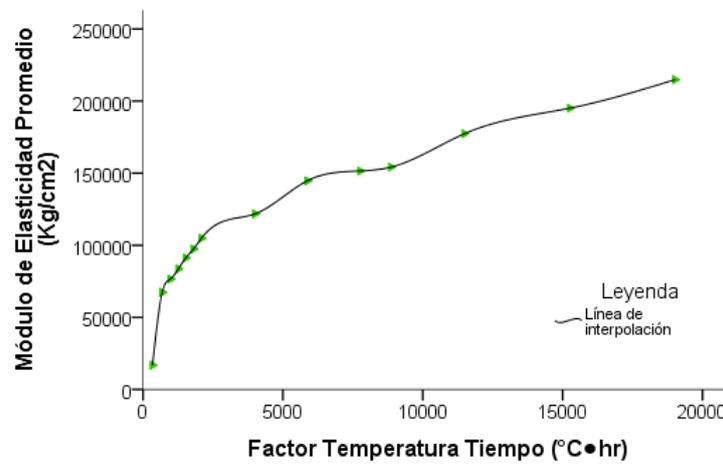


Figura 7.26 Curva Índice de Madurez Nurse-saul y Modulo de Elasticidad. Fuente: Elaboración Propia.

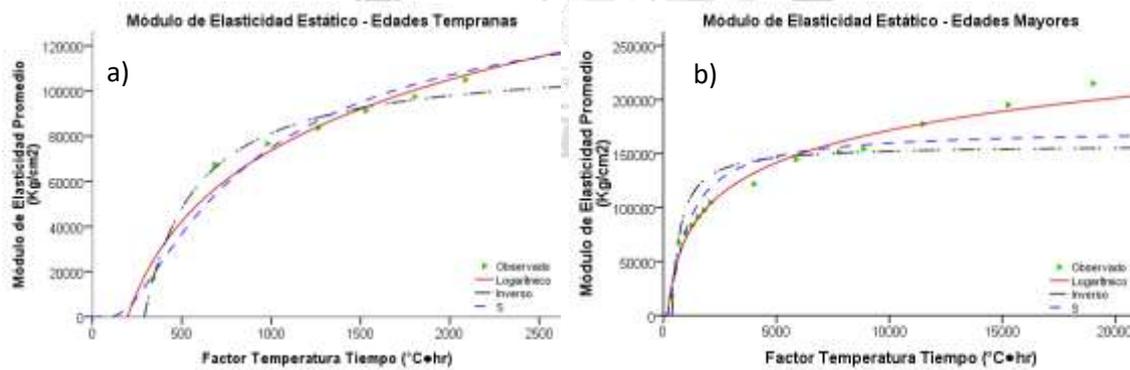


Figura 7.27 Funciones de Madurez de Nurse Saul para Modulo de Elasticidad. a) funciones de regresion para los siete primeros dias [edades tempranas] y b) funciones de regresion para los 70 dias [mayores edades] Fuente: Elaboración Propia.

La Figura 7.27 a) muestra las funciones de regresión; logarítmico con $R^2 = 0.959$, hiperbólico con $R^2 = 0.984$ y Exponencial con $R^2 = 0.972$



La **Figura 7.27 b)** muestra las funciones de regresión; logarítmico con $R^2 = 0.978$, hiperbólico con $R^2 = 0.719$ y Exponencial con $R^2 = 0.955$

7.4.1.3. *Funciones de Madurez Nurse Saul.*

En la **Tabla 7.21** se enlistan las tres ecuaciones de crecimiento de resistencias. Así mismo, se muestra que función tiene el mejor ajuste de acuerdo al coeficiente de determinación.





Tabla 7.21 Resumen de Funciones de Resistencia a Flexo-Compresión e Índice de Madurez Nurse Saul.
Fuente: Elaboración Propia.

Edad	Función de Madurez Nurse-Saul.	Función de regresión	Ecuación	R ²
	Resistencia a compresión	Logarítmico	$f'_c = -204.841 + 54.476 \cdot \text{Log}(x)$	0.852
		Hiperbólico (Inversa)	$f'_c = 300.416 - 93387.392 \cdot \frac{1}{x}$	0.974
		Exponencial (Curva -S)	$f'_c = e^{5.808 - \frac{646.584}{x}}$	0.980
70 Días mayores Edades	Resistencia a flexión	Logarítmico	$Mr = -32.368 + 8.147 \cdot \text{Log}(x)$	0.814
		Hiperbólico (Inversa)	$Mr = 41.137 - 11910.844 \cdot \frac{1}{x}$	0.976
		Exponencial (Curva -S)	$Mr = e^{3.813 - \frac{633.231}{x}}$	0.992
	Módulo de Elasticidad	Logarítmico	$Ec = -227626.37 + 43337.31 \cdot \text{Log}(x)$	0.978
		Hiperbólico (Inversa)	$Ec = 158016 - 58531102.3 \cdot \frac{1}{x}$	0.719
		Exponencial (Curva -S)	$Ec = e^{12.06 - \frac{787.68}{x}}$	0.955
	Resistencia a compresión	Logarítmico	$f'_c = -604.666 + 113.639 \cdot \text{Log}(x)$	0.978
		Hiperbólico (Inversa)	$f'_c = 282.3123 - 82940.808 \cdot \frac{1}{x}$	0.988
		Exponencial (Curva -S)	$f'_c = e^{5.923 - \frac{710.806}{x}}$	0.989
7 Días edad temprana	Resistencia a flexión	Logarítmico	$Mr = -88.335 + 16.381 \cdot \text{Log}(x)$	0.999
		Hiperbólico (Inversa)	$Mr = 39.0512 - 10964.928 \cdot \frac{1}{x}$	0.970
		Exponencial (Curva -S)	$Mr = e^{3.913 - \frac{679.280}{x}}$	1.00
	Módulo de elasticidad	Logarítmico	$Ec = -238918.54 + 45246.13 \cdot \text{Log}(x)$	0.959
		Hiperbólico (Inversa)	$Ec = 114521.84 - 33274751.1 \cdot \frac{1}{x}$	0.984
		Exponencial (Curva -S)	$Ec = e^{11.94 - \frac{714.914}{x}}$	0.972

7.4.2. Índice de Madurez de Arrhenius.

El índice de madurez Arrhenius señalada en la ecuación 3.2. En el ítem 3.7.5, calcula un valor denominado "Edad Equivalente". el valor de energía de activación adoptado es 33,500



(J/mol), se utilizó la temperatura de referencia de 23°C tal como sugiere la norma ASTM C-1074, la Constante Universal de los gases es igual a 8.314 J/(mol·K), el intervalo de tiempo es de un minuto en unidades de °C, y el Datum de Temperatura es igual a cero en unidades de °C.

7.4.2.1. Resistencia a Compresión e Índice de madures Arrhenius.

En la Tabla 7.22 se muestran los resultados obtenidos de resistencia a flexión e índice de madurez, en la Figura 7.28 se muestra la relación existente entre estos dos parámetros y en la Figura 7.29 muestran las funciones de regresión que mejor ajuste de correlación tengan.

Tabla 7.22 Resumen de Índice de Madurez Arrhenius para Cilindros de concreto. Fuente: Elaboración Propia.

Días	Resistencia a compresión promedio (Kg/cm ²)	Edad Equivalente (hr)
1	42.93	16.23
2	150.05	32.32
3	190.12	46.50
4	211.28	60.64
5	229.48	73.97
6	243.20	87.69
7	251.87	102.01
14	268.72	198.44
21	284.96	292.97
28	292.35	388.95
32	297.04	445.42
42	300.63	578.94
56	308.58	770.08
70	313.62	960.85

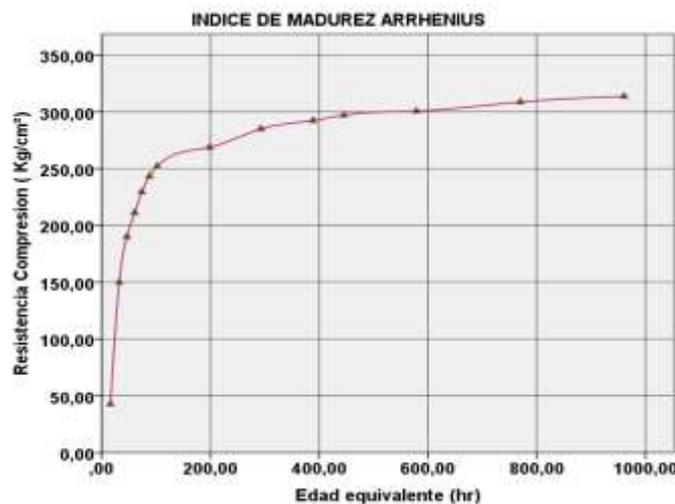


Figura 7.28 Curva Índice de Madurez Arrhenius y resistencia a Compresion. Fuente: Elaboración Propia.

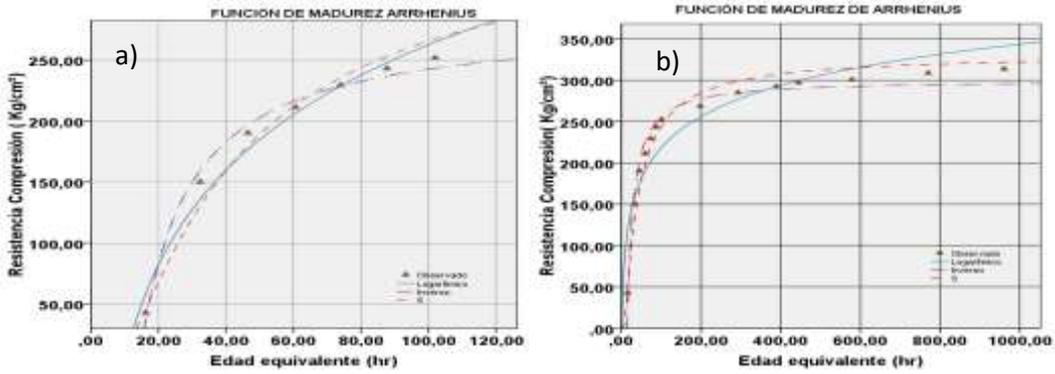


Figura 7.29 Funciones de Madurez de Arrhenius para resistencia a compresion.

- a) funciones de regresion para los siete primeros dias [edades tempranas] y
- b) funciones de regresion para los 70 dias [mayores edades]

Fuente: Elaboración Propia.

La **Figura 7.29 a)** muestra las funciones de regresión; logarítmico con $R^2= 0.974$, hiperbólico con $R^2= 0.990$ y Exponencial con $R^2= 0.986$

La **Figura 7.29 b)** muestra las funciones de regresión; logarítmico con $R^2= 0.850$, hiperbólico con $R^2= 0.975$ y Exponencial con $R^2= 0.977$

7.4.2.2. Resistencia a Flexión e Índice de madures Arrhenius.

En la **Tabla 7.23** se muestran los resultados obtenidos de resistencia a flexión e índice de madurez Arrhenius, en la **Figura 7.30** se muestra la relación existente entre estos dos parámetros y en la **Figura 7.31** muestran las funciones de regresión que mejor ajuste de correlación tienen.

Tabla 7.23 Resumen de Índice de Madurez Arrhenius para vigas.
Fuente: Elaboración Propia.

Días	Resistencia a flexión promedio (Kg/cm ²)	Edad Equivalente (hr)
1	6.33	15.83
3	24.57	45.64
5	31.59	72.85
7	36.17	101.08
14	39.17	198.18
21	39.56	293.23
28	39.86	389.48
32	40.49	446.48
70	41.49	964.94

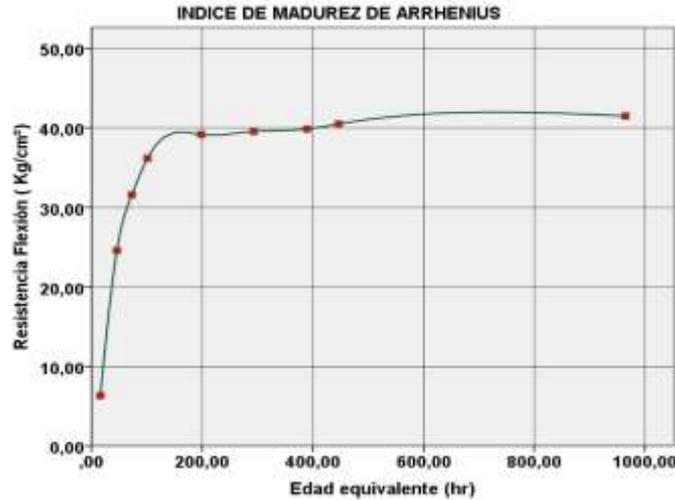


Figura 7.30 Curva Índice de Madurez Arrhenius para resistencia a Flexión. Fuente: Elaboración Propia.

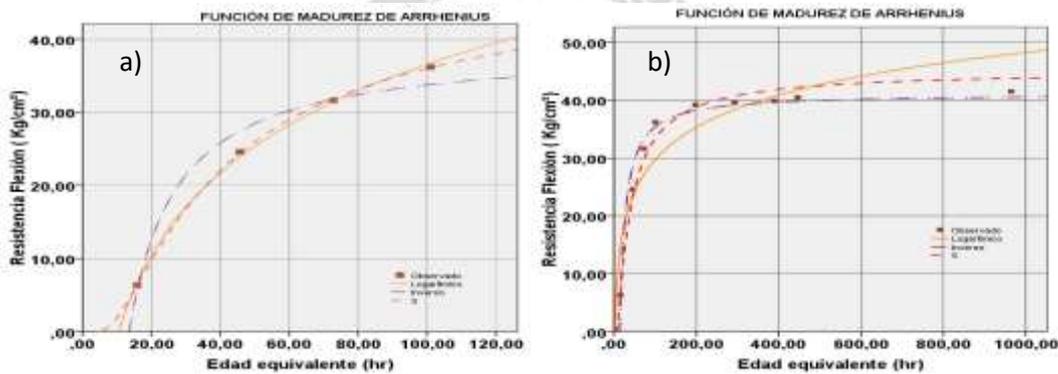


Figura 7.31 Funciones de Madurez Arrhenius para resistencia a flexión. a) funciones de regresión para los siete primeros días [edades tempranas] y b) funciones de regresión para los 70 días [mayores edades] Fuente: Elaboración Propia.

La **Figura 7.31 a)** muestra las funciones de regresión; logarítmico con $R^2 = 0.974$, hiperbólico con $R^2 = 0.990$ y Exponencial con $R^2 = 0.986$

La **Figura 7.31** muestra las funciones de regresión; logarítmico con $R^2 = 0.814$, hiperbólico con $R^2 = 0.978$ y Exponencial con $R^2 = 0.992$

7.4.2.2.1. Funciones de madurez Arrhenius.

En la **Tabla 7.24** se enlistan los tres modelos de crecimiento de resistencias. Se muestra que el ajuste Exponencial tiene un mejor coeficiente de correlación tanto para la compresión y flexión. Sin embargo, subestima la resistencia a edades tempranas y sobrestima la resistencia a mayores edades.



Tabla 7.24 Resumen de Funciones de Resistencia a Flexo-Compresión e Índice de Madurez Arrhenius.
Fuente: Elaboración Propia.

Edad	Función de Madurez Arrhenius.	Función de regresión	Ecuación	R ²
70 días Mayores Edades	Resistencia a compresión	Logarítmico	$f'c = -32.328 + 54.418 \cdot \text{Log}(x)$	0.850
		Hiperbólico (Inversa)	$f'c = 300.077 - 4470.021 \cdot \frac{1}{x}$	0.975
		Exponencial (Curva -S)	$f'c = e^{5.805 - \frac{30.890}{x}}$	0.977
	Resistencia a flexión	Logarítmico	$Mr = -7.285 + 8.036 \cdot \text{Log}(x)$	0.814
		Hiperbólico (Inversa)	$Mr = 41.081 - 573.193 \cdot \frac{1}{x}$	0.978
		Exponencial (Curva -S)	$Mr = e^{3.810 - \frac{30.458}{x}}$	0.992
7 Días Edades Tempranas	Resistencia a compresión	Logarítmico	$f'c = -253.833 + 112.126 \cdot \text{Log}(x)$	0.974
		Hiperbólico (Inversa)	$f'c = 282.369 - 3979.278 \cdot \frac{1}{x}$	0.990
		Exponencial (Curva -S)	$f'c = e^{5.922 - \frac{34.010}{x}}$	0.986
	Resistencia a flexión	Logarítmico	$Mr = -38.106 + 16.212 \cdot \text{Log}(x)$	0.998
		Hiperbólico (Inversa)	$Mr = 39.008 - 527.857 \cdot \frac{1}{x}$	0.972
		Exponencial (Curva -S)	$Mr = e^{3.910 - \frac{32.667}{x}}$	1.00

7.4.3. Comparación de funciones de madurez.

La función de madurez de Nurse-Saul utiliza un índice de madurez en unidades °C·hr (TTF), para poderse comparar con la función Arrhenius que tiene su índice de madurez en hr (Edad equivalente), se determina un factor de conversión α para convertir la función de madurez Nurse-Saul a “edad equivalente” (hr) y así poderse comparar ambas funciones con las mismas unidades tal como se describe en el capítulo 3.8, en el ítem 3.8.1. La temperatura de referencia utilizada para el factor de conversión de edad es 23°C y el Datum de temperatura de 0 °C.

La **Tabla 7.25** muestra la función de madurez de Nurse -Saul en edad equivalente. El factor de conversión a edad equivalente es 1/23.



Tabla 7.25 Conversión de la función de Madurez de Nurse-Saul en Edad equivalente.
Fuente: Elaboración Propia.

Función de Madurez Nurse-Saul. (edad Equivalente)			
Edad 70 días	Función de regresión	Ecuación	R ²
Resistencia a compresión	Logarítmico	$f'_c = -30.895 + 54.476 \cdot \text{Log}(x)$	0.852
	Hiperbólico (Inversa)	$f'_c = 300.416 - 4060.321 \cdot \frac{1}{x}$	0.974
	Exponencial (Curva -S)	$f'_c = e^{5.808 - \frac{28.112}{x}}$	0.98
Resistencia a flexión	Logarítmico	$Mr = -6.822 + 8.147 \cdot \text{Log}(x)$	0.814
	Hiperbólico (Inversa)	$Mr = 41.137 - 517.863 \cdot \frac{1}{x}$	0.976
	Exponencial (Curva -S)	$Mr = e^{3.813 - \frac{27.532}{x}}$	0.992

Las ecuaciones de que se utilizarán para predecir y estimar la resistencia del concreto en campo serán las indicadas en la **Tabla 7.25** donde f'_c es la resistencia en Kg/cm^2 y "x" es el índice de madurez Nurse-Saul y Arrhenius (edad equivalente).

La **Figura 7.32** muestra las Funciones de Madures de Nurse-Saul y Arrhenius para estimar la resistencia a compresión, la función de madurez de Nurse Saul se encuentra en unidades de edad equivalente. Asi mismo **Figura 7.33** muestra las Funciones de Madures de Nurse-Saul y Arrhenius para estimar la resistencia a flexión, la función de madurez de Nurse Saul se encuentra en unidades de edad equivalente

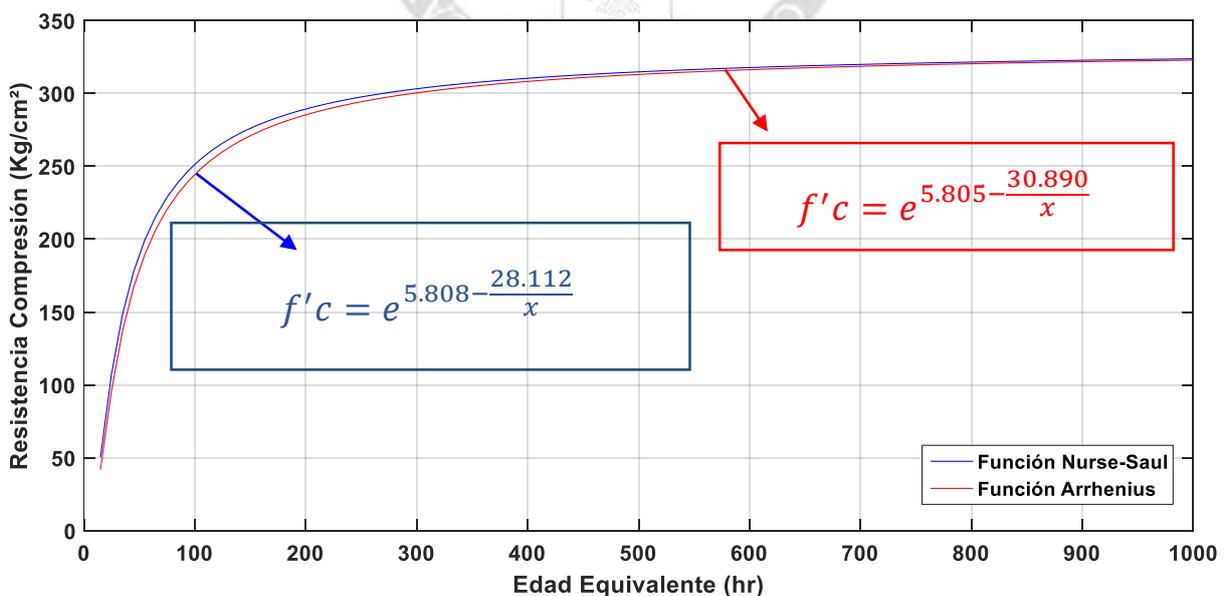


Figura 7.32 Funciones de Madures de Nurse-Saul y Arrhenius.
Fuente: Elaboración Propia.

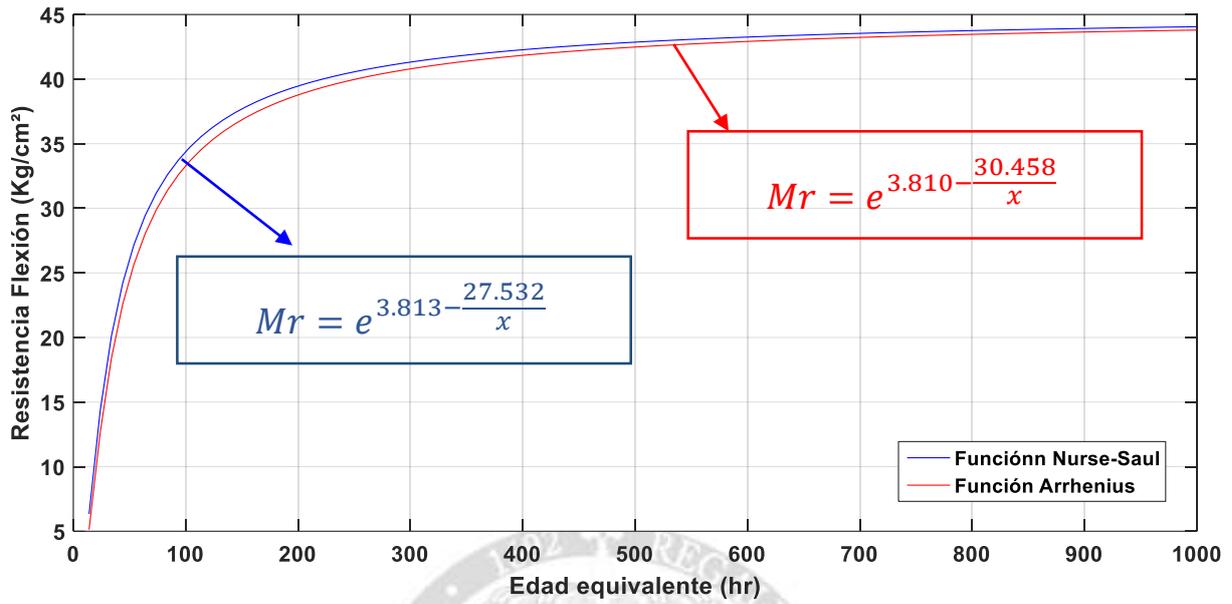


Figura 7.33 Funciones de Madures de Nurse-Saul y Arrhenius.
Fuente: Elaboración Propia.

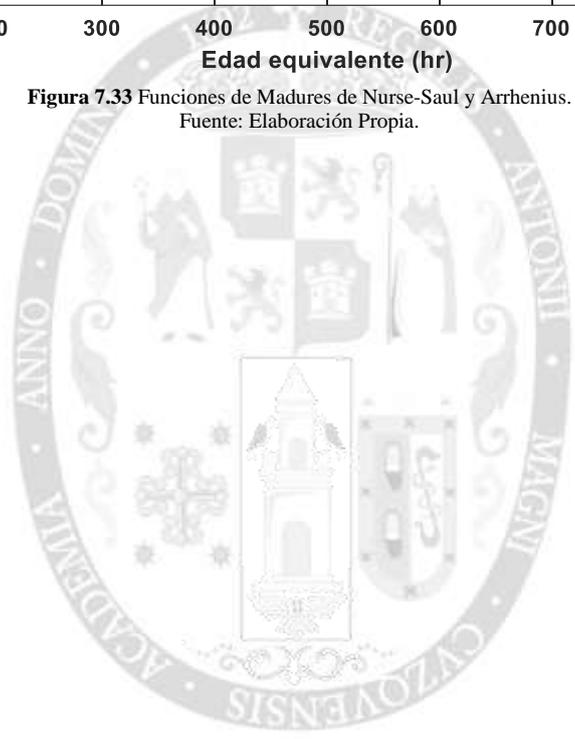




Tabla 7.26 Resumen de ecuaciones para la Función de madurez Nurse-Saul y Arrhenius.
Fuente: Elaboración Propia.

Edad (días)	Resistencia mecánica	Función de regresión	Función de Madurez Nurse-Saul.	R ²	Función de Madurez Arrhenius.	R ²
70	Resistencia a compresión	Logarítmico	$f'c = -204.841 + 54.476 \cdot \text{Log}(x)$	0.852	$f'c = -32.328 + 54.418 \cdot \text{Log}(x)$	0.850
		Hiperbólico (Inversa)	$f'c = 300.416 - 93387.392 \cdot \frac{1}{x}$	0.974	$f'c = 300.077 - 4470.021 \cdot \frac{1}{x}$	0.975
		Exponencial (Curva -S)	$f'c = e^{5.808 - \frac{646.584}{x}}$	0.980	$f'c = e^{5.805 - \frac{30.890}{x}}$	0.977
	Resistencia a flexión	Logarítmico	$Mr = -32.368 + 8.147 \cdot \text{Log}(x)$	0.814	$Mr = -7.285 + 8.036 \cdot \text{Log}(x)$	0.814
		Hiperbólico (Inversa)	$Mr = 41.137 - 11910.844 \cdot \frac{1}{x}$	0.976	$f'c = 41.081 - 573.193 \cdot \frac{1}{x}$	0.978
		Exponencial (Curva -S)	$Mr = e^{3.813 - \frac{633.231}{x}}$	0.992	$Mr = e^{3.810 - \frac{30.458}{x}}$	0.992
7	Resistencia a compresión	Logarítmico	$f'c = -604.666 + 113.639 \cdot \text{Log}(x)$	0.978	$f'c = -253.833 + 112.126 \cdot \text{Log}(x)$	0.974
		Hiperbólico (Inversa)	$f'c = 282.3123 - 82940.808 \cdot \frac{1}{x}$	0.988	$f'c = 282.369 - 3979.278 \cdot \frac{1}{x}$	0.990
		Exponencial (Curva -S)	$f'c = e^{5.923 - \frac{710.806}{x}}$	0.989	$f'c = e^{5.922 - \frac{34.010}{x}}$	0.986
	Resistencia a flexión	Logarítmico	$Mr = -88.335 + 16.381 \cdot \text{Log}(x)$	0.999	$Mr = -38.106 + 16.212 \cdot \text{Log}(x)$	0.998
		Hiperbólico (Inversa)	$Mr = 39.0512 - 10964.928 \cdot \frac{1}{x}$	0.970	$Mr = 39.008 - 527.857 \cdot \frac{1}{x}$	0.972
		Exponencial (Curva -S)	$Mr = e^{3.913 - \frac{679.280}{x}}$	1.00	$Mr = e^{3.910 - \frac{32.667}{x}}$	1.00

Tabla 7.27 Resumen de ecuaciones de mejor ajuste de correlación para la Función de madurez Nurse-Saul y Arrhenius.
Fuente: Elaboración Propia.

Edad (días)	Resistencia	Función de regresión	Función de Madurez Nurse-Saul.	R ²	Función de Madurez Arrhenius.	R ²
70	Compresión	Exponencial (Curva -S)	$f'c = e^{5.808 - \frac{646.584}{x}}$	0.98	$f'c = e^{5.805 - \frac{30.890}{x}}$	0.977
	Flexión	Exponencial (Curva -S)	$Mr = e^{3.813 - \frac{633.231}{x}}$	0.992	$Mr = e^{3.810 - \frac{30.458}{x}}$	0.992
7	Compresión	Exponencial	$f'c = e^{5.923 - \frac{710.806}{x}}$	0.989	Hiperbólico $f'c = 282.369 - 3979.278 \cdot \frac{1}{x}$	0.990
	Flexión	Exponencial (Curva -S)	$Mr = e^{3.913 - \frac{679.280}{x}}$	1.00	$Mr = e^{3.910 - \frac{32.667}{x}}$	1.00



CAPITULO 8. APLICACIÓN DEL MÉTODO DE MADUREZ.

8.1. Introducción.

En este capítulo se presentan los resultados de la aplicación del método de madurez en la inspección realizada in situ del pavimento rígido.

Una vez terminado el proceso de calibración de la mezcla y obtenida la ecuación que sirve para determinar la resistencia del concreto en el campo por medio del equipo de madurez, se procede a instrumentalizar con los Sensores Térmicos para evaluar la resistencia del pavimento. El método de madurez considera que muestras de una misma mezcla de concreto tendrán iguales resistencias con iguales valores de índice de madurez, aunque el historial de temperaturas internas varíe en el transcurso del tiempo.

El objetivo es la aplicación del método de madurez para ver el comportamiento físico mecánico del concreto in situ y situaciones reales a edades tempranas, relacionando los resultados obtenidos en la calibración de la mezcla de concreto (capítulo 6), siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM C-1074.

La aplicación del método consiste en:

1. Calcular el índice de Madurez de los elementos en estudio de acuerdo al historial de temperaturas internas del concreto y estimar la resistencia.
2. Se comparan las temperaturas internas del concreto en el sensor N°1 del tramo 1+145 y el sensor N°2 del tramo 1+050.
3. En cada tramo se registran datos a tres alturas distintas de la losa de pavimento, así como registro de temperatura de ambiente y de la capa base del pavimento.
4. Se estudia el índice de madurez en dos ubicaciones es igual, y el proceso de ganancias de resistencias es diferente de acuerdo a las condiciones de endurecimiento del concreto en la estructura del pavimento.



En la primera parte se describe el proyecto estudiado. En la segunda parte se determinó teóricamente la evolución del índice de madurez in situ, desde que el concreto se encuentra en su estado fresco, esto se hará basado en el método de madurez para estimar la resistencia aproximada en función del historial de temperatura del pavimento en estudio.

Para la calibración de la mezcla se realizará el análisis de validación del método, por medio de gráficos que muestran los valores de resistencia a compresión y flexión en cilindros y vigas curadas en campo, en las mismas condiciones ambientales del pavimento, dichos valores permitirán hacer un análisis de acuerdo a la norma que rige el método de madurez.

En la tercera parte se determina; las Temperaturas medidas directamente sobre el elemento.

Como resultado de la aplicación del método, se presentan gráficos comparativos que relacionan datos de temperatura, madurez y resistencia a diferentes edades en días, para las distintas alturas en el espesor del pavimento. Como ensayo complementario se realizó el ensayo destructivo extracción de núcleos de diamantina ASTM C 42 Y C 39.

8.2. Descripción del Proyecto.

8.2.1. Nombre del proyecto.

“Mejoramiento de la Transitabilidad Vehicular y Peatonal en la Av. Túpac Amaru entre el Jr. Mateo Pumacahua y el Bypass de la Prolongación Av. Túpac Amaru en el Distrito de Wanchaq, Provincia de Cusco-Cusco”

8.2.2. Naturaleza del Proyecto.

El presente proyecto está orientado a mejorar la transitabilidad de acuerdo a los estándares que manda el sector, afectan directamente en la calidad de la prestación del servicio de transporte.



8.2.3. Localización.

El proyecto se emplaza dentro de la zona urbana de la ciudad del Cusco en el distrito de Wanchaq, siendo esta una vía principal de articulación de la ciudad, la cual debido a los trabajos de instalación de nuevas redes de agua y desagüe han originado el deterioro de la carpeta de rodadura, siendo necesaria su rápida intervención y acondicionamiento urbano, con la finalidad de mejorar la calidad de vida de la población beneficiaria de la zona, así como del resto de la ciudad.

La zona de trabajo se ubica en la **Tabla 8.1**.

Tabla 8.1 Coordenadas del área de intervención.
Fuente: Elaboración Propia.

Coordenadas UTM 84			
Longitud	71°57'54"	X	176,085.82E
Latitud	13°22'06"	Y	8'503,836.87N

En el siguiente grafico se ilustra la ubicación geográfica:

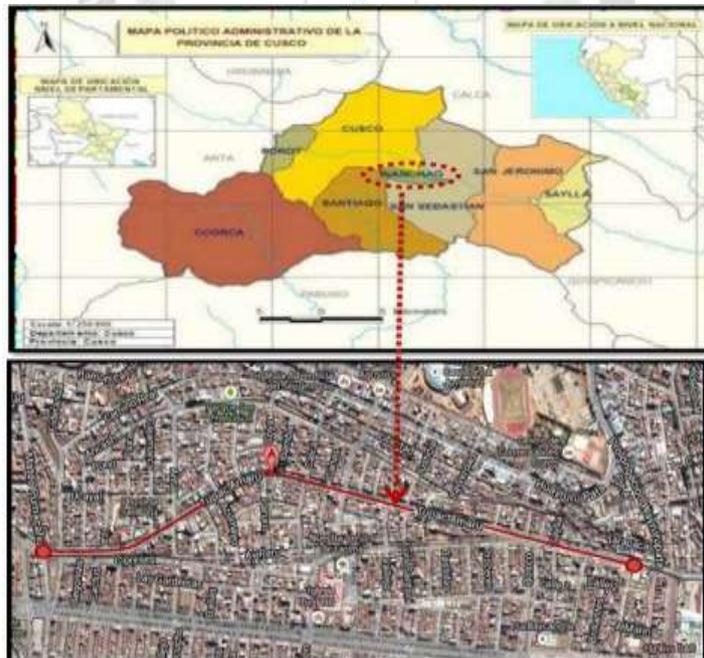


Figura 8.1 Ubicación del proyecto, Av. Tupac Amaru-Progresivas 1+000 a 1+280.
Fuente: Elaboración Propia.

El proyecto políticamente se ubica en el distrito de Wanchaq ver **Tabla 8.2**.



Tabla 8.2 Ubicación política.
Fuente: Elaboración Propia.

Dpto. / Región	Cusco
Provincia	Cusco
Distrito	Wanchaq
Localidad	Av. Túpac Amaru
Zona	Urbano

La Ubicación Geográfica del proyecto, se muestra en la **Tabla 8.3**.

Tabla 8.3 Ubicación geográfica de la av. Túpac Amaru.
Fuente: Elaboración Propia.

Región geográfica	Sierra
Altitud	3328 m s n m
Coordenadas Geográficas	
Latitud norte (UTM)	8502408
Longitud esta (UTM)	179622

8.3. Diseño de Mezcla y caracterización de los materiales.

El diseño de mezcla utilizado se muestra en la **Tabla 7.10** en el ítem 7.2.1. Cabe recalcar que el diseño de mezcla utilizado en la aplicación del método de madurez, es el mismo que se utilizó para la elaboración del índice de madurez (M1).

8.3.1. Control de características de materias primas

En esta etapa del planteamiento experimental se deberá verificar la procedencia de los materiales componentes del concreto y condiciones de elaboración del concreto in situ, que será un componente del plan de control de calidad global para este proyecto de investigación.

8.4. Estimación de la resistencia in-situ.

En esta etapa experimental se procedió como lo indicado en el ítem 3.9. Los sensores de temperatura fueron introducidos en el interior del concreto fresco y conectados al equipo de madurez. Se tuvo en cuenta las ubicaciones críticas en la estructura en términos de condiciones expuestas y requerimientos estructurales.



Con el fin de validar el método de madurez implementado en el laboratorio, se realizó mediciones de temperatura en el concreto puesto en obra, bajo condiciones no controladas de temperatura.

La resistencia a flexión del concreto a utilizar en el pavimento a evaluar es de $MR=36$ kg/cm² ($f'_c=245$ kg/cm²) y con una resistencia promedio de diseño de $f'_{cr}=285.2$ kg/cm².

8.4.1. Instrumentalización del tramo en estudio.

La etapa de la instrumentación en campo inicio el 19 de octubre a las 13:55 horas, en el tramo 1+145 y el 25 de octubre a las 11:20 horas del 2016, en el tramo 1+050, del sector III de la vía Tupac Amaru, la progresiva de análisis es a partir de 1+ 00 hasta 1+280, para un total de 280 metros lineales en dos sentidos de carril.

Para evaluar y monitorear la madurez en distintas zonas del pavimento, se colocaron dos equipos de madurez distanciados entre si 95.00 m; cada equipo posee cinco sensores de temperatura, tres colocados a diferentes profundidades de pavimento, una en la carpeta base del pavimento y la última expuesta a la intemperie.

Se explica en resumen el procedimiento empleado para la instrumentación:

Se anclan las grapas en forma de U en la capa base del pavimento, que servirán para controlar la profundidad y ubicación de los sensores. Cabe señalar que los cables ingresan por debajo del encofrado al ras de la base del pavimento. Las grapas se colocaron paralelas a la dirección de pavimentación junto con los sensores (Estación 1+050) para proporcionar estabilidad adicional al momento que el concreto se descargue sobre ellos.

Para la colocación de las grapas y sensores se siguió con la normativa de ACPA 2002 (American Concrete Pavement Association) que establece diferentes alturas de colocado de sensores en la losa de concreto. El primer sensor se colocó a 1" (2.5 cm) desde la superficie, la cual proporciona información útil para determinar el momento preciso de corte de las juntas, reduciendo las posibilidades de fisura; el segundo sensor se colocó al centro de la losa (a



7.5cm) y proporciona información de la resistencia temprana la cual dará criterios de control de calidad y de apertura al tráfico, el tercero en el último tercio del espesor del pavimento (a 2.5cm de la base) que proporciona información sobre los esfuerzos y temperaturas a esa profundidad para evaluar las diferencias que hay entre las ubicaciones, el cuarto y el quinto sensor fueron colocados en la carpeta base del pavimento a una profundidad -10.00 cm y en la intemperie respectivamente, con fin de evaluar los perfiles térmicos, luego se sujetaron los sensores con cintillos a las grapas y los cables.

Los sensores que se encuentran en el pavimento fueron colocados a 60.00 cm de los bordes de la losa y uno en la parte intermedia 225.00 cm del borde. Tal como se muestra en la

Figura 8.2 y Figura 8.3.

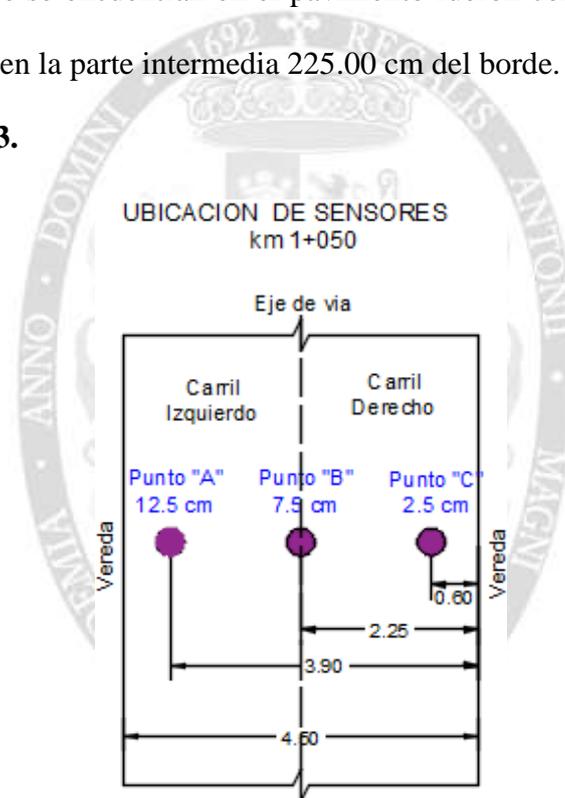


Figura 8.2 Ubicación en planta de los sensores en la Est. Km 1+050
Fuente: Elaboración Propia.



UBICACION DE SENSORES
km 1+145

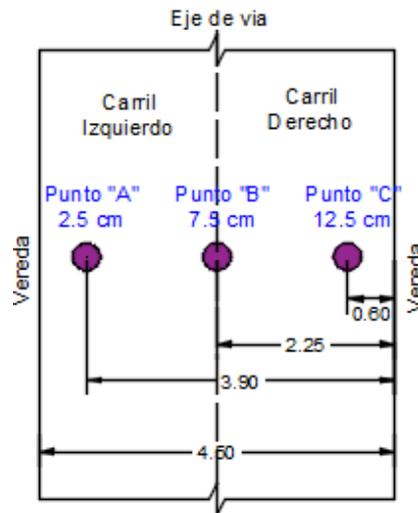


Figura 8.3 Ubicación en planta de los sensores en la Est. Km 1+145.
Fuente: Elaboración Propia.

Es importante mencionar que se alternaron las alturas de los sensores en cada estación de manera que el sensor colocado en el punto A de la estación 1+145 a 390.00 cm del borde derecho del pavimento y en la parte superior (a 12.50 cm de la rasante), en la segunda estación 1+050 se alternó (a 2.50 cm de la rasante). En el punto B en ambas estaciones se encuentra a 225 cm del borde derecho del pavimento (a 7.50 cm de la rasante) a la misma profundidad. En el punto C, en la estación 1+145 a 60 cm del borde derecho del pavimento y en la parte inferior (a 2.50 cm de la rasante). En la segunda estación 1+050 se alternó (a 12.50 cm de la rasante). En el punto D de la estación 1+145 a 220 cm del borde derecho del pavimento y en la rasante a -10.00 cm , en la segunda estación 1+050 se alternó a 60.00 cm del borde y a la misma profundidad. Esto para atender las variaciones de la temperatura en diferentes posiciones de la losa y establecer un parámetro de correlación promediada de madurez y resistencia en los diferentes posicionamientos.

En la **Tabla 8.4** , se presenta un cuadro resumen que muestra las posiciones y profundidades de los 10 sensores introducidos.



Tabla 8.4 Resumen de Ubicación de sensores de temperatura.
Fuente: Elaboración Propia.

Sensor	Profundidad medida a partir de base de Pavimento borde superior de losa	Localización lateral con respecto al borde derecho de la losa
Estación 1+145		Sensor N° 01
A	12,5 cm	390 cm
B	7,5 cm	225 cm
C	2,5 cm	60 cm
D	⁽²⁹⁾ -10 cm	225 cm
E	En el Ambiente	2.05 m. de altura
Estación 1+050		Sensor N° 02
A	2.5 cm	60 cm
B	7,5 cm	225 cm
C	12,5 cm	390 cm
D	-10 cm	225 cm
E	Ambiente	2.00 m. de altura

8.4.1. Elaboración de cilindros y vigas de concreta in situ.

Para validar el método de madurez, en la estación 1+145 se elaboró 12 vigas y 18 cilindros de concreto; en la estación 1+050 se elaboró 12 vigas y 12 cilindros de concreto con la misma mezcla. Las cuales fueron curadas en las mismas condiciones de la estructura del pavimento de acuerdo a la norma ASTM C 31, MTC E 723.

Esta etapa de elaboración de especímenes curados en campo es importante para validar la relación índice de madurez y resistencia realizada en laboratorio. Esto con el fin de tener un parámetro de comparación con las mismas condiciones de los elementos de la estructura del pavimento ensayados y los elementos a los que se les registra la temperatura.

8.4.2. Control de Calidad en el concreto Fresco.

Inmediatamente después de la instalación de los sensores, el camión concretero descargo una porción de concreto para el Control de Calidad y se evaluó el asentamiento,

⁽²⁹⁾ Estas se encuentran en la carpeta base del pavimento.



temperatura, porcentaje de aire, Peso unitario y rendimiento tal como se muestra en la **Tabla**

8.5 , Figura 8.4 , Figura 8.5 , Figura 8.6 , Figura 8.7, Figura 8.8 y Figura 8.9.

Tabla 8.5 Resumen de resultados del concreto en estado fresco.
Fuente: Elaboración Propia.

Estación	N° bachada	Contenido de Aire (%)	Temperatura		Asentamiento (Pulgadas)	Peso Unitario (Kg/m ³)	Rendimiento
			Concreto (°C)	Ambiente (°C)			
1+145	01	2.0	24.00	20	3.0	2391.48	1.21
	02		24.56	19.75			
	03		25.00	19.94			
1+050	01	2.2	23.61	25.3	3.5	2387.99	1.21
	02		25.14	25.8			
	03		20.69	26.05			



Figura 8.4 Temperatura del concreto en estado fresco.
Fuente: Elaboración Propia.



Figura 8.5 Asentamiento del concreto en estado fresco
Fuente: Elaboración Propia.



Figura 8.6 Peso Unitario del concreto en estado fresco.
Fuente: Elaboración Propia.



Figura 8.7 Contenido de aire del concreto en estado fresco.
Fuente: Elaboración Propia.



Figura 8.8 Asentamiento del concreto estación 1+145.
Fuente: Elaboración Propia.



Figura 8.9 Asentamiento del concreto estación 1+050.
Fuente: Elaboración Propia.



8.4.1. Elaboración de especímenes de concreto en Obra.

Para validar el método de madurez, en cada estación se elaboró vigas y cilindros con la misma mezcla. Las cuales fueron curadas en las mismas condiciones de la estructura del pavimento de acuerdo a la norma ASTM C 31, MTC E 723.

Los cilindros de concreto fueron elaborados para cada edad de rotura los cuales fueron fallados a las edades de tres, ocho, 15, 22, 35 y 43 días; las vigas de concreto fueron elaborados para las edades de falla de tres, ocho, 15 y 35; días para la Estación 1+145.

Para la estación 1+050, los cilindros de concreto fueron elaborados para las edades de falla de tres, nueve, 16, y 29 días; las vigas de concreto fueron elaborados para las edades de falla de tres, nueve, 16 y 29 días.

Esta etapa de elaboración de especímenes curados en campo es importante para validar la relación índice de madurez y resistencia realizada en laboratorio, con el fin de tener un parámetro de comparación con las mismas condiciones de los elementos de la estructura del pavimento ensayados y los elementos a los que se les registra la temperatura.

8.4.2. Historial de temperatura.

En la **Figura 8.10** se presenta la evolución de las temperaturas internas del pavimento y en la **Figura 8.11** se muestra el historial de temperatura ambiente y temperatura de la sub-rasante.

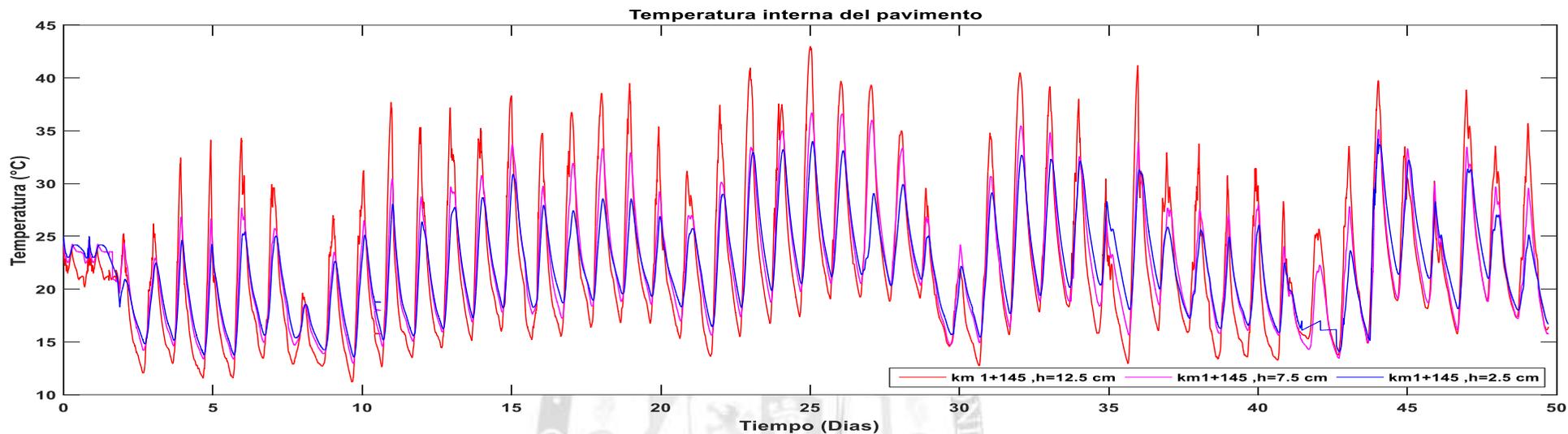


Figura 8.10 Registro de Temperatura interna del concreto.

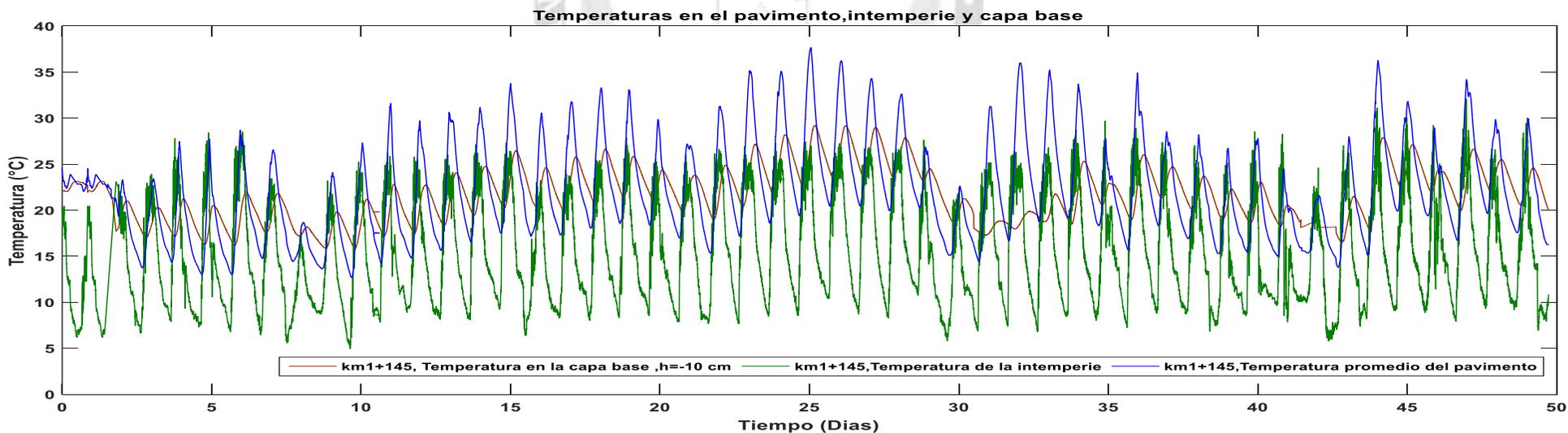


Figura 8.11 Registro de la Temperatura promedio del concreto, Rasante y la Intemperie.



En la **Figura 8.10** se muestra la temperatura interna del concreto que se desarrolla en las diferentes alturas del espesor del pavimento en la Estación 1+145,. En los distintos puntos de ubicación la temperatura no es la misma, esto se debe a la posición de cada uno de los sensores, lo que significa que en una estructura la temperatura interna del concreto varía según la localización, exposición y forma del elemento, que nos permite determinar una curva promedio de este comportamiento. La temperatura máxima alcanzada fue $43 \text{ }^\circ\text{C}$ y la temperatura mínima fue de $11.2 \text{ }^\circ\text{C}$ que se producen en el sensor superior del pavimento.

En la **Figura 8.11** se puede apreciar el comportamiento del concreto, en la carpeta base del pavimento punto D (-10.00 cm) curva promedio y curva del comportamiento a la intemperie, así mismo puede verse que los perfiles térmicos de la intemperie y la carpeta base presentan un diferente comportamiento para los 43 días. Dentro de los siete primeros días, el historial de temperatura de la intemperie y la carpeta base presenta un comportamiento similar para las horas del mediodía con un diferencial térmico similar. La temperatura máxima alcanzada de la intemperie fue de 32.10°C la mínima fue de $4.94 \text{ }^\circ\text{C}$, la temperatura máxima alcanzada de la carpeta base fue de $29.19 \text{ }^\circ\text{C}$ y la mínima de 15.88°C .

8.4.3. Medición del índice de Madurez.

De acuerdo a las ecuaciones mostradas en la **Tabla 7.25** del capítulo 7, se evalúa la madurez del concreto con las siguientes funciones de madurez:

Función de madurez de Arrhenius, ecuación de resistencia a compresión.

$$f'_c = e^{5.805 - \frac{30.890}{x}} \quad \text{Ecuación 8.1}$$

Función de madurez de Arrhenius, ecuación de resistencia a flexión.

$$Mr = e^{3.810 - \frac{30.458}{x}} \quad \text{Ecuación 8.2}$$

En la **Figura 8.12** se muestra como fueron extraídos los datos almacenados en la memoria del equipo de madurez N° uno, de la estación 1+050.



Figura 8.12 Extracción de datos del equipo N° 01
Fuente: Elaboración Propia.

En la **Figura 8.13** se muestra como fueron extraídos los datos almacenados en la memoria del equipo de madurez N° dos, de la estación 1+145.



Figura 8.13 Extracción de datos del equipo N° 02
Fuente: Elaboración Propia.

8.4.1. Validación del índice de madurez.

Como resultado de la aplicación del método de madurez, se presentan graficas comparativas que relacionan datos del índice de madurez – resistencia a flexión y compresión simple de especímenes ensayados in-situ.

8.5. Comparación de las resistencias pronosticadas con el índice de madurez in situ.

Para la validación de las resistencias estimadas por el método de madurez, se elaboran especímenes de concreto que deberán curarse bajo las mismas condiciones de la estructura, de acuerdo a la norma ASTM C 31, MTC E 723 los valores obtenidos se compararon con los valores de resistencia por el método de madurez de acuerdo al siguiente criterio : si los



promedios de resistencia de los especímenes para cada edad de ensayo están fuera del $\pm 10\%$ de la resistencia obtenida por el método de madurez, se deberán realizar revisiones en cuanto a la reproducción de la mezcla y procedimientos al momento de elaborar y ensayar los cilindros, si no se encuentran factores que hayan influido en los valores de resistencia, entonces la mezcla deberá ser calibrada nuevamente, ya que esta no sería válida.

El índice madurez del pavimento rígido en estudio se determinó para cada minuto durante los 49 días para la estación 1+145 y 43 días para la estación 1+050.

En las **Tablas 8.6, 8.7, 8.8 y 8.9** se presentan los resultados de índice de madurez para las funciones de madurez de Nurse-Saul y Arrhenius junto con los resultados de ensayo a compresión.

En las **Figura 8.14, 8.15, 8.16, y 8.17** se observa los resultados de la predicción de resistencias y con los resultados de ensayo a compresión.

Los valores presentados han sido graficados y comparados con la relación resistencia-madurez previamente establecida en la Fase de Laboratorio.

Tabla 8.6 f'_c Edad Equivalente para Resistencia a Compresión Función de Madurez Arrhenius.
Fuente: Elaboración Propia.

Est. Km.	Edad Equivalente Para el pavimento			f'_c Pronosticadas			f'_c Reales (Kg/cm ²)	
	Días	h= 12.5cm (Hr)	h=7.5cm (Hr)	h=2.5cm (Hr)	h=12.5cm (Kg/cm ²)	h=7.5cm (Kg/cm ²)		h=2.5cm (Kg/cm ²)
1+145	3	63.37	66.82	66.58	229.54	233.18	232.94	156.53
	8	164.56	167.74	166.87	272.91	273.43	273.29	225.88
	15	318.82	317.52	313.94	286.06	286.00	285.84	255.55
	22	496.25	491.30	481.06	291.07	290.98	290.78	260.66
	35	851.57	837.02	818.30	294.83	294.74	294.61	261.65
	43	1025.48	1010.40	990.94	295.72	295.65	295.57	263.30
1+050	3	62.69	69.48	65.86	228.77	235.74	232.21	212.86
	9	182.37	205.16	206.62	275.57	278.29	278.44	253.23
	16	347.59	386.27	392.58	287.22	288.50	288.69	259.23
	29	704.81	762.99	760.34	293.73	294.22	294.20	265.73

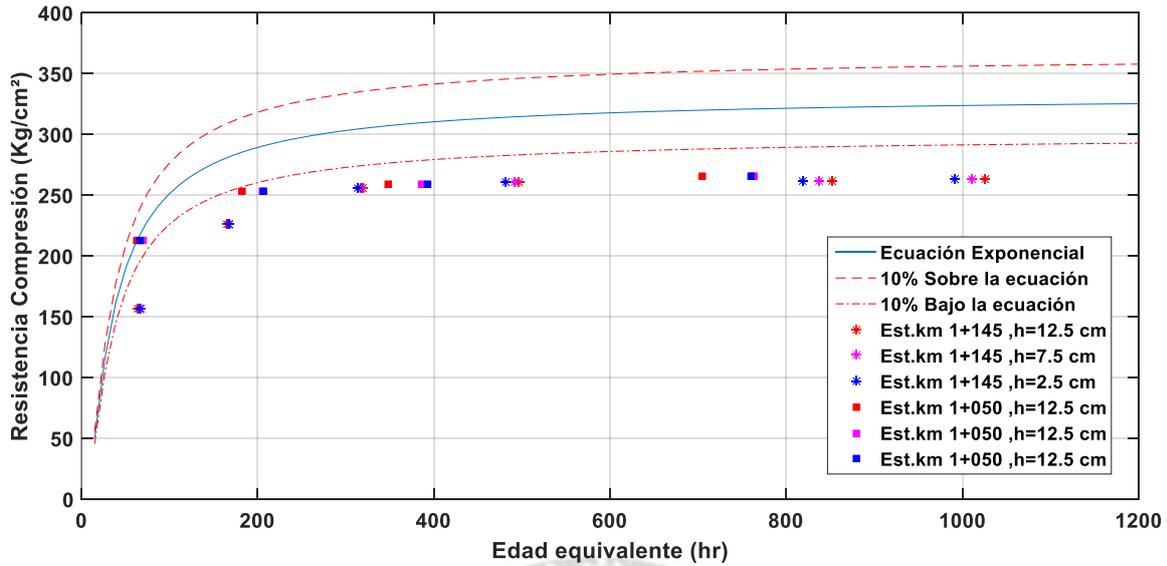


Figura 8.14 Verificación de la Función de Madurez de Arrhenius – Resistencia Compresion.
Fuente: Elaboración Propia

En la **Figura 8.14** se comparan los valores de resistencia a compresión de los cilindros curados en campo de la estación 1+145 con el $\pm 10\%$ de la Función de Madurez obtenida por el método de madurez de Arrhenius.

Tabla 8.7 f'_c Edad Equivalente para Resistencia a Flexión Función de Madurez Arrhenius.
Fuente: Elaboración Propia.

Est.Km	Edad Equivalente Para el pavimento			f'_c Pronosticadas			f'_c Reales (Kg/cm ²)	
	Días	h= 12.5cm (Hr)	h=7.5cm (Hr)	h=2.5cm (Hr)	h=12.5cm (Kg/cm ²)	h=7.5cm (Kg/cm ²)		h=2.5cm (Kg/cm ²)
1+145	3	63.44	66.88	66.64	32.05	32.51	32.48	30.75
	8	164.63	167.81	166.93	37.60	37.67	37.65	44.23
	15	318.92	317.59	314.00	39.28	39.28	39.26	50.70
	35	851.66	837.12	818.41	40.41	40.40	40.38	51.28
1+050	3	62.84	69.66	66.08	31.96	32.85	32.41	42.73
	9	184.96	208.53	210.72	37.98	38.33	38.36	49.38
	16	347.73	386.43	392.80	39.43	39.60	39.62	50.65
	29	681.94	740.34	739.06	40.24	40.31	40.31	51.85

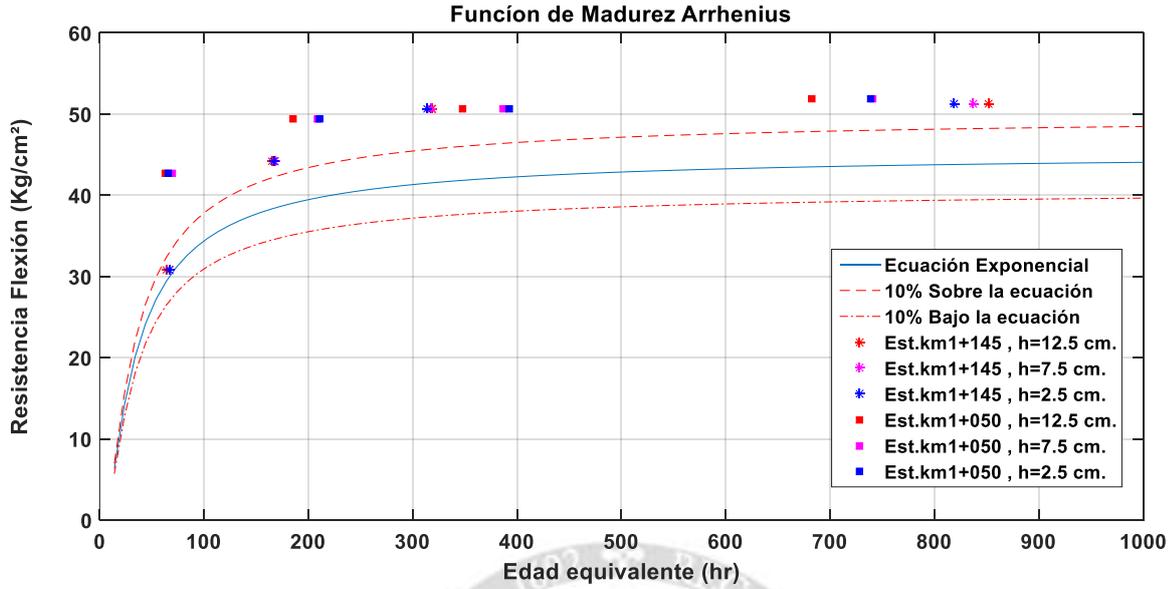


Figura 8.15 Verificación de la Función de Madurez de Arrhenius – Resistencia a Flexión. Fuente: Elaboración Propia.

8.5.1. Validación de método de madurez por Nurse -Saul.

Tabla 8.8 f'_c Factor Tiempo Temperatura para Resistencia a Compresión Función de Madurez Nurse-Saul. Fuente: Elaboración Propia.

Est. Km.	Días	Factor temperatura Tiempo			f'_c Pronosticadas			f'_c Reales (Kg/cm ²)
		h=2.5cm (Hr.°C)	h=7.5cm (Hr.°C)	h=12.5cm (Hr.°C)	h= 2.5cm (Kg/cm ²)	h=7.5cm (Kg/cm ²)	h=12.5cm (Kg/cm ²)	
1+145	3	1443.55	1527.45	1521.53	235.72	239.28	239.04	156.53
	8	3679.46	3802.72	3791.23	275.04	275.86	275.78	225.88
	15	7082.55	7180.25	7124.89	287.23	287.41	287.31	255.55
	22	11001.68	11098.04	10934.65	291.93	292.00	291.88	260.66
	35	18741.61	18789.95	18519.72	295.43	295.45	295.37	261.65
	43	22621.07	22714.63	22436.34	296.29	296.30	296.25	263.30
1+050	3	1421.86	1566.85	1484.92	234.74	240.81	237.53	234.74
	9	4137.85	4630.09	4607.65	277.85	280.25	280.15	277.85
	16	7902.81	8700.23	8715.26	288.60	289.68	289.70	288.60
	29	15962.00	17069.65	16785.03	294.57	294.95	294.85	294.57

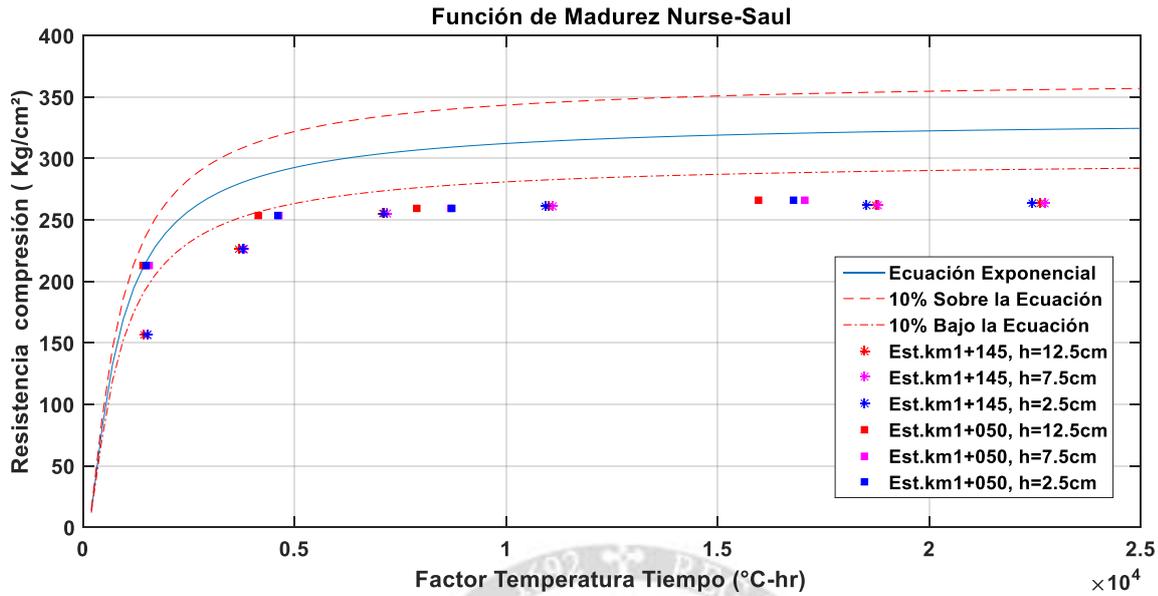


Figura 8.16 Verificación de la Función de Madurez de Nurse-Saul Compresion.
Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 8.9 f'_c Edad Equivalente para Resistencia a Flexión Función de Madurez de Nurse-Saul.
Fuente: Elaboración Propia.

Est. Km.	Edad Equivalente Para el pavimento			f'_c Pronosticadas			f'_c Reales (Kg/cm ²)	
	Días	h=2.5cm (Hr. °C)	h=7.5cm (Hr. °C)	h=12.5cm (Hr. °C)	h=2.5cm (Kg/cm ²)	h=7.5cm (Kg/cm ²)		h=12.5cm (Kg/cm ²)
1+145	3	1445.11	1528.86	1522.90	32.89	33.35	33.32	30.75
	8	3681.07	3804.25	3792.72	37.90	38.01	38.00	44.23
	15	7084.42	7181.78	7126.24	39.46	39.48	39.47	50.70
	35	18743.83	18792.17	18522.06	40.50	40.50	40.49	51.28
1+050	3	1425.35	1570.98	1489.87	32.78	33.56	33.14	42.73
	9	4197.45	4705.94	4695.69	38.30	38.61	38.60	49.38
	16	7905.93	8703.79	8719.87	39.63	39.77	39.77	50.65
	29	15439.24	16554.11	16303.97	40.37	40.42	40.41	51.85

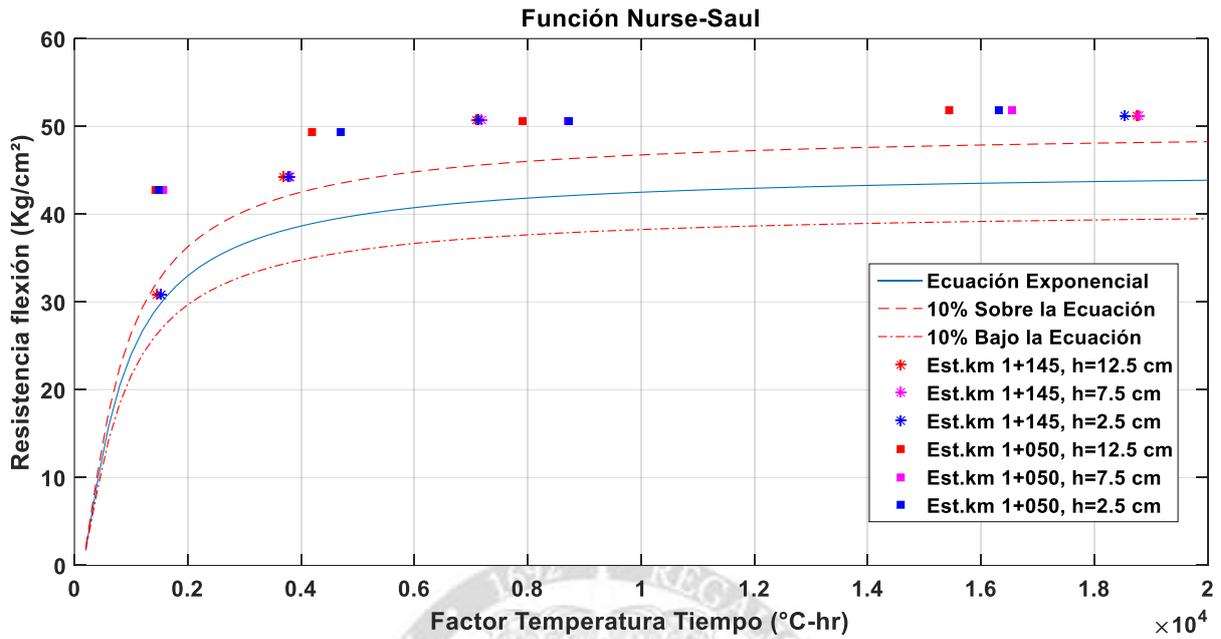


Figura 8.17 Verificación de la Función de Madurez de Nurse Saul – Resistencia flexión. Fuente: Elaboración Propia.

Los asteriscos y cuadrados indican la resistencia de los cilindros curados en campo mediante la ASTM C31 ensayados a su respectiva edad como indican en las tablas, las líneas punteadas indican la máxima desviación permitida para considerar válida dicha curva.

El par de cilindros ensayados a los tres días muestra una resistencia de 156.53 kg/cm^2 , por lo que existe una diferencia porcentual de 35% respecto al estimado por el método de madurez y de 11.44% al límite inferior.

Los cilindros de concreto curado en laboratorio y ensayados a siete días para la elaboración del índice de madurez en laboratorio, tienen una resistencia promedio de 251.87 kg/cm^2 ; sin embargo, los cilindros curados en campo para esa misma edad tienen una resistencia de 230.17 kg/cm^2 . Para el proceso de validación del método de madurez a la edad de siete días, tienen una diferencia de 20.8 kg/cm^2 , por lo que representa un porcentaje de variación de 10.1%, por consiguiente, al utilizar la relación resistencia-madurez original se está incrementando en más de 10% la resistencia real de la estructura in situ.



8.5.2. Ensayo de Extracción de Núcleos (diamantina).

Resultados de ensayos de diamantina se muestran en la **Tabla 8.10.**, la **Figura 8.18** y

Figura 8.19. Las características de las muestras extraídas se muestran en el Anexo F.

Tabla 8.10 Resultados de Ensayo a Compresión de Muestras Extraídas de Núcleos de concreto.
Fuente: Elaboración Propia.

Edad (días)	Factor de corrección	Área (cm ²)	Resistencia (KN)	Resistencia (kg/cm ²)	Resistencia corregida (kg/cm ²)	Resistencia promedio (kg/cm ²)	% de f'c
45	0.97	78.54	241.48	313.41	305.01		
39	0.98	78.54	233.61	303.20	295.92	303.28	123.79%
39	0.97	78.54	244.25	317.01	308.90		



Figura 8.18 Ensayo de extracción de Núcleos de Concreto del pavimento.
Fuente: Elaboración Propia.



Figura 8.19 Ensayo Compresión Simple en núcleos de concreto
Fuente: Elaboración Propia.



Tabla 8.11 Comparación de Resistencia Real de Núcleos de concreto y Resistencia estimada por el método de madurez.
Fuente: Elaboración Propia.

Descripción		Madurez promedio		Resistencia promedio estimada		Resistencia Real
Edad (días)	Estación	Nurse-Saul (°C-hr)	Arrhenius (hr)	Nurse-Saul	Arrhenius	Ensayo de Diamantina (Kg/cm ²)
45	1+145 Km	23687.10	1058.19	296.47	295.85	305.01
39	1+075 Km	21132.33	944.22	295.99	295.34	295.92
39	1+100 Km	21132.33	944.22	295.99	295.34	308.90

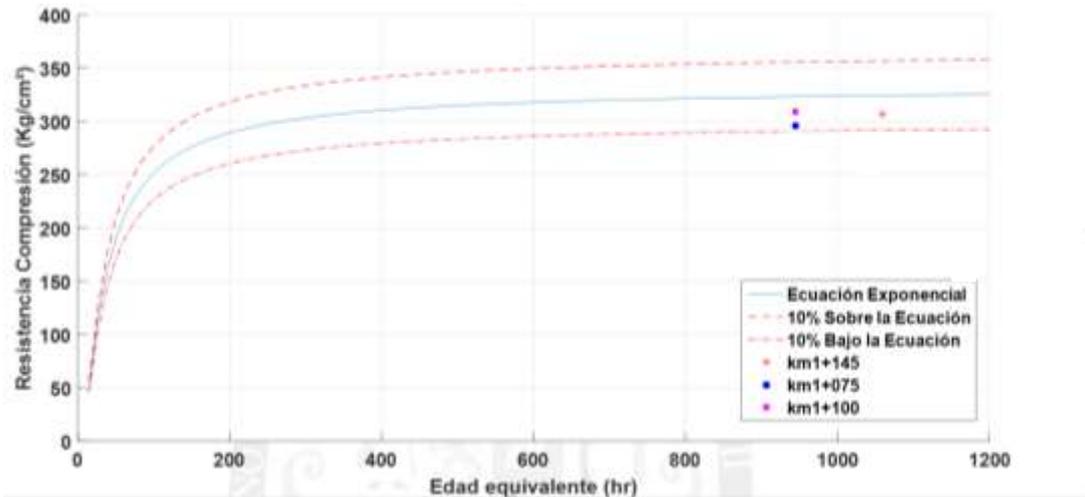


Figura 8.20 Verificación de la Función de Madurez de Arrhenius – Resistencia de Núcleos de concreto.
Fuente: Elaboración Propia.

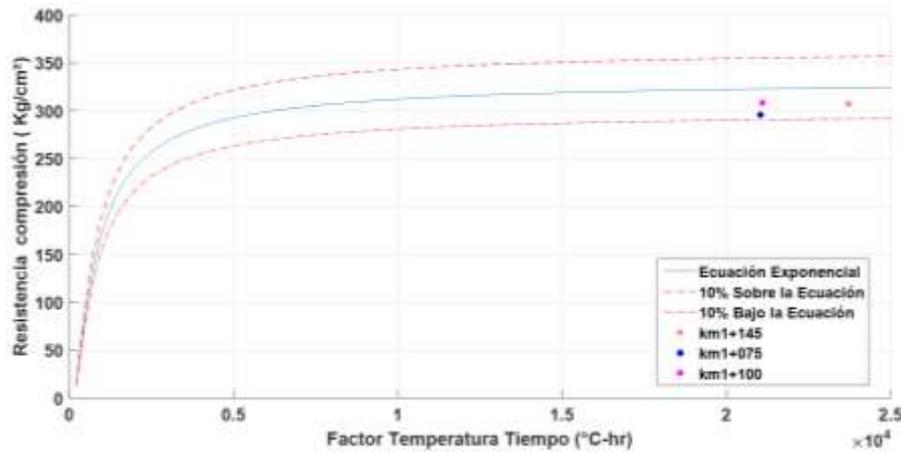


Figura 8.21 Verificación de la Función de Madurez Nurse-Saul– Resistencia de Núcleos de concreto.
Fuente: Elaboración Propia.



CAPITULO 9. PROPIEDADES TÉRMICAS.

9.1. Conductividad térmica.

La conductividad térmica es una propiedad de transporte de energía que puede ser en un sólido o en un fluido, mediante tres procesos distintos: conducción, convección y radiación. En este caso de estudio se analiza por conducción (pavimento de concreto) y que viene dada por la ley de Fourier estableciendo que, la densidad de flujo de calor "q", (cantidad de calor que atraviesa la unidad de superficie en la unidad de tiempo (W/m²) viene dada por:

$$\frac{Q}{A} = q = -k * dT/dx$$

Ecuación 9.1

Donde:

q=flujo de calor (W/m²)

k= Conductividad térmica (W/m.°C)

dT/dx = Gradiente térmico. (°C/m)

9.1.1. Flujo de calor.

La radiación (flujo de calor) que cae en el pavimento durante el periodo de estudio (19/10/2016 al 08/12/2016) se muestra en la **Figura 9.1**, estos datos fueron proporcionados por la Estación Meteorológica de Perayoc. Los datos de radiación están comprendidos en el horario de 5:30:00 a 18:15:00 horas, presentando un valor máximo de 1499 w/m² a las 11:00:00 hora.

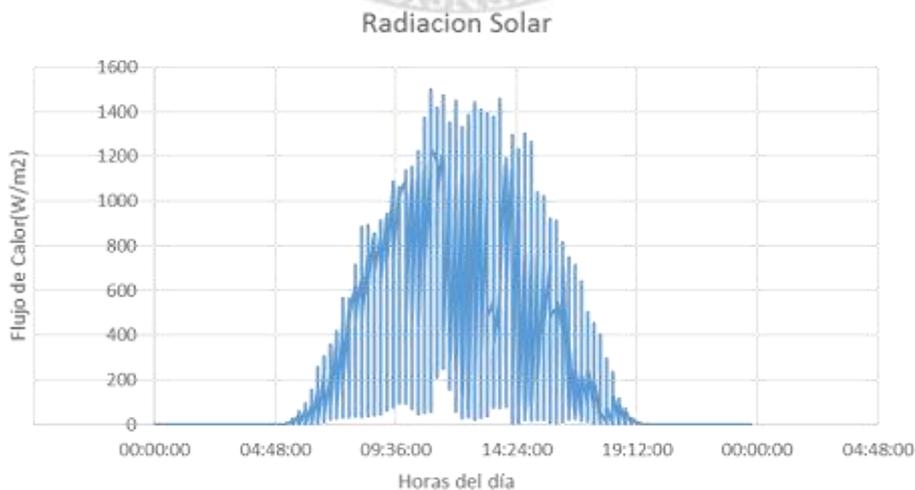


Figura 9.1 Radiacion solar en las horas del dia.
Fuente: Elaboracion Propia.



Para el análisis de la conductividad térmica del concreto a las 12:00:00 horas durante el periodo de estudio y en base al gradiente térmico analizados en la estación 01 (figura 9.3 y 9.5), se muestra en la **Figura 9.2** la variación de la conductividad térmica del concreto.

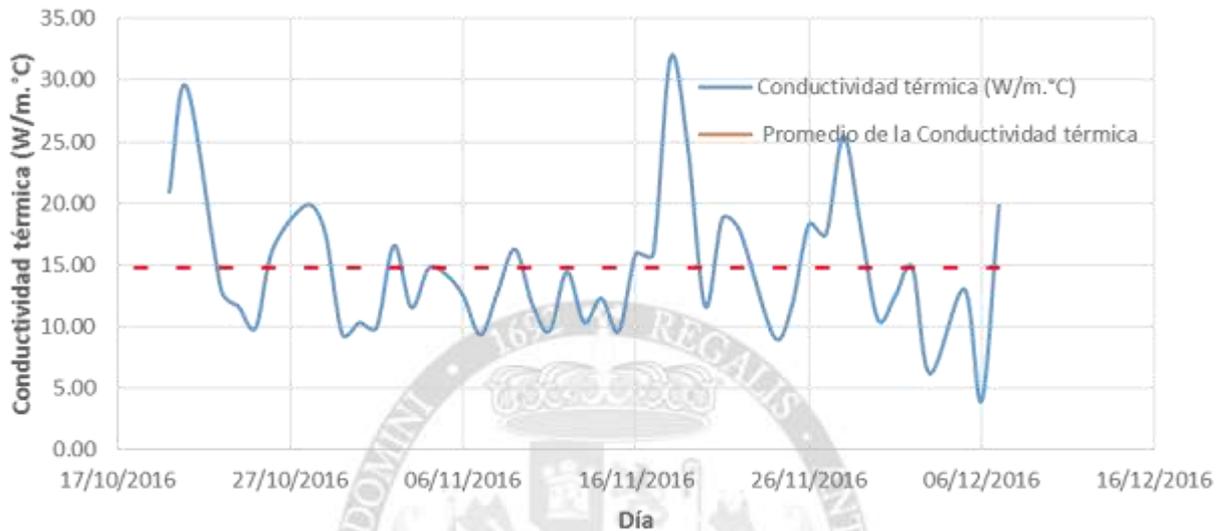


Figura 9.2 Variación de la conductividad Térmica.
Fuente: Elaboración Propia.

En la **Figura 9.2** se considera que toda la radiación que cae sobre la superficie del pavimento es absorbida por este, por lo que se tiene valores muy altos de conductividad térmica.

La conductividad de un concreto depende de factores principalmente de su densidad y humedad, pudiendo encontrarse entre rangos comprendidos entre 1.21-3.11 kcal/h.m.°C (1.41-3.62 W/m. °C); en la presente investigación el promedio de conductividad térmica es de 14.71 W/m.°C para una radiación promedio de 972.60 W/m², el pavimento absorbe solo un porcentaje de radiación y lo demás se refleja, comprendidos para el rango de conductividad en un 9.59%-21.14% .

9.2. Gradiente térmico.

Los cambios en la temperatura ambiente originan variaciones en la temperatura a distintas profundidades de la losa.



El gradiente de temperatura varía con las oscilaciones de las temperaturas diarias y estacionales, provocando una desigual dilatación o contracción de la masa de concreto según su distancia a la superficie de la misma, dando como resultado el alabeo de la losa tanto en el proceso constructivo (alabeo constructivo) o como aquello por la historia de temperatura y humedad. Este movimiento está parcialmente impedido por el peso propio, fricción de apoyo y reacciones en los dispositivos de transmisión de cargas entre losas, lo cual provoca "tensiones"; el alabeo altera el régimen de contacto de la losa con la subrasante, pudiendo aumentar las tensiones producidas por la acción de las cargas.

Durante el día, se produce el máximo gradiente positivo. La losa se deforma arqueando los bordes hacia abajo. Es decir, tienden a una forma convexa cuando por efecto de insolación la temperatura en la superficie se eleva por sobre la de su base. Durante la noche, especialmente de madrugada, ocurre lo contrario y la losa se deforma arqueando los bordes hacia arriba. Es decir, cuando el sol declina y la temperatura superficial desciende, las losas tienden a una forma cóncava por levantamiento relativo de los bordes respecto al centro que permanece apoyado.

9.2.1. Alabeo Diurno

Se consideran los Δt positivos entre la fibra superior e inferior de la losa, que producen Tracción en la fibra inferior de la Losa **Figura 9.3.**

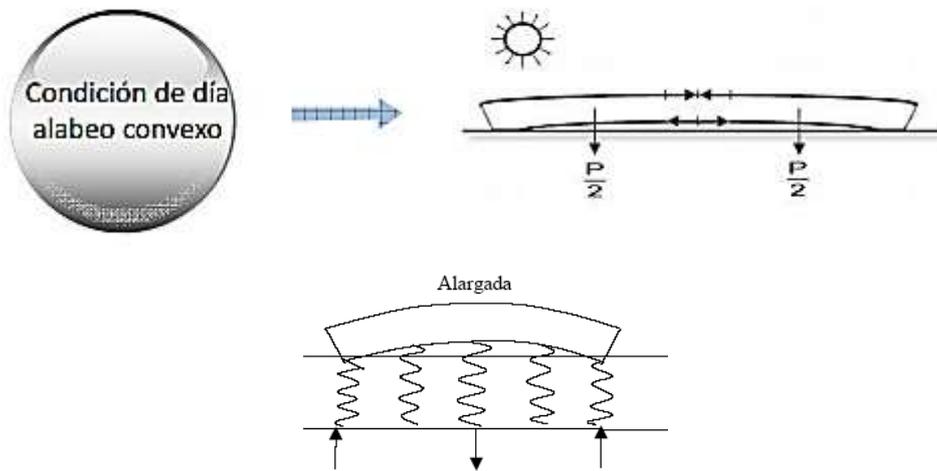


Figura 9.3 Condición de día en Losa. Fuente: Instituto del cemento Portland Argentino.

9.2.2. Alabeo Nocturno

Se consideran los Δt negativos entre la fibra superior e inferior de la losa, que producen Tracción en la fibra Superior de la Losa **Figura 9.4**.

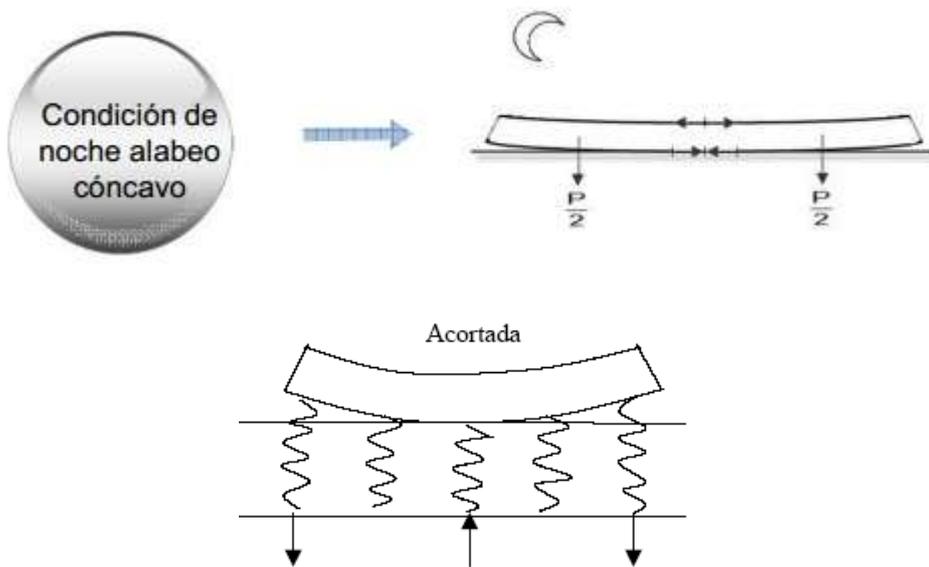


Figura 9.4 condición de noche para losa. Fuente: Instituto del cemento Portland Argentino.

9.2.3. Gradientes del Concreto en Campo

Para el cálculo de alabeo por temperatura se toman en cuenta los diferenciales de temperatura entre la parte superior e inferior de la losa, con este fin en el pavimento se colocaron sensores ha alturas de 2.5 cm y 12.5 cm medidos desde la base de la losa.



De los sensores superior (12.5 cm) e inferior (2.5 cm) se analizaron las lecturas de temperatura durante un periodo de 49 días para la estación 1+145 y 43 días para la estación 1+050.

Para encontrar los valores de gradiente térmico es necesario realizar la diferencia entre las temperaturas de las temperaturas superiores e inferiores de la losa para el mismo tiempo y graficarse durante el periodo de estudio deseado, tomando en cuenta que por definición cuando las mayores temperaturas se dan en la superficie del pavimento los gradientes son positivos y de manera inversa.

En la **Figura 9.5** y **Figura 9.6** se muestra el gradientes térmicos para el pavimento de espesor de 15.00 cm, en las estaciones 1+145 y 1+050 km. Para los 43 y 49 días de toma de datos en campo.

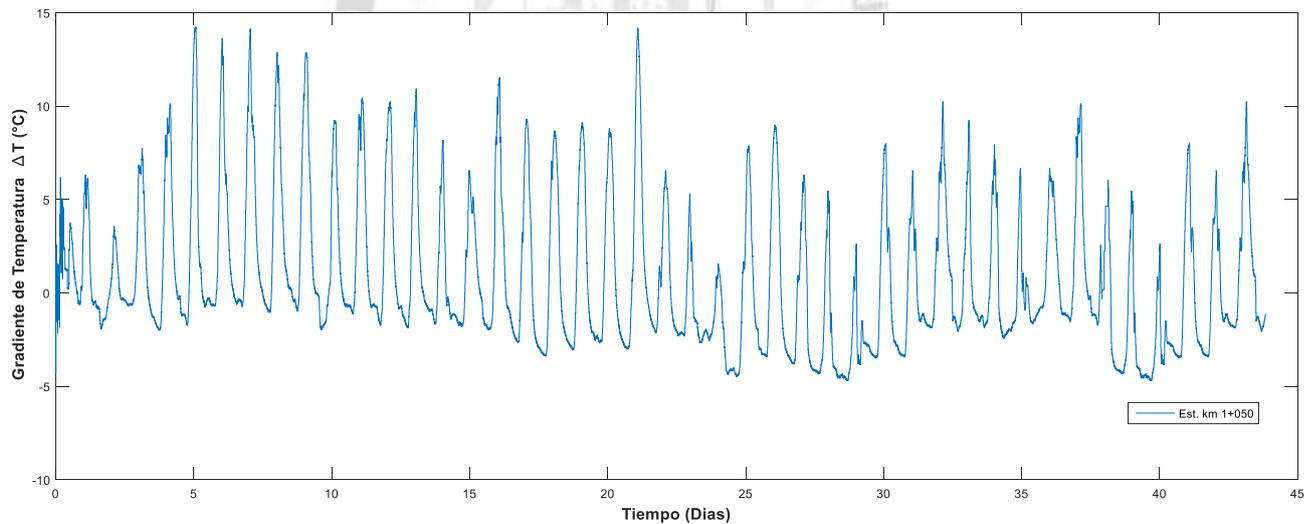


Figura 9.5 Gradiente térmico en la estación 1+050.
Fuente: Elaboracion Propia.

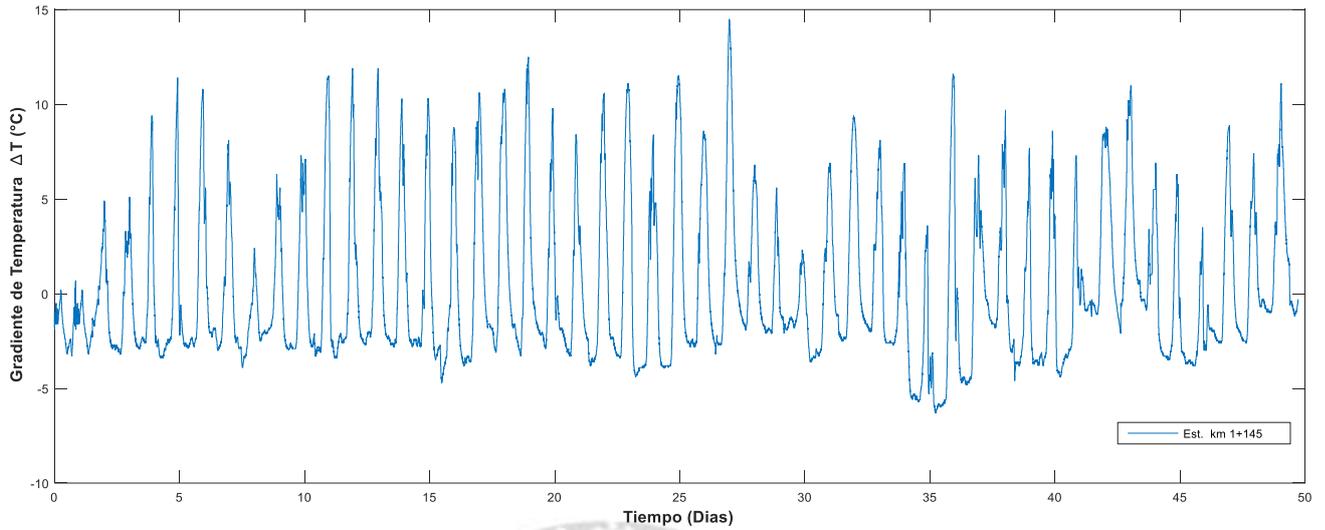


Figura 9.6 Gradiante termico en la estacion 1+145.
Fuente: Elaboracion Propia.

En la **Figura 9.7** y **Figura 9.8** se muestra envolvente del gradiente térmico para un pavimento de espesor de 15.00 cm, en las estaciones 1+145 y 1+050 km.



Figura 9.7 envolvente gradiente termico estacion 1+145.
Fuente: Elaboracion Propia.

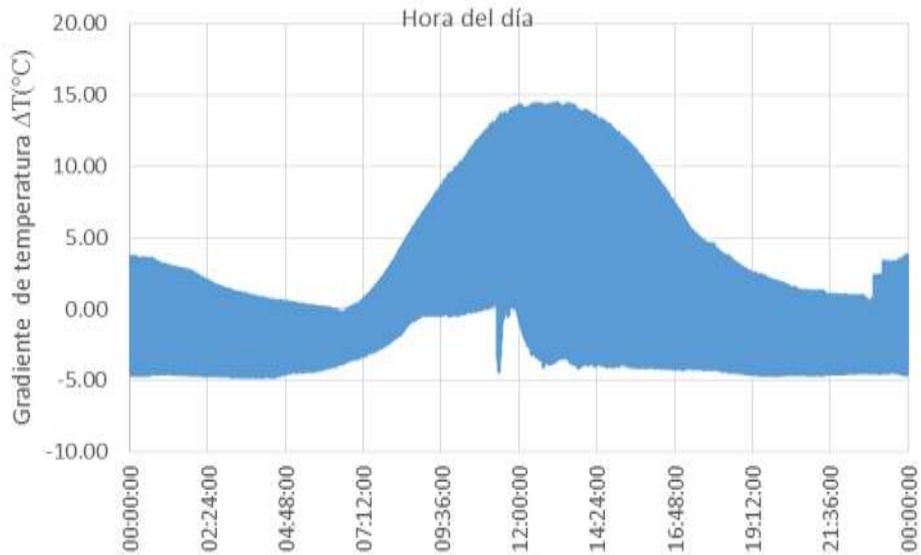


Figura 9.8 envoltura gradiente termico estacion 1+050.
Fuente: Elaboracion Propia.

De las gráficas anteriores se observa que el máximo gradiente térmico es de 14.50 °C a las 13:30:00 horas del día; para temperaturas de ambiente mayores a 30 °C donde se producen gradientes mayores a 12 °C.

En la **Figura 9.9** se muestra una envoltura térmica de la temperatura de ambiente durante las 24 horas del día.

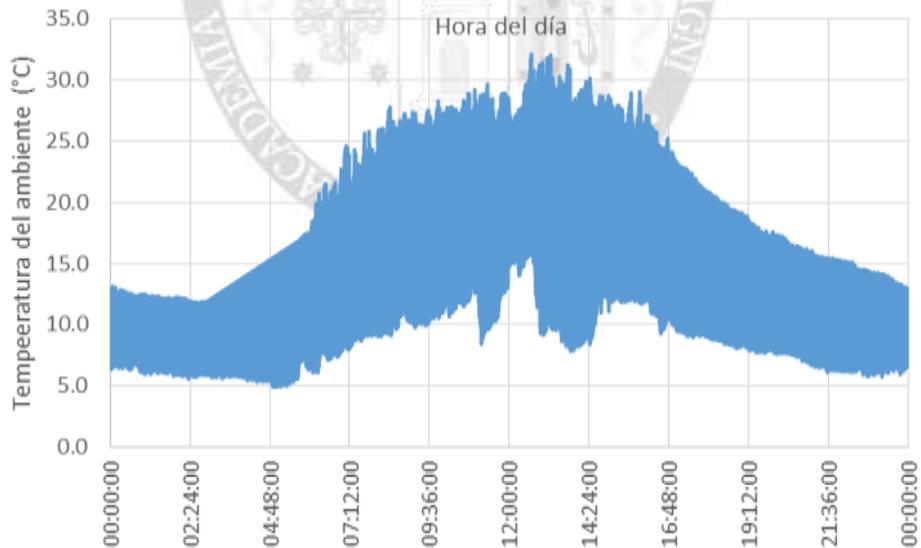


Figura 9.9 Envoltura termica del medio ambiente.
Fuente: Elaboracion Propia.

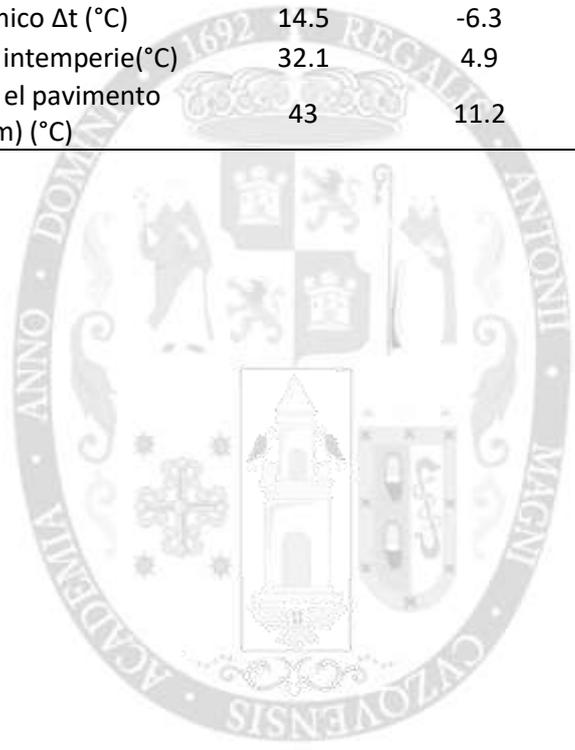


En la **Figura 9.9** muestra que las temperaturas máxima registrada es de 32.1 °C correspondiente en promedio a la 13:00:00 Horas del día, cabe mencionar que se presentan temperaturas mayores de 30 °C en horarios comprendido de 12:39:00 – 13:47:00.

En la **Tabla 9.1** se muestra un resumen de temperaturas y gradientes que se registraron en las 2 estaciones de estudio.

Tabla 9.1 valores mínimos y máximos de Temperaturas.
Fuente: Elaboración Propia.

	Estación 1(km 1+145)		Estación 2(km 1+050)	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
Gradiente térmico Δt (°C)	14.5	-6.3	14.25	-4.69
Temperatura de la intemperie(°C)	32.1	4.9	32.44	5.5
Temperaturas en el pavimento (h=12.5 cm) (°C)	43	11.2	40.19	12.06





CAPITULO 10. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.

10.1. Análisis de resultados

De los resultados de la caracterización de materias primas, en los elementos pétreos en la tabla 7.5 se muestra que para el agregado fino se tiene que el porcentaje de finos que pasa la malla N°200 supera el 5% estipulado para concretos sujetos a abrasión y el módulo de fineza no se encuentra comprendido entre 2.3 - 3.1 ; para el caso de agregado grueso en la tabla 7.6 se observa que el porcentaje de finos que pasa la malla N°200, no supera el 1% . En el ensayo de abrasión no supera el 40%(Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción -2013) menos aun el 50% (Norma de Pavimentos Urbanos). De los ensayos químicos realizados a los agregados mostrados en la tabla 7.4 en ningún caso se supera los límites establecidos por el EG-2013(Especificaciones Técnicas Generales para la Construcción) ni lo establecido RNE-CE.010 (Norma de Pavimentos Urbanos). El agua utilizada se encuentra dentro de los parámetros de acuerdo a la tabla 7.9, excepto la cantidad de sulfatos supera la máxima permisible de 300 ppm con valor de 568.90 sulfatos ppm.

Para determinar la relación del índice de madurez y resistencia a compresión, se presentan el análisis de resultados de las campañas experimentales.

Los estudios en laboratorio muestra que la resistencia a compresión del concreto a la edad de un día ha desarrollado un 17.52% ($42,93 \text{ Kg/cm}^2$) de la resistencia de diseño, a la edad de siete días alcanza su resistencia de diseño con 102,80% ($251,87 \text{ Kg/cm}^2$) y a la edad de 28 días, tiene un porcentaje de 119.33% ($292,35 \text{ Kg/cm}^2$), así mismo, la resistencia a flexión a la edad de un día ha desarrollado un 17.58% (6.33 Kg/cm^2) de la resistencia de diseño, a la edad de siete días alcanza su resistencia de diseño con 108.81% (39.17 Kg/cm^2) y a la edad de 28 días, tiene un porcentaje de 110.71% (39.86 Kg/cm^2), la evolución del módulo de rotura a edades tempranas alcanza el módulo de rotura de diseño, siendo útil para pavimentos fast-track, ya que permitirá la solicitaciones de cargas altas a edades iniciales.



El tipo de falla que se presentó en todas las vigas ensayadas ocurrieron en el tercio medio de la luz de forma vertical (ver Figura 6.9 y 7.13), haciendo que la falla se diera únicamente por flexión.

El tamaño máximo nominal utilizado para el diseño del concreto fue de 1", en concordancia con la norma ACI 318-08 donde el agregado grueso no deberá ser mayor de: 1/5 de la menor dimensión entre las caras de encofrados; o 1/3 del peralte de la losa; o 3/4 del espacio libre mínimo entre barras individuales de refuerzo, paquetes de barras, tendones o ductos de pre esfuerzo.

Para concreto estándar la resistencia a la flexión se encuentra en el rango teórico del 10% al 20% de compresión, en el presente estudio se obtuvo un valor promedio de 13.92% para condiciones de laboratorio sin refuerzo (ver Tabla 7.16) y 21 % para el concreto con refuerzo utilizado en la pavimentación, esto debido a tener acero de refuerzo.

La evolución de los tiempos de fraguado es más lenta cuando la temperatura es menor. Esto se debe a que la reacción de hidratación es directamente proporcional a la temperatura, es decir que a temperaturas altas los tiempos de fraguado van a ser menores que a temperaturas bajas. Se puede observar que la evolución de las resistencias a edades tempranas es más rápida cuando la temperatura de curado es mayor, sin embargo, a medida que la edad aumenta la ganancia de resistencia a compresión es mayor cuando las temperaturas de curado son más bajas. Una posible razón para este comportamiento, es que la reacción de hidratación en temperaturas bajas, se desarrolla en un tiempo mayor que en temperaturas altas.

La temperatura inicial de la mezcla estaba por debajo de la temperatura controlada de 23 °C., este comportamiento se debe a que el mezclado se hizo en condiciones no controladas de temperaturas de las materias primas. Las mezclas empiezan a desarrollar temperatura a medida que se lleva a cabo el proceso de hidratación, superando la temperatura de curado. Al



cabo de aproximadamente 12 horas las temperaturas de los especímenes se estabilizan con la temperatura ambiente, en este caso 23 °C.

El método de la madurez Nurse-Saúl representa el efecto que la temperatura tiene sobre el desarrollo de la resistencia tan igual que la función de madurez de Arrhenius como se muestra en la figura 7.32. sin embargo, la función de madurez Nurse-Saul es más simple y suficientemente precisa para ser utilizado fácilmente en las obras de construcción.

Al realizar las mediciones de temperatura internas del concreto in situ, se comparó el perfil térmicos a tres profundidades diferentes del pavimento, encontrándose gradientes térmicos para un espesor de pavimento de 15 cm con valores desde -5°C a 14 °C (distancia entre sensores 10.00 cm.) Observándose que el punto más crítico es la altura de 12.5 cm de la rasante.

Por último, se observa que el valor mínimo del coeficiente de correlación es de $R^2 = 0.975$, se puede interpretar que la correlación es positiva y alta; por lo tanto, los índices de madurez nos permiten tener curvas de calibración válidas y poder aplicarlas en obra para cada



10.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el pasado, los investigadores han evaluado el método de madurez basado en temperaturas de curado constantes. Sin embargo, en las operaciones de campo las temperaturas de curado oscilan realmente con la temperatura ambiente. Por lo tanto, el concreto en este estudio fue curado bajo temperaturas fluctuantes del medio ambiente.

La influencia de la temperatura interna del concreto y la temperatura del ambiente afecta las propiedades mecánicas del concreto, teniendo desfavorable las condiciones de bajas temperaturas producidas en intervalo de 3:00 – 4:00 horas de la mañana.

Es evidente que los valores de resistencia a compresión y flexión bajo condiciones de laboratorio son mayores que los estudiados in situ, de hecho los valores obtenidos a los siete días para resistencia a compresión es de $251,87 \text{ Kg/cm}^2$ con un porcentaje de evolución equivalente a 102,80% y para los especímenes elaborados insitu para el día ocho muestra una resistencia a compresión de $225,88 \text{ Kg/cm}^2$ con un porcentaje de evolución equivalente a 91.84%. se puede observar que las condiciones climáticas, tienen un efecto importante sobre la resistencia a compresión del concreto; entre esos factores se encuentran la temperatura interna del concreto y la temperatura ambiente.

Los valores obtenidos de la resistencia real in situ de los especímenes curados bajo las mismas condiciones del pavimento mostrados en las figuras y tablas del ítem 8.5, de acuerdo a la ASTM C1074 son valores inaceptables para poder considerar válida dicha curva, ya que estos se encuentran fuera del rango de $\pm 10 \%$ de la función de madurez. Sin embargo, los resultados del ensayo de extracción de nucleas muestran valores que se encuentran dentro de los límites de acuerdo a la norma antes mencionada. Observándose que los especímenes curados in situ no representan las propiedades mecánicas de la estructura del pavimento.



Los efectos variables de tiempo, temperatura de curado en la hidratación y el desarrollo de resistencia mecánicas del concreto son fenómenos no estudiados en la presente investigación por lo que un estudio de estos determinaría la influencia de curado.

El reglamento nacional de edificaciones no menciona el método de madurez como un control de calidad del concreto en pavimentos rígido o estructuras de concreto. A pesar de contar con normatividad internacional tal como lo establece la norma ASTM C 1074, AASHTO T 276 y ACI 228.





CAPITULO 11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Después de la realización del conjunto de procedimientos experimentales sobre la relación existente entre el "Índice de madurez a edades tempranas y resistencia a compresión" se derivan a las siguientes conclusiones.

11.1. Conclusión general.

La relación del índice de madurez a edades tempranas si influye en la resistencia a compresión para diseño de mezcla de pavimento rígido $f'_c = 245 \text{ kg/cm}^2$, en la ciudad del Cusco de acuerdo a Nurse Saul esta relación es la función exponencial $f'_c = e^{5.808 - \frac{646.584}{x}}$ con coeficiente de determinación 0.98 y de acuerdo a Arrhenius esta relación es la función exponencial $f'_c = e^{5.805 - \frac{30.890}{x}}$ con coeficiente de determinación 0.977. Para el caso de resistencia a flexión de acuerdo Nurse Saul esta relación es la función exponencial $f'_c = e^{3.813 - \frac{633.231}{x}}$ con coeficiente de determinación 0.992 y de acuerdo a Arrhenius esta relación es la función exponencial $f'_c = e^{3.810 - \frac{30.458}{x}}$ con coeficiente de determinación 0.992.

11.2. Conclusiones específicas.

La temperatura si influye en el índice de madurez a edades tempranas y resistencia a compresión para diseño de mezcla de pavimento rígido $f'_c = 245 \text{ kg/cm}^2$. La principal variable de estudio denominada temperatura interna del concreto y medio de curado, resulto ser notable para el desarrollo de resistencias mecánicas de concreto, ya que la temperatura interna del concreto y el medio de curado calcula el índice de madurez a edades tempranas, cuantificándose los valores en el historial de temperatura.



El tiempo de curado si afecta al índice de madurez a edades tempranas y resistencia a compresión para diseño de mezcla de pavimento rígido $f'_c = 245 \text{ kg/cm}^2$. El tiempo de curado es una variable que cuantifica el historial de temperatura y por lo tanto las resistencias mecánicas del concreto. El tiempo de curado afecta en el índice de madurez a edades tempranas.

Si es posible estimar en situaciones y tiempos reales el índice de madurez a edades tempranas y resistencia a compresión para diseño de mezcla de pavimento rígido. El índice de madurez a profundidades y lugares diferentes del pavimento varía, y el índice de madurez en el centro y a la mitad de la profundidad presentan una evolución de resistencia más rápida que los puntos instrumentados a otras profundidades.

11.3. Implicancias para Futuras Investigaciones.

A lo largo del trabajo presentado se han puesto de manifiesto paralelamente otras líneas futuras de investigación principalmente relacionadas al método de madurez y optimización con perspectivas industriales. A continuación, se exponen las que más interesan y que están relacionadas con los aspectos tratados en esta tesis.

Estudiar la variación del gradiente térmico en concretos masivos, con el fin de evaluar la variación de resistencias en diferentes ubicaciones.

Establecer índices de madurez para distintos tipos de cemento que ofrece el mercado así como agregados de canteras más utilizados en la región.

Profundizar más en los estudios a nivel micro y nano estructural del proceso de hidratación del concreto producido en climas fríos y cálidos, analizando las distintas fases que lo componen con el objeto de comprender mejor el comportamiento del índice de madurez producido por la temperatura.



GLOSARIO DE TÉRMINOS

Datum de temperatura. La temperatura que es sustraída de la temperatura medida en el concreto para calcular el factor tiempo-temperatura de acuerdo a la Ecuación de Nurse-Saúl.

Edad equivalente. El número de días u horas a una temperatura especificada requerida para producir una madurez igual a la madurez lograda por un periodo de curado diferente de la temperatura especificada.

Madurez. La extensión del desarrollo de una propiedad de una mezcla cementícea. Mientras el término es usado para describir la extensión del desarrollo de la resistencia relativa, también puede ser aplicada a la evolución de otras propiedades que son dependientes de las reacciones químicas que ocurren en una mezcla cementícea. En cualquier momento la madurez depende de la historia del curado.

Función de madurez. Una expresión matemática que usa el historial de temperatura medida de una muestra cementícea durante el periodo de curado para calcular un índice que es indicativo de la madurez al final del periodo.

Índice de madurez. Un indicador de madurez que es calculado del historial de temperatura de la mezcla cementícea usando una función de madurez. El índice computado es indicativo de la madurez siempre y cuando haya habido suficiente abastecimiento de agua para la hidratación o para una reacción puzolánica de los materiales cementíceos durante el tiempo usado en el cálculo. Dos índices de madurez ampliamente usados son el *factor tiempo-temperatura* y la *edad equivalente*.

Método de madurez. Una técnica para estimar la resistencia del concreto que está basada en la suposición de que muestras de una mezcla de concreto dada consiguen la misma resistencia si consiguen mismos valores de índice de madurez.



Relación madurez- resistencia. Una relación empírica entre la resistencia a compresión y el índice de madurez se obtiene mediante probetas de ensayo cuyas historias de temperatura llegan hasta el momento en que la prueba ha sido registrada.

Factor tiempo - temperatura. Índice de madurez computado para la ecuación de Nurse-Saúl.





REFERENCIAS BIBLIOGRAFÍA.

American Concrete Institute. (s.f.). *Mass Concrete*.

ASTM C 403. (2004). *Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance*.

Solís Carcaño, R., & Moreno, E. (11 de noviembre de 2005). Influencia del curado húmedo en la resistencia a compresión del concreto en clima cálido subhúmedo. *Artículo de Investigación*.

Aceros, A., & Motiva, s. (2012). Generacion de Valor en la Partida del Acero Mediante la Integracion Hacia Adelante. *1er Congreso Nacional de Lean Construccion 2012*. Lima.

ACI 207. (2007). *Guide To Mass Concrete*.

Aguilar Beltran, O. E., Rodriguez Mejia, E. A., & Sermeño Monje, M. J. (2009). "Determinacion de la resistencia del concreto a edades tempranas bajo la norma ASTM C 1074, en viviendas de concreto coladas en el sitio". El Salvador.

American Concrete Institute Advancing Concrete Knowlegde. (2010). *231 R-10 Report on Early-Age Cracking: Causes, Measurement, and Mitigation*.

American Psychological Association. (2010). *Manual de Publicaciones de la American Psychological Association* (6 ed.). México, D.F.: Editorial El Manual Moderno.

American Society for Testing and Materials. (2004). *STANDARD PRACTICE FOR ESTIMATING CONCRETE STRENGTH BY THE MATURITY METHOD*. ASTM Designation C 1074 — . Philadelphia, Pa.

ASTM C 1074. (2004). *Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the naturity method*. Pennsylvania: Annual Book of ASTM Standard.

Bach. Palma Vargas, Ricardo; Bach. Rozas Gomez, Mijael Elio . (2012). "DISEÑO DE MEZCLAS CON LOS DIFERENTES AGREGADOS UTILIZADOS EN LA CIUDAD DEL CUSCO". Cusco.



- Barreda, M F; Naber, M J; Quispe Sallo, I; Sota, J S. (Mayo-Agosto de 2013). Fisuras de contracción en Pavimentos de Hormigón y el aserrado de juntas. *ALCONPAT*, 3(2), 114-124.
- Carino, Nicholas J; Lew, H S;. (21-23 de Mayo de 2001). "The Maturity method: From Theory To Application". (P. C, Ed.) *National Institute of Standards and Technology*, 19.
- Carrilo Negrete, E. M. (2011). *EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA TEMPERATURA Y DEL TIEMPO DE FRAGUADO EN LA RESISTENCIA ESTIMADA DEL HORMIGÓN MEDIANTE MADUREZ (Tesis de Maestría)*. Santiago, Chile.
- García Hernández, A. (2007). *Desarrollo y análisis de pavimentos industriales desde el punto de vista del acabado superficial*. Tesis Doctoral, Santander.
- Hernández Sampieri, R. (2014). *"Metodología de la Investigación"* (6ta ed.). México: McGraw Hill.
- Kumar Mehta, P., & Monteiro, P. (2006). *Concrete Microstructure, Properties, and Materials* (Vol. third Edition). McGraw-Hill. Obtenido de file:///C:/Users/PC/Downloads/Concrete%20Microstructure,%20Properties,%20and%20Materials.pdf
- Lachemi, L., Hossains, K., Anagnostopoulos, C., & Sabouni, A. (2007). "Application of maturity method to slipforming operations: Performance validation". (Vol. 29).
- López, I. E. (2010). *Concreto Tomo 2 Diseño de Mezcla*. Lima: Imprenta de ICG.
- Metha, P K; Monteiro, P J;. (2006). *Concrete: Microstructure, Properties and materials*. McGraw-Hill.
- Neville, A. M. (1996). *Properties of Concrete*. (J. W. Sons, Ed.) New York, USA.
- NTP 334.090 INDECOPI. (2013). *CEMENTOS. Cementos Portland Adicionados. Requisitos*. Lima.
- NTP 400.010 INDECOPI. (2013). *AGREGADOS. Extracción y Preparación de Muestras*. Lima.



- Programa de Adaptación al Cambio Climático PACC - Perú. (2012). *Caracterización Climática de la Regiones Apurímac y Cusco*. Perú: SENAMHI.
- Quiroz Crespo, V. M., & Salamanca Osuna, L. E. (2006). *APOYO DIDÁCTICO PARA LA ENSEÑANZA Y APRENDIZAJE EN LA ASIGNATURA DE "TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN"*. Cochabamba, Bolivia.
- Ramirez, E. (9 de Abril de 2015). *Normas Apa Sexta Edicion*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=LnG8n4wMtcw>
- Rudeli, N., & Santilli, A. (2014). *Tiempos de desencofrado de elementos verticales de hormigón*. Uruguay.
- Sánchez de Guzmán, D. (2011). *Tecnología del Concreto Tomo 2. Manejo y colocación en obra* (Vol. 3). Colombia: Asociación Colombiana de Productores de Concreto, Asocreto.
- Steven, H., Kosmatka, Kerkhof, B., & Panarese, W. (2002). *Design and Control of* (Vol. Fourteenth Edition). Portland Cement Association 2003.
- Torres, Silvia; Gonzáles Bonorino, Adina; Vavilova, Irina;. (2015). *La Cita y Referencias Bibliográfica: Guía basada en las normas APA* (3ra ed.). Buenos Aires: Biblioteca Central UCES.
- Trías, S. Z. (2012). *Guía para la Redacción en el estilo APA, 6ta Edición*. Puerto Rico: UMET.
- USIL, E. d. (2011). *Guía para la Presentación de Trabajos de Investigación*. Lima: Universidad San Ignacio de Loyola.
- Verbeck, G H; Helmuth, R H;. (1968). *Structure and Physical Properties of Cement. 5th Int. Symp. on the Chemistry of Cement*, 5, págs. 1-32. Tokyo.
- Verbeck, G., & Helmuth, R. (1968). *Structure and Physical Properties of Cement Pastes. . Symp. on the Chemistry of Cement, Tokyo , III*, (págs. 1-33). Tokyo.
- Wade, Samuel A; Schindler, Anton k; Barnes, Robert W; Nixon, Jeffery M;. (2006). *"Evaluation of the Maturity Method to Estimate Concrete Strength"*. Investigación N°



1, Department of Civil Engineering at Auburn University, Alabama Department of Transportation, Alabama.

Zapata Mar, A., & Bosh Giral, P. (2009). Cemento Menos Contaminate.





ANEXOS A CERTIFICADOS

Anexo A1 Certificado de calidad del Cemento Pórtland tipo HE.
Fuente: CONARENA C&G SRL



CEMENTO PORTLAND TIPO HE



NTP 334.082
ASTM C 1157

YURA

REQUERIMIENTOS QUIMICOS:

Oxido de Magnesio, MgO, %	2.13	No Especifica
Trióxido de Azufre, SO ₃ , %	2.20	No Especifica
Pérdida por ignición o al Fuego, P.F %	2.49	No Especifica

REQUERIMIENTOS FISICOS:

Peso Especifico (g/cm ³)	2.89	No Especifica
Expansión en Autoclave, %	0.01	0.80 Máximo
Tiempo de Fraguado, Ensayo de Vicat, minutos		
Tiempo de Fraguado (Inicial)	182	45 Mínimo
Tiempo de Fraguado (Final)	224	420 Máximo
Contenido de Aire del mortero, (%)	3.44	No Especifica

Resistencia a la Compresión, MPa, (Kg-f/cm ²)		Mínimo:
01 día	14.93 (152)	12.00 (122)
03 días	26.93 (275)	24.00 (245)
07 días	32.25 (329)	No Especifica -
28 días	38.54 (393)	No Especifica -

Este Documento Muestra las características típicas del promedio Mensual de la producción del mes de Agosto, asegurando que este cemento cumple con las especificaciones técnicas ASTM 1157

Arequipa, 05 de Septiembre del 2016



Gonzalo Álvarez Cárdenas
Gonzalo Álvarez Cárdenas
Jefe de Control de Calidad
Yura S.A.

Planta: Corredor Yura Km. 26 - Arequipa
Oficina comercial: Av. General Díaz 527 - Arequipa
Tel.: (51 84) 495060 / 225000



TESIS "ÍNDICE DE MADUREZ A EDADES TEMPRANAS Y RESISTENCIA A COMPRESIÓN PARA DISEÑO DE MEZCLA DE PAVIMENTO RÍGIDO $f'_c = 245 \text{ kg/cm}^2$, CIUDAD CUSCO 2016"

Anexo A2 Informe de análisis Físicoquímico del agregado Cantera Sertraq (Agregado fino).
Fuente: Universidad Nacional de San Antonio Abad de Cusco – Facultad de Ciencias Químicas, Físicas y Matemáticas.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

Av. de la Cultura 733 - Pabellón "C" Of. 106 1er. piso - Telefax: 224831 - Apartado Postal 921 - Cusco Perú



UNIDAD DE PRESTACIONES DE SERVICIO DE ANÁLISIS QUÍMICO
DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE QUÍMICA

INFORME DE ANÁLISIS

Nº0651-16-LAQ

SOLICITANTE: MALLQUI TTUPA ALBERTH EDWARD
ANAHUE CHOQUEPUMA BRUCELE RAMIRO

TESIS : INDICE DE MADUREZ A EDADES TEMPRANAS Y RESISTENCIA A COMPRESION PARA DISEÑO DE MEZCLA DE PAVIMENTO RIGIDO $F'_c = 245 \text{ Kg/cm}^2$, CIUDAD CUSCO 2016

MUESTRA : AGREGADO

FUENTE : CANTERA SERTRAQ

FECHA : C/07/09/2016

RESULTADO ANALISIS FISICOQUIMICO:

pH	7.50
Sales solubles totales ppm	3328.00
Carbonatos %	7.22
Materia Orgánica %	0.28
Sulfatos ppm	725.90
Cloruros ppm	188.60
Durabilidad (48h/MgSO ₄)%	0.94

Cusco, 15 de Setiembre 2016

Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco
Unidad de Prestación de Servicios Analíticos

Melquedes Herrera Arriola
Melquedes Herrera Arriola
RESPONSABLE DEL LABORATORIO DE ANALISIS QUIMICO



TESIS "ÍNDICE DE MADUREZ A EDADES TEMPRANAS Y RESISTENCIA A COMPRESIÓN PARA DISEÑO DE MEZCLA DE PAVIMENTO RÍGIDO $f'_c = 245 \text{ kg/cm}^2$, CIUDAD CUSCO 2016"

Anexo A 3 Informe de análisis Físicoquímico del agregado Cantera Abrill (agregado grueso y fino). Fuente: Universidad Nacional de San Antonio Abad de Cusco – Facultad de Ciencias Químicas, Físicas y Matemáticas.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

Av. de la Cultura 733 - Pabellón "C" Of. 106 1er. piso - Telefax: 224831 - Apartado Postal 921 - Cusco Perú



UNIDAD DE PRESTACIONES DE SERVICIO DE ANÁLISIS QUÍMICO DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE QUÍMICA INFORME DE ANÁLISIS

Nº0650-16-LAQ

SOLICITANTE: MALLQUI TTUPA ALBERTH EDWARD
ANAHUE CHOQUEPUMA BRUCELE RAMIRO

TESIS : INDICE DE MADUREZ A EDADES TEMPRANAS Y RESISTENCIA A COMPRESION PARA DISEÑO DE MEZCLA DE PAVIMENTO RIGIDO $F'_c = 245 \text{ Kg/cm}^2$, CIUDAD CUSCO 2016

MUESTRA : AGREGADO
FUENTE : CANTERA ABRILL
FECHA : C/07/09/2016

RESULTADO ANALISIS FISICOQUIMICO:

pH	7.80
Sales solubles totales ppm	1630.00
Carbonatos %	4.20
Materia Orgánica %	0.06
Sulfatos ppm	530.60
Cloruros ppm	129.40
Durabilidad (48h/MgSO ₄)%	1.20

Cusco, 15 de Setiembre 2016

Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco
Unidad de Prestación de Servicios Analíticos

[Signature]
Responsable del Laboratorio de Análisis Químico



Anexo A 4 Certificado de calidad del aditivo ULMEN W-80.
Fuente: CONARENA C&G SRL



Fabricación y Comercialización de Aditivos para Concretos

CERTIFICADO DE CALIDAD

El departamento técnico de INDUSTRIAS ULMEN S.A. Certifica que el producto que se indica cumple los requisitos de uniformidad indicados en la norma ASTM C494 y con nuestros estándares de calidad.

Producto : W-80
Lote : 6380816
Fabricado : 04/08/2016
Vence : FEBRERO 2017

Los parámetros controlados se muestran a continuación.

ENSAYO	ESPECIFICACIÓN	RESULTADO
Densidad	1,05 ±0,02 (g/mL)	1,053
Viscosidad	14 ± 2 (seg)	15,34 seg
pH	6. ± 1	6.4

El presente aditivo tiene una vida útil de 6 meses almacenado en lugar fresco y protegido del sol, recomendado por nuestro Sistema de Control de Calidad, certificado bajo ISO 9001:2008

Encargado Control de Calidad
Industrias Ulmen S.A.



www.ulmen.cl

ulmen@ulmen.cl



TESIS "ÍNDICE DE MADUREZ A EDADES TEMPRANAS Y RESISTENCIA A COMPRESIÓN PARA DISEÑO DE MEZCLA DE PAVIMENTO RÍGIDO $f'_c = 245 \text{ kg/cm}^2$, CIUDAD CUSCO 2016"

Anexo A 5 Informe de análisis 11 Físicoquímico del agua.

Fuente: Universidad Nacional de San Antonio Abad de Cusco – Facultad de Ciencias Químicas, Físicas y Matemáticas.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS, FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

Av. de la Cultura 733 - Pabellón "C" Of. 106 1er. piso - Telefax: 224831 - Apartado Postal 921 - Cusco Perú



UNIDAD DE PRESTACIONES DE SERVICIO DE ANÁLISIS QUÍMICO
DEPARTAMENTO ACADÉMICO DE QUÍMICA

INFORME DE ANÁLISIS

Nº0649-16-LAQ

SOLICITANTE: MALLQUI TTUPA ALBERTH EDWARD
 ANAHUE CHOQUEPUMA BRUCELE RAMIRO

TESIS : INDICE DE MADUREZ A EDADES TEMPRANAS Y RESISTENCIA A COMPRESION PARA DISEÑO DE MEZCLA DE PAVIMENTO RIGIDO $F'_c = 245 \text{ kg/cm}^2$, CIUDAD CUSCO 2016

MUESTRA : AGUA

FUENTE : PLANTA DE PRODUCCION DE CONCRETO CONARENA

FECHA : C/07/09/2016

RESULTADO ANALISIS FISICOQUIMICO:

Turbiedad NTU	6.22
pH	7.10
Sales solubles ppm	1562.80
Solidos totales ppm	214.10
Alcalinidad ppm NaHCO_3	362.30
Carbonatos ppm	0
Sulfatos ppm	568.90
Cloruros ppm	225.00
Materia Orgánica ppm	3.42

Cusco, 15 de Setiembre 2016

Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco
 Unidad de Prestación de Servicios de Análisis

[Signature]
 Michalinda Herrera Arriola
 RESPONSABLE DEL LABORATORIO DE ANALISIS QUIMICO



Anexo A 6 Descripción petrográfica macroscópica, briqueta de concreto.

Fuente: Universidad Nacional de San Antonio Abad de Cusco – Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica.

DESCRIPCION PETROGRAFICA MACROSCOPICA, BRIQUETA DE CONCRETO

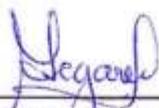
MUESTRA: Tramo III
PROYECTO: Mejoramiento de la transitabilidad vehicular y peatonal de la Av. Túpac Amaru.
POR: Ing. Mauro Zegarra Carreón.
FECHA: 24/11/2016

1. TEXTURA: Detrítica - Brechoide

- a. **COLOR:** Gris rosáceo
- b. **TAMAÑO DE LOS CLASTOS (GRAVA)**
 - Grandes: 4- 23 mm
 - Medianos: 2 – 3.5 mm
- c. **ANGULOSIDAD DE LOS CLASTOS:** Angulosos a subangulosos.
- d. **TAMAÑO DE LA MATRIZ:** Arena media (0.2-0.4 mm)
- e. **RELACIÓN CLASTOS/MATRIZ:** 58% / 42%

2. COMPOSICION MINERALOGICA / PETROLÓGICA

- a. **DE LOS CLASTOS:** Principalmente rocas volcánicas y cuarcitas. Accesoriamente areniscas y microdioritas.
- b. **DE LA MATRIZ:** Arena media compuesta principalmente de cuarzo y accesoriamente de feldespato y limo, aglutinados por cemento con aditivo blanquecino.


Ing. Mauro Zegarra Carreón
CIP 24395



ANEXOS B. ENSAYO DE LABORATORIO DE ELEMENTOS PÉTREOS

Anexo B 1 Ensayo de Contenido de humedad del agregado Fino (Fino 01) - Cantera Abrill (Arena Gruesa).
Fuente: Elaboración Propia.

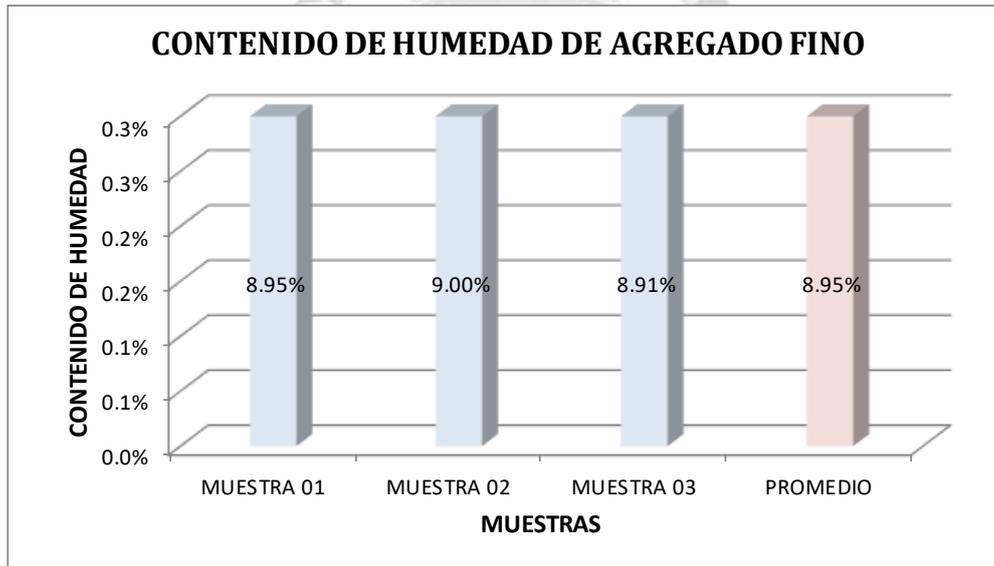
Muestra: ARENA GRUESA

Agregado: fino 01
Cantera: Abrill

CONTENIDO DE HUMEDAD DEL AGREGADO FINO

MTC E 108 - 2000, Basado en la Norma ASTM D-2216

DESCRIPCIÓN	MUESTRA 01	MUESTRA 02	MUESTRA 03
Peso de Capsula (gr)	67.99	51.23	69.89
Peso de Capsula + Muestra Húmeda (gr)	234.42	251.06	259.41
Peso de Capsula + Muestra Seca (gr)	220.75	234.56	243.91
Peso del Agua (gr)	13.67	16.50	15.50
Peso de la Muestra Seca (gr)	152.76	183.33	174.02
Contenido de Humedad	8.95%	9.00%	8.91%



CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL = 8.95%



Anexo B 2 Ensayo de Contenido de humedad del agregado Fino (Fino 02) - Cantera Sertraq (Arena Fina).
Fuente: Elaboración Propia.

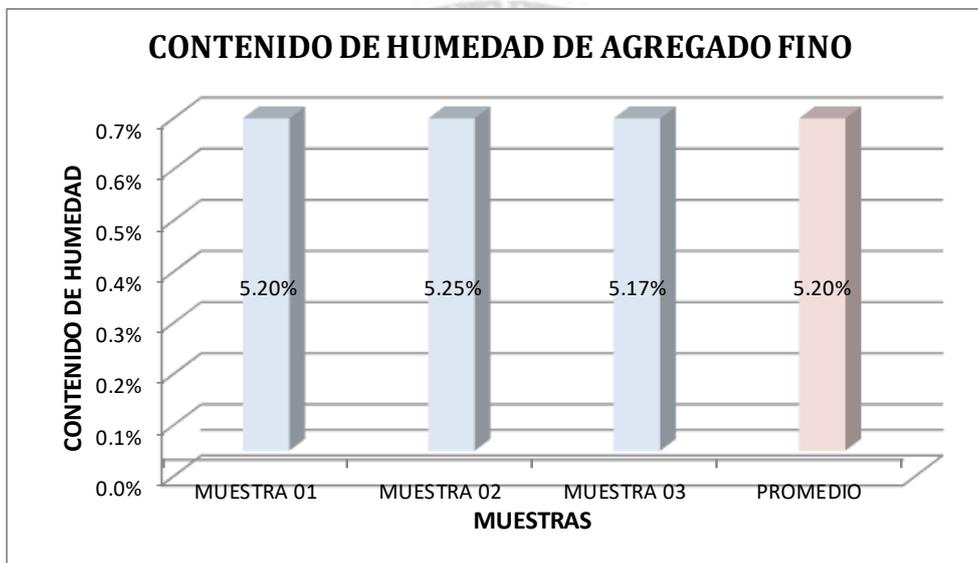
Muestra: ARENA FINA

Agregado: Fino 02
Cantera: Sertraq

CONTENIDO DE HUMEDAD DEL AGREGADO FINO

MTC E 108 - 2000, Basado en la Norma ASTM D-2216

DESCRIPCIÓN	MUESTRA 01	MUESTRA 02	MUESTRA 03
Peso de Capsula (gr)	52.61	59.65	55.98
Peso de Capsula + Muestra Húmeda (gr)	255.34	257.01	259.97
Peso de Capsula + Muestra Seca (gr)	245.32	247.17	249.95
Peso del Agua (gr)	10.02	9.84	10.02
Peso de la Muestra Seca (gr)	192.71	187.52	193.97
Contenido de Humedad	5.20%	5.25%	5.17%



CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL = 5.20%



Anexo B 3 Ensayo Cantidad de material fino que pasa el tamiz N° 200 del agregado Fino (Fino 01) - Cantera Abrill (Arena Gruesa). Fuente: Elaboración Propia.

Muestra: ARENA GRUESA

Agregado: fino 01
Cantera: Abrill

CANTIDAD DE MATERIAL FINO QUE PASA EL TAMIZ N° 200 DEL AGREGADO FINO

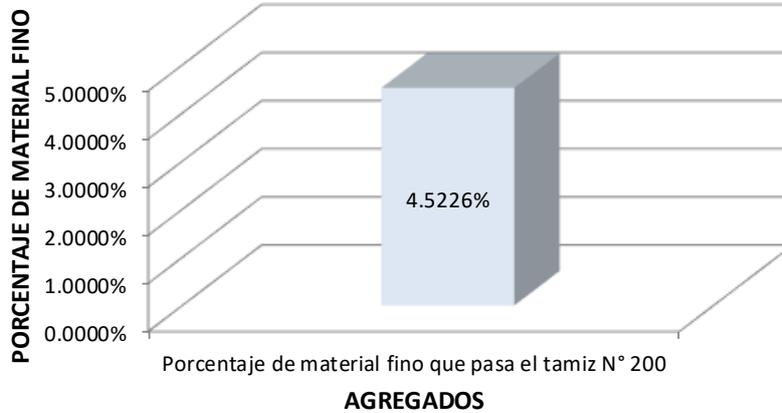
MTC E 202 - 2000, Basado en la Norma ASTM C-117 y AASHTO T-11

DATOS DEL LAVADO DEL MATERIAL	
ANTES DEL LAVADO	
Peso de la Muestra Seca (gr)	= 1592
DESPUÉS DEL LAVADO	
Peso de la Muestra Seca (gr)	= 1520

MATERIAL MAS FINO QUE EL TAMIZ N° 200	
Material que pasa el tamiz N° 200 (gr)	72.00
Porcentaje de material fino que pasa el tamiz N° 200	4.5226%

Fraciones Gruesa y Fina de la Muestra
 Fracción Fina (Pasa el Tamiz N° 200) = 4.52%
 Fracción Gruesa (Retiene el Tamiz N° 200) = 95.48%
 Total: 100.00%

CANTIDAD DE MATERIAL FINO QUE PASA EL TAMIZ N° 200 DEL AGREGADO FINO



MATERIAL FINO QUE PASA EL TAMIZ N° 200 = 4.52%



Anexo B 4 Ensayo Cantidad de Material fino que pasa el tamiz N° 200 del agregado Fino (Fino 02) - Cantera Sertraq (Arena Fina). Fuente: Elaboración Propia.

Muestra: ARENA FINA

Agregado: Fino 02
Cantera: Sertraq

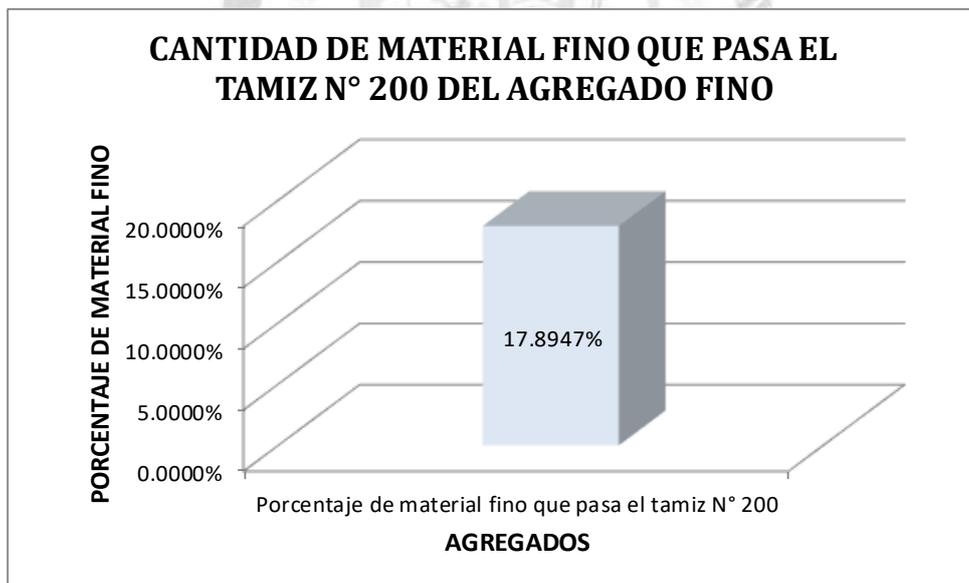
CANTIDAD DE MATERIAL FINO QUE PASA EL TAMIZ N° 200 DEL AGREGADO FINO

MTC E 202 - 2000, Basado en la Norma ASTM C-117 y AASHTO T-11

DATOS DEL LAVADO DEL MATERIAL	
ANTES DEL LAVADO	
Peso de la Muestra Seca (gr) =	1330
DESPUÉS DEL LAVADO	
Peso de la Muestra Seca (gr) =	1092

MATERIAL MAS FINO QUE EL TAMIZ N° 200	
Material que pasa el tamiz N° 200 (gr)	238.00
Porcentaje de material fino que pasa el tamiz N° 200	17.8947%

Fracciones Gruesa y Fina de la Muestra
 Fracción Fina (Pasa el Tamiz N° 200) = 17.89%
 Fracción Gruesa (Retiene el Tamiz N° 200) = 82.11%
 Total: 100.00%



MATERIAL FINO QUE PASA EL TAMIZ N° 200 = 17.89%



Anexo B5 Ensayo Análisis Granulométrico del agregado Fino (Fino 01) - Cantera Abrill (Arena Gruesa). Fuente: Elaboración Propia.

Muestra: ARENA GRUESA

Agregado: fino 01
Cantera: Abrill

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO FINO

MTC E 204 - 2000, Basado en la Norma ASTM C-136 y AASHTO T-27

Antes del lavado

Peso de la Muestra Seca = 1592.00 gr

Después del lavado

Peso de la Muestra Seca = 1520.00 gr

% de Error en Peso = 0.00% Ok!

TAMIZ Nº	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (gr)	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA	HUSO	
						LÍMITE INFERIOR	LÍMITE SUPERIOR
3/8"	9.5	8.00	0.50%	0.50%	99.50%	100%	100%
Nº 4	4.75	550.00	34.55%	35.05%	64.95%	95%	100%
Nº 8	2.36	480.00	30.15%	65.20%	34.80%	80%	100%
Nº 16	1.18	232.00	14.57%	79.77%	20.23%	50%	85%
Nº 30	0.600	106.00	6.66%	86.43%	13.57%	25%	60%
Nº 50	0.300	80.00	5.03%	91.46%	8.54%	5%	30%
Nº 100	0.150	28.00	1.76%	93.22%	6.78%	0%	10%
Nº 200	0.075	32.00	2.01%	95.23%	4.77%		
Bandeja		4.00	0.25%	95.48%			

Total Fracción Retenida en Lavado = **1520.00** **95.48%**

Fracciones de Grava, Arena y Finos de la Muestra

% de grava (Retiene Tamiz Nº 4) = 35.05%

% de arena (Pasa Nº 4 y Ret. Nº 200) = 60.18%

% de finos (Pasa Tamiz Nº 200) = 4.77%

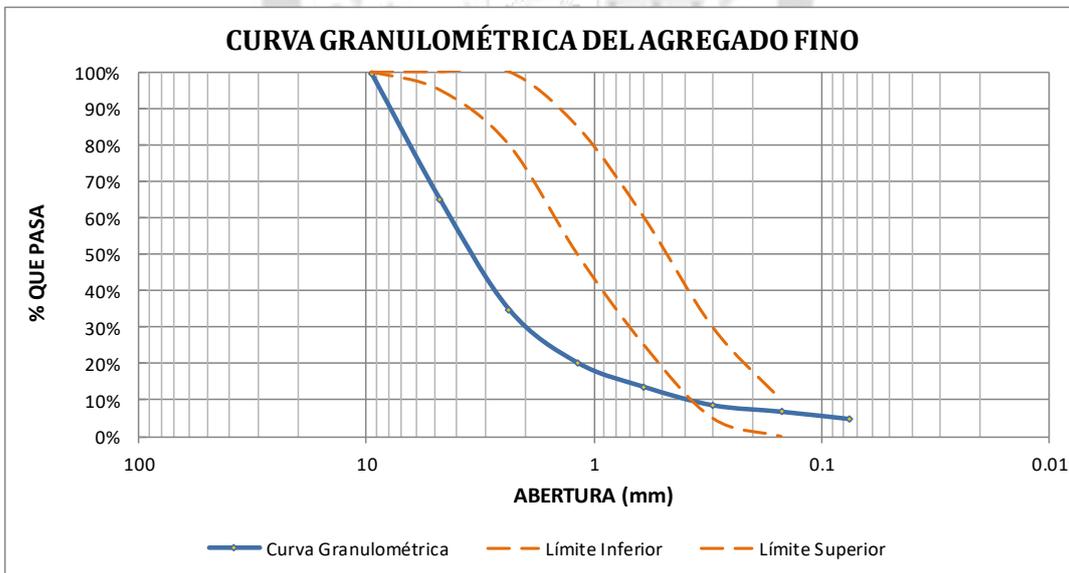
Total: 100.00%

Fracción Gruesa

% de grava = 36.81%

% de arena = 63.19%

Total = 100.00%



$$\sum \% \text{ RETENIDO ACUMULADO (3/8", N}^\circ 4, \text{N}^\circ 8, \text{N}^\circ 16, \text{N}^\circ 30, \text{N}^\circ 50, \text{N}^\circ 100)$$

El Módulo de Fineza recomendable estará entre 2.35 y 3.15

MÓDULO DE FINEZA = 4.52

Observaciones: Es una ARENA GRUESA, por lo que debe ser mezclada con una ARENA FINA



Anexo B6 Ensayo Análisis Granulométrico del agregado Fino (Fino 02) - Cantera Sertraq (Arena Fina). Fuente: Elaboración Propia.

Muestra: ARENA FINA

Agregado: Fino 02
Cantera: Sertraq

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO FINO

MTC E 204 - 2000, Basado en la Norma ASTM C-136 y AASHTO T-27

Antes del lavado

Peso de la Muestra Seca = 1330.00 gr

Después del lavado

Peso de la Muestra Seca = 1092.00 gr

% de Error en Peso = -0.37% MAL

TAMIZ Nº	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (gr)	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA	HUSO	
						LÍMITE INFERIOR	LÍMITE SUPERIOR
3/8"	9.5	0.00	0.00%	0.00%	100.00%	100%	100%
Nº 4	4.75	126.00	9.47%	9.47%	90.53%	95%	100%
Nº 8	2.36	256.00	19.25%	28.72%	71.28%	80%	100%
Nº 16	1.18	166.00	12.48%	41.20%	58.80%	50%	85%
Nº 30	0.600	110.00	8.27%	49.47%	50.53%	25%	60%
Nº 50	0.300	164.00	12.33%	61.80%	38.20%	5%	30%
Nº 100	0.150	108.00	8.12%	69.92%	30.08%	0%	10%
Nº 200	0.075	160.00	12.03%	81.95%	18.05%		
Bandeja		6.00	0.45%	82.41%			

Total Fracción Retenida en Lavado = **1096.00** **82.41%**

Fracciones de Grava, Arena y Finos de la Muestra

% de grava (Retiene Tamiz Nº 4) = 9.47%

% de arena (Pasa Nº 4 y Ret. Nº 200) = 72.48%

% de finos (Pasa Tamiz Nº 200) = 18.35%

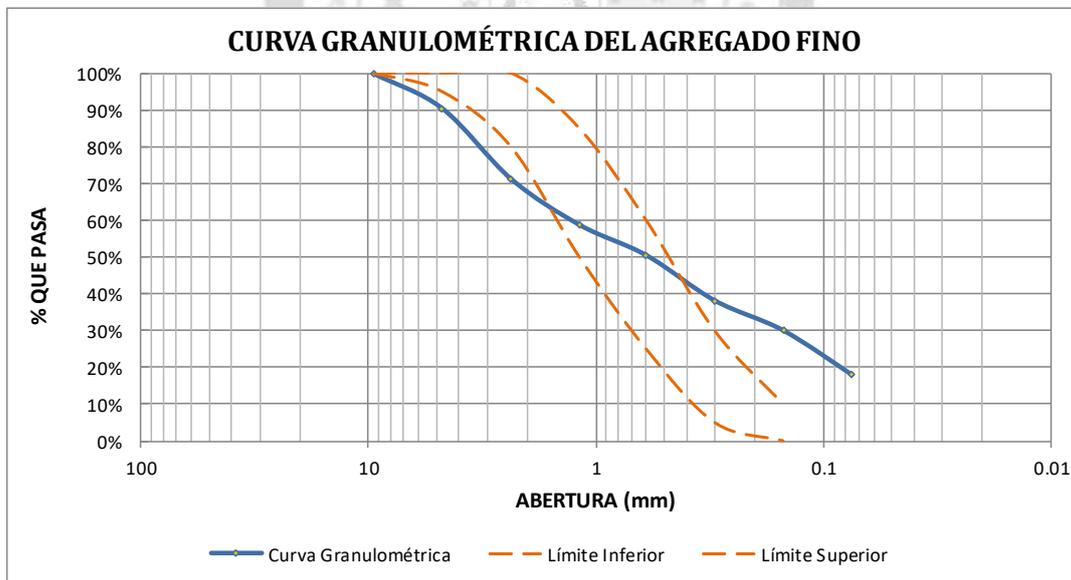
Total: 99.93%

Fracción Gruesa

% de grava = 11.56%

% de arena = 88.44%

Total = 100.00%



\sum % RETENIDO ACUMULADO (3/8", Nº 4, Nº 8, Nº 16, Nº 30, Nº 50, Nº 100)

El Módulo de Fineza recomendable estará entre 2.35 y 3.15

MÓDULO DE FINEZA = 2.61

Observaciones: Es una ARENA MEDIA



Anexo B 7 Mezclas de Agregados Finos (Fino 01 y 02) - Cantera Sertraq (Arena Gruesa y Fina). Fuente: Elaboración Propia.

Muestra: ARENA GRUESA y ARENA FINA

Fina 01: Abrill
Fina 02: Sertraq

MEZCLA DE AGREGADOS FINOS

Arena Gruesa de cantera Abrill= 7.54%

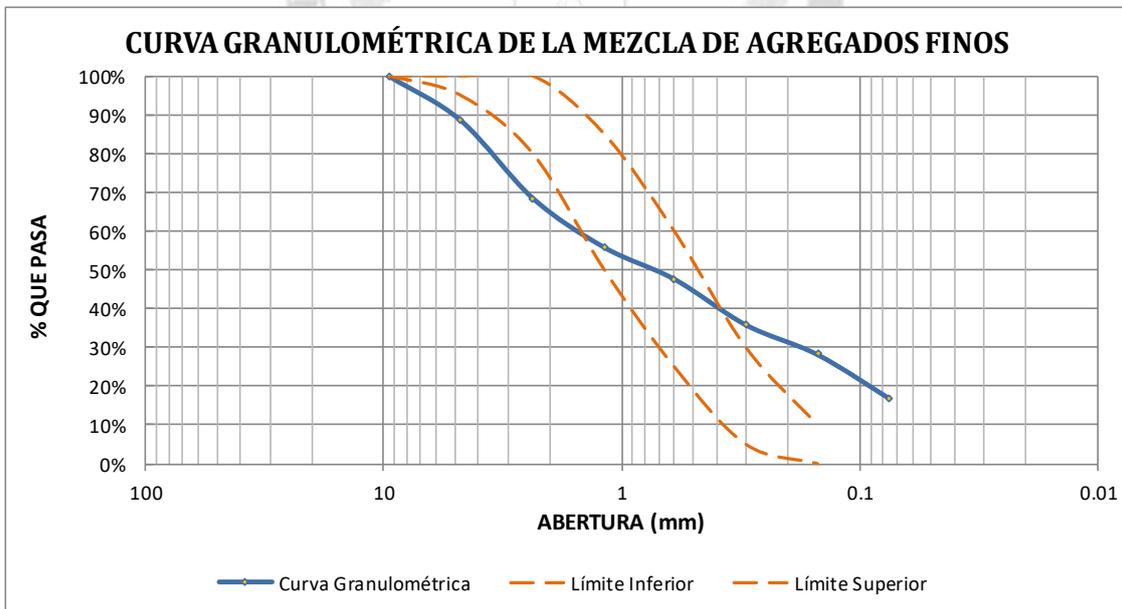
Arena fina de cantera Sertraq= 92.46%

Table with 7 columns: TAMIZ Nº, ABERTURA (mm), % RETENIDO DE LA MEZCLA, % RETENIDO ACUMULADO, % QUE PASA, HUSO (LÍMITE INFERIOR, LÍMITE SUPERIOR). Rows include tamiz sizes from 3/8 inch to Bandeja.

Total Fracción Retenida en Lavado = 83.39%

Fracciones de Grava, Arena y Finos de la Muestra
% de grava (Retiene Tamiz Nº 4) = 11.40%
% de arena (Pasa Nº 4 y Ret. Nº 200) = 71.55%
% de finos (Pasa Tamiz Nº 200) = 16.98%
Total: 99.94%

Fracción Gruesa
% de grava = 13.74%
% de arena = 86.26%
Total = 100.00%



Σ % RETENIDO ACUMULADO (3/8", Nº 4, Nº 8, Nº 16, Nº 30, Nº 50, Nº 100)

El Módulo de Fineza recomendable estará entre 2.35 y 3.15

MÓDULO DE FINEZA = 2.75

Observaciones: Es una ARENA MEDIA



Anexo B 8 Ensayo Peso Específico y Absorción del agregado Fino (Fino 01) - Cantera Abrill (Arena Gruesa). Fuente: Elaboración Propia.

Muestra: ARENA GRUESA

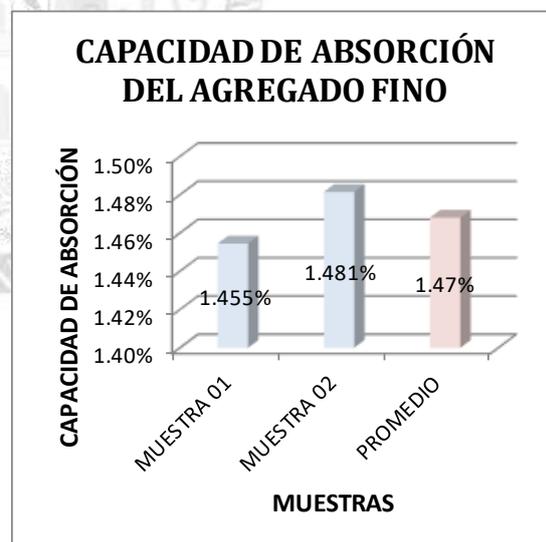
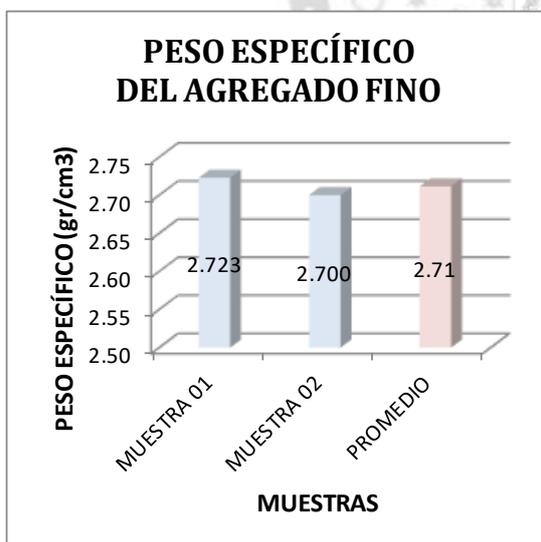
Agregado: fino 01
Cantera: Abrill

PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO

MTC E 205 - 2000, Basado en la Norma ASTM C-128 y AASHTO T-84

DATOS DEL ENSAYO	MUESTRA 01	MUESTRA 02
Número de Picnómetro	1	1
Volumen del Picnómetro (ml)	500	500
Peso del Picnómetro (gr)	454.87	454.87
Peso de la Muestra Seca (gr)	550.00	540.00
Peso del Picnómetro + Agua + Muestra (gr)	1028.00	1018.00
Temperatura del Agua (°C)	15.7	15.7
Peso de la Muestra Saturada con Superficie Seca (gr)	558.00	548.00
Peso del Picnómetro + Agua (gr)	680.00	678.00
Peso de la Muestra Sumergida (gr)	348.00	340.00
Peso del Agua Desplazada (gr)	202.00	200.00
Peso del Agua Absorbida (gr)	8.00	8.00
Peso Específico (gr/cm ³)	2.723	2.700
Capacidad de Absorción	1.455%	1.481%

% de Error		
Peso Específico	0.84%	Ok!
Capacidad de Absorción	1.85%	Ok!



PESO ESPECÍFICO = 2.71 gr/cm³
CAPACIDAD DE ABSORCIÓN = 1.47%



Anexo B 9 Ensayo Peso Específico y Absorción del agregado Fino (Fino 02) - Cantera Sertraq (Arena fina). Fuente: Elaboración Propia.

Muestra: ARENA FINA

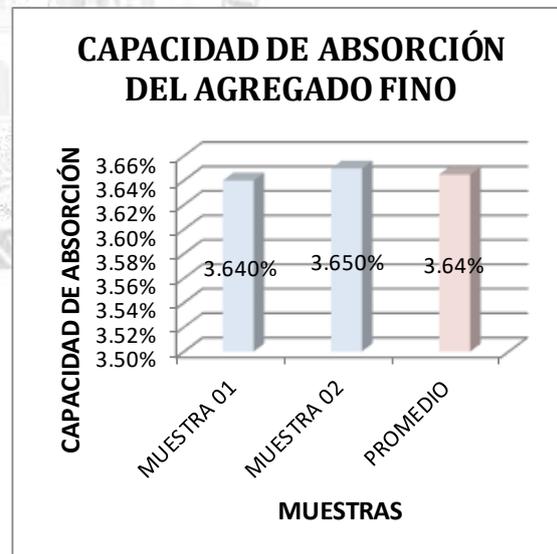
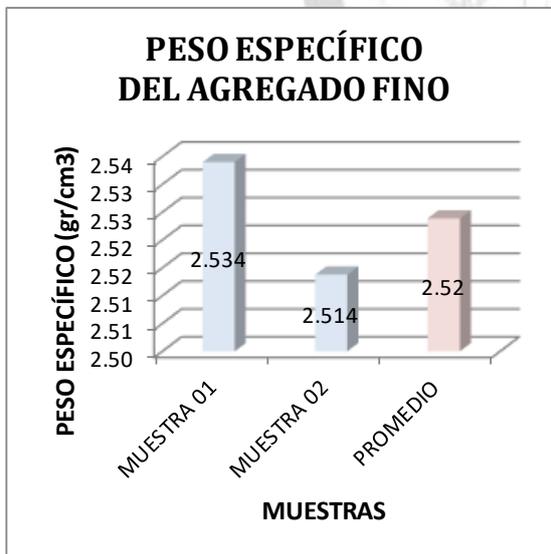
Agregado: Fino 02
Cantera: Sertraq

PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO

MTC E 205 - 2000, Basado en la Norma ASTM C-128 y AASHTO T-84

DATOS DEL ENSAYO	MUESTRA 01	MUESTRA 02
Número de Picnómetro	1	1
Volumen del Picnómetro (ml)	500	500
Peso del Picnómetro (gr)	454.87	454.87
Peso de la Muestra Seca (gr)	522.00	548
Peso del Picnómetro + Agua + Muestra (gr)	996.00	1010
Temperatura del Agua (°C)	15.7	16
Peso de la Muestra Saturada con Superficie Seca (gr)	541.00	568
Peso del Picnómetro + Agua (gr)	680.00	680.00
Peso de la Muestra Sumergida (gr)	316.00	330.00
Peso del Agua Desplazada (gr)	206.00	218.00
Peso del Agua Absorbida (gr)	19.00	20.00
Peso Específico (gr/cm ³)	2.534	2.514
Capacidad de Absorción	3.640%	3.650%

% de Error		
Peso Específico	0.80%	Ok!
Capacidad de Absorción	0.27%	Ok!



<p>PESO ESPECÍFICO = 2.52 gr/cm³ CAPACIDAD DE ABSORCIÓN = 3.64%</p>



Anexo B 10 Ensayo Peso Unitario Vacíos del agregado Fino (Fino 01) - Cantera Abrill (Arena Gruesa). Fuente: Elaboración Propia.

Muestra: ARENA GRUESA

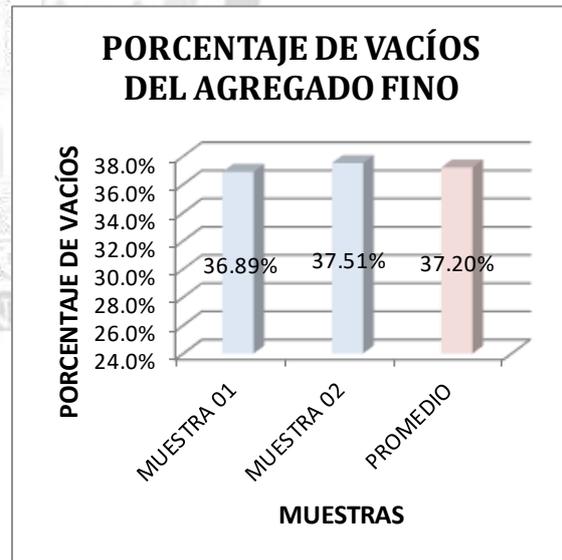
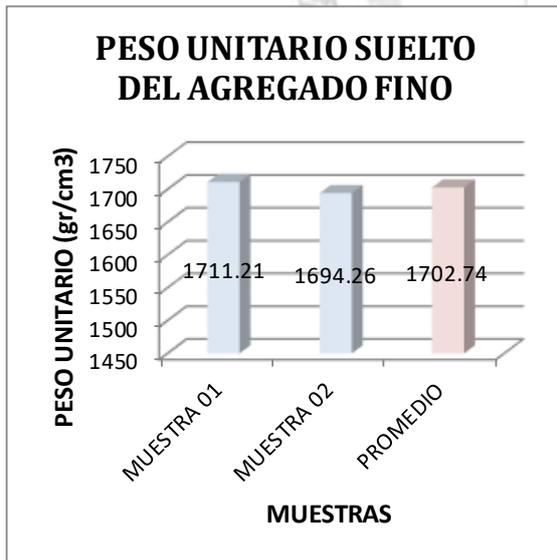
Agregado: fino 01
Cantera: Abrill

PESO UNITARIO Y VACÍOS DEL AGREGADO FINO

MTC E 203 - 2000, Basado en la Norma ASTM C-29

DATOS DEL ENSAYO	MUESTRA 01	MUESTRA 02
Número de Molde	P-1	P-1
Peso del Molde (gr)	8000.00	8000.00
Peso del Molde + Muestra Suelta (gr)	13050.00	13000.00
Peso de la Muestra Suelta (gr)	5050.00	5000.00
Altura del Molde (cm)	16.7	16.7
Diámetro del Molde (cm)	15	15
Volumen del Molde (cm ³)	2951.13	2951.13
Peso Unitario Suelto (gr/cm ³)	1.711	1.694
Peso Específico (kg/m ³)	2711.39	2711.39
Peso Unitario Suelto (kg/m ³)	1711.21	1694.26
Porcentaje de Vacíos	36.89%	37.51%

% de Error		
Peso Unitario Suelto	1.00%	Ok!
Porcentaje de Vacíos	1.69%	Ok!



PESO UNITARIO SUELTO = 1702.74 kg/m³
PORCENTAJE DE VACIOS = 37.20%



Anexo B 11 Ensayo Peso Unitario Vacíos del agregado Fino (Fino 02) - Cantera Sertraq (Arena Fina). Fuente: Elaboración Propia.

Muestra: ARENA FINA

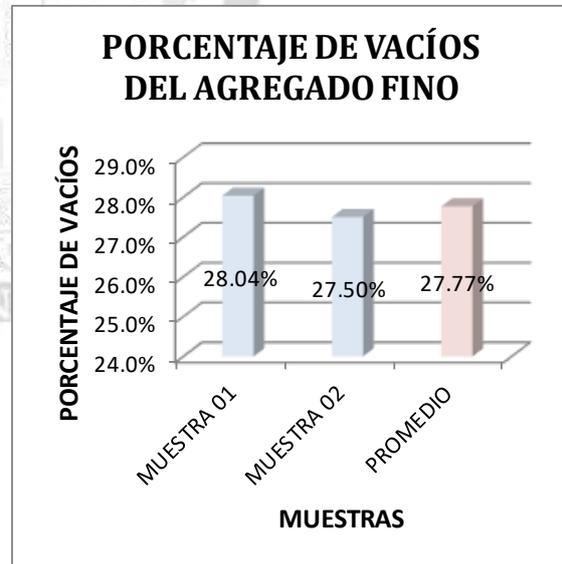
Agregado: Fino 02
Cantera: Sertraq

PESO UNITARIO Y VACÍOS DEL AGREGADO FINO

MTC E 203 - 2000, Basado en la Norma ASTM C-29

DATOS DEL ENSAYO	MUESTRA 01	MUESTRA 02
Número de Molde	P-1	P-1
Peso del Molde (gr)	8000.00	8000.00
Peso del Molde + Muestra Suelta (gr)	13360.00	13400.00
Peso de la Muestra Suelta (gr)	5360.00	5400.00
Altura del Molde (cm)	16.7	16.7
Diámetro del Molde (cm)	15	15
Volumen del Molde (cm ³)	2951.13	2951.13
Peso Unitario Suelto (gr/cm ³)	1.816	1.830
Peso Específico (kg/m ³)	2523.87	2523.87
Peso Unitario Suelto (kg/m ³)	1816.25	1829.81
Porcentaje de Vacíos	28.04%	27.50%

% de Error		
Peso Unitario Suelto	0.75%	Ok!
Porcentaje de Vacíos	1.95%	Ok!



PESO UNITARIO SUELTO = 1823.03 kg/m³
PORCENTAJE DE VACIOS = 27.77%



Anexo B 12 Ensayo de Contenido de humedad del agregado Grueso (Grueso 01) - Cantera Abrill (piedra chancada 3/4"). Fuente: Elaboración Propia.

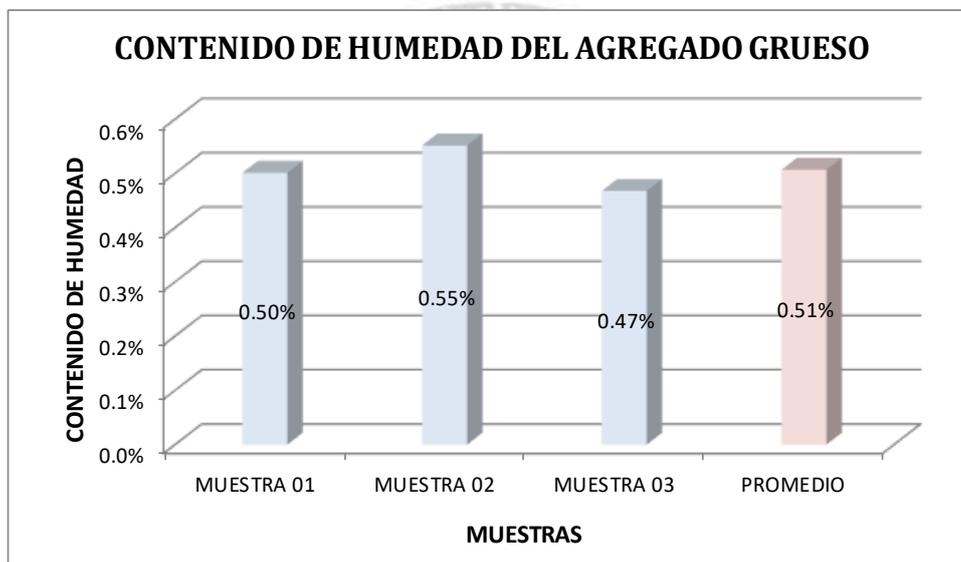
Muestra: PIEDRA CHANCADA 3/4"

Agregado: GRUESO 01
Cantera: ABRILL

CONTENIDO DE HUMEDAD DEL AGREGADO GRUESO

MTC E 108 - 2000, Basado en la Norma ASTM D-2216

DESCRIPCIÓN	MUESTRA 01	MUESTRA 02	MUESTRA 03
Peso de Capsula (gr)	52.45	53.93	54.96
Peso de Capsula + Muestra Húmeda (gr)	224.86	228.97	261.18
Peso de Capsula + Muestra Seca (gr)	224.00	228.01	260.22
Peso del Agua (gr)	0.86	0.96	0.96
Peso de la Muestra Seca (gr)	171.55	174.08	205.26
Contenido de Humedad	0.50%	0.55%	0.47%



CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL = 0.51%



Anexo B 13 Ensayo de Contenido de humedad del agregado Grueso (Grueso 02) - Cantera Abrill (piedra chancada 1/2").
Fuente: Elaboración Propia.

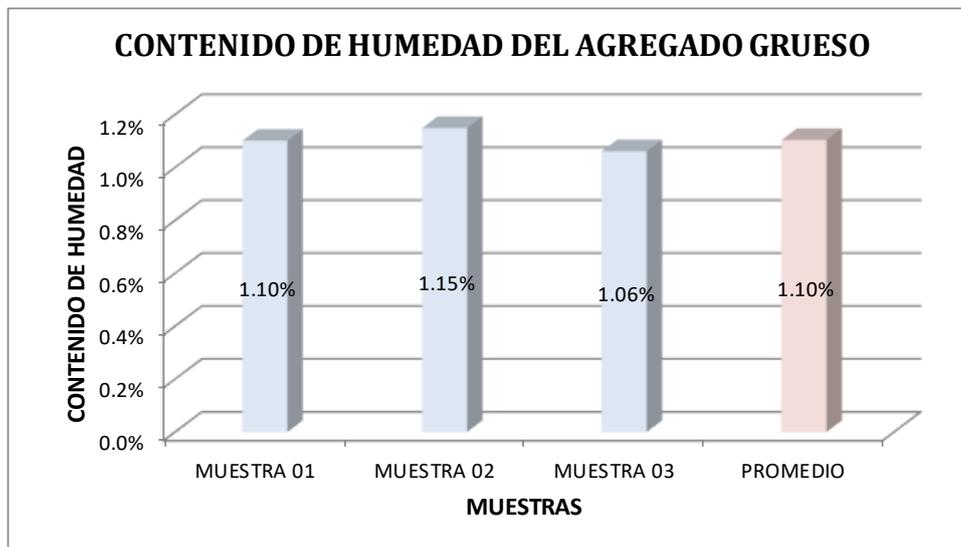
Muestra: PIEDRA CHANCADA DE 1/2"

Agregado: GRUESO 02
Cantera: ABRILL

CONTENIDO DE HUMEDAD DEL AGREGADO GRUESO

MTC E 108 - 2000, Basado en la Norma ASTM D-2216

DESCRIPCIÓN	MUESTRA 01	MUESTRA 02	MUESTRA 03
Peso de Capsula (gr)	56.95	63.99	57.62
Peso de Capsula + Muestra Húmeda (gr)	219.49	248.86	251.90
Peso de Capsula + Muestra Seca (gr)	217.72	246.76	249.86
Peso del Agua (gr)	1.77	2.10	2.04
Peso de la Muestra Seca (gr)	160.77	182.77	192.24
Contenido de Humedad	1.10%	1.15%	1.06%



CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL = 1.10%



Anexo B 14 Ensayo Cantidad de Material Fino que pasa el tamiz N° 200 del agregado Grueso (Grueso 01) - Cantera Abrill (piedra chancada 3/4").

Fuente: Elaboración Propia.

Muestra: PIEDRA CHANCADA 3/4"

Agregado: GRUESO 01

Cantera: ABRILL

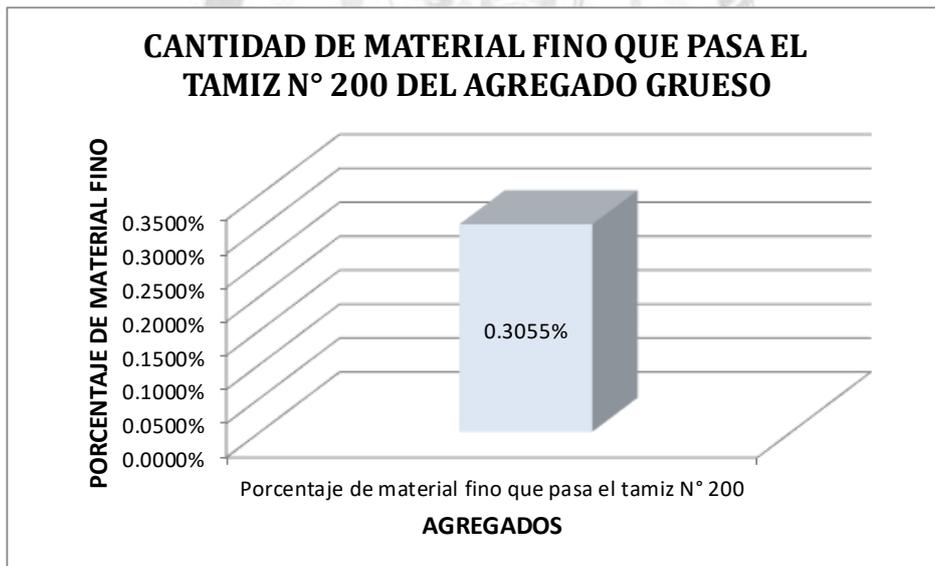
CANTIDAD DE MATERIAL FINO QUE PASA EL TAMIZ N° 200 DEL AGREGADO GRUESO

MTC E 202 - 2000, Basado en la Norma ASTM C-117 y AASHTO T-11

DATOS DEL LAVADO DEL MATERIAL	
ANTES DEL LAVADO	
Peso de la Muestra Seca (gr) = 6546	
DESPUÉS DEL LAVADO	
Peso de la Muestra Seca (gr) = 6526	

MATERIAL MAS FINO QUE PASA EL TAMIZ N° 200	
Material que pasa el tamiz N° 200 (gr)	20.00
Porcentaje de material fino que pasa el tamiz N° 200	0.3055%

Fracciones Gruesa y Fina de la Muestra
 Fracción Fina (Pasa el Tamiz N° 200) = 0.31%
 Fracción Gruesa (Retiene el Tamiz N° 200) = 99.69%
 Total: 100.00%



Porcentaje de Material Fino que pasa el Tamiz N° 200 = 0.31%



Anexo B 15 Ensayo Cantidad de Material Fino que pasa el tamiz N° 200 del agregado Grueso (Grueso 02) - Cantera Abrill (piedra chancada 1/2").

Fuente: Elaboración Propia.

Muestra: PIEDRA CHANCADA DE 1/2"

Agregado: GRUESO 02

Cantera: ABRILL

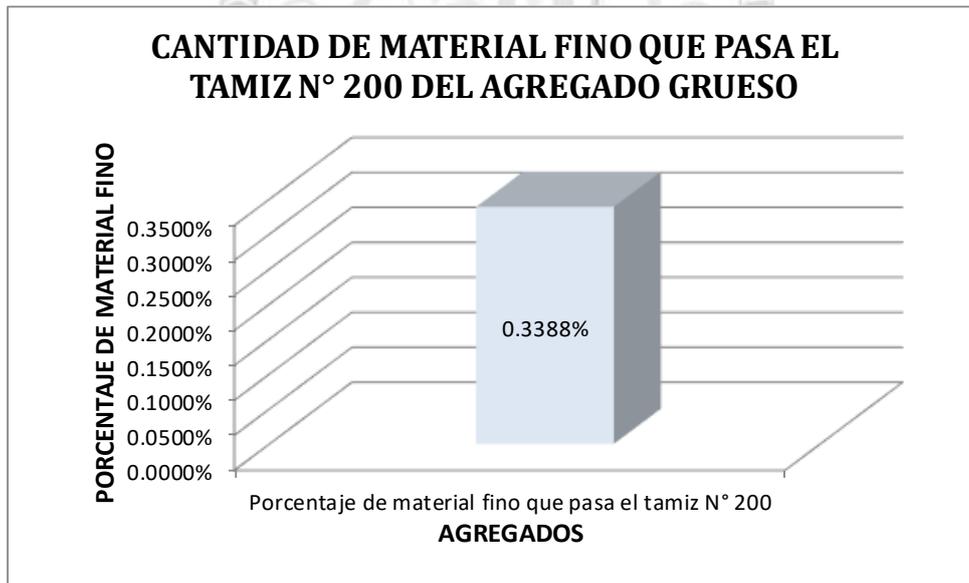
CANTIDAD DE MATERIAL FINO QUE PASA EL TAMIZ N° 200 DEL AGREGADO GRUESO

MTC E 202 - 2000, Basado en la Norma ASTM C-117 y AASHTO T-11

DATOS DEL LAVADO DEL MATERIAL	
ANTES DEL LAVADO	
Peso de la Muestra Seca (gr)	5904
DESPUÉS DEL LAVADO	
Peso de la Muestra Seca (gr)	5884

MATERIAL MAS FINO QUE EL TAMIZ N° 200	
Material que pasa el tamiz N° 200 (gr)	20.00
Porcentaje de material fino que pasa el tamiz N° 200	0.3388%

Fracciones Gruesa y Fina de la Muestra
 Fracción Fina (Pasa el Tamiz N° 200) = 0.34%
 Fracción Gruesa (Retiene el Tamiz N° 200) = 99.66%
 Total: 100.00%



Porcentaje de Material Fino que pasa el Tamiz N° 200 = 0.34%



Anexo B 16 Ensayo Análisis Granulométrico del agregado Grueso (Grueso 01) - Cantera Abrill (piedra chancada 3/4"). Fuente: Elaboración Propia.

Muestra: PIEDRA CHANCADA DE 3/4"
Fecha: lunes, 12 de septiembre de 2016

Agregado: GRUESO 01
Cantera: ABRILL

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO GRUESO
MTC E 204 - 2000, Basado en la Norma ASTM C-136 y AASHTO T-27

Peso de la muestra Inicial
Peso de la Muestra Seca = 10210.00 gr

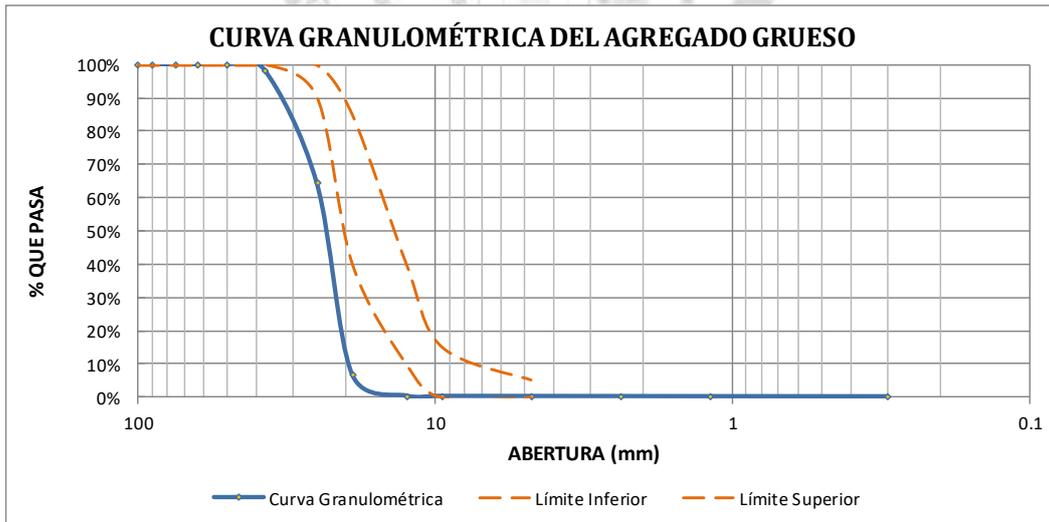
Peso de la Muestra final
Peso de la Muestra Seca = 10197.52 gr
% de Error en Peso = -0.12% Ok!

Table with 8 columns: TAMIZ Nº, ABERTURA (mm), PESO RETENIDO (gr), % RETENIDO, % RETENIDO ACUMULADO, % QUE PASA, LÍMITE INFERIOR, LÍMITE SUPERIOR. Rows include various sieve sizes from 4" down to Bandeja.

Total Fracción Retenida = 10197.52 99.88%

Fracciones de Grava, Arena y Finos de la Muestra
% de grava (Retiene Tamiz Nº 4) = 99.76%
% de arena (Pasa Nº 4 y Ret. Nº 200) = 0.12%
% de finos (Pasa Tamiz Nº 200) = 0.31%
Total: 100.06%

Fracción Gruesa
% de grava = 99.88%
% de arena = 0.12%
Total = 100.00%
Huso: 56



Tamaño Máximo Absoluto = 2"
Tamaño Máximo Nominal = 1"

Σ % RETENIDO ACUMULADO (3", 1 1/2", 3/4", 3/8", Nº 4, Nº 8, Nº 16, Nº 30, Nº 50, Nº 100)

MÓDULO DE FINEZA = 7.94



Anexo B 17 Ensayo Análisis Granulométrico del agregado Grueso (Grueso 02) - Cantera Abrill (piedra chancada 1/2"). Fuente: Elaboración Propia.

Muestra: PIEDRA CHANCADA DE 1/2"
Fecha: jueves, 16 de febrero de 2017

Agregado: GRUESO 02
Cantera: ABRILL

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO GRUESO
MTC E 204 - 2000, Basado en la Norma ASTM C-136 y AASHTO T-27

Peso de la muestra Inicial
Peso de la Muestra Seca = 10105.00 gr

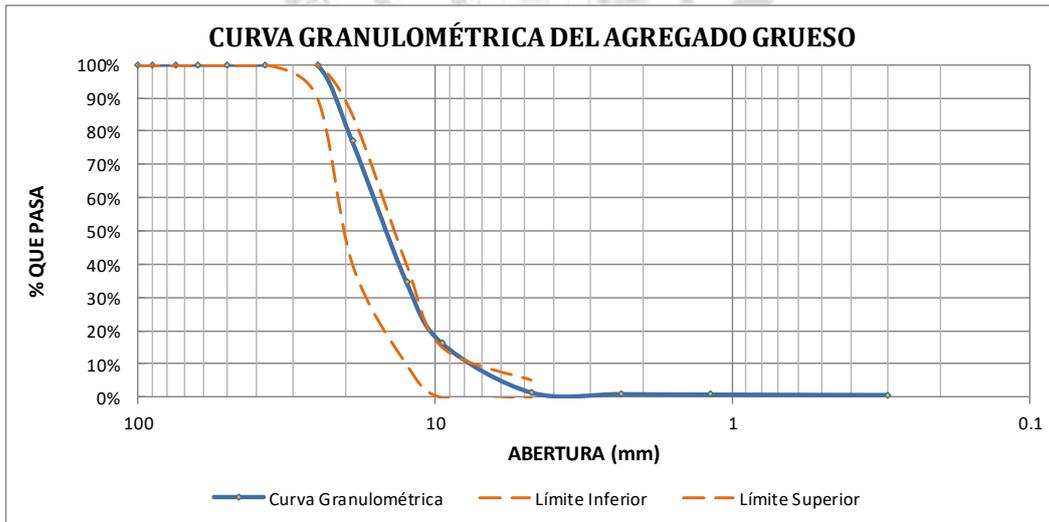
Peso de la muestra final
Peso de la Muestra Seca = 10076.48 gr
% de Error en Peso = -0.28% Ok!

Table with 8 columns: TAMIZ Nº, ABERTURA (mm), PESO RETENIDO (gr), % RETENIDO, % RETENIDO ACUMULADO, % QUE PASA, LÍMITE INFERIOR, LÍMITE SUPERIOR. Rows include various sieve sizes from 4" down to Bandeja.

Total Fracción Retenida = 10076.48 99.72%

Fracciones de Grava, Arena y Finos de la Muestra
% de grava (Retiene Tamiz Nº 4) = 98.56%
% de arena (Pasa Nº 4 y Ret. Nº 200) = 1.16%
% de finos (Pasa Tamiz Nº 200) = 0.31%
Total: 99.74%

Fracción Gruesa
% de grava = 98.84%
% de arena = 1.16%
Total = 100.00%
Huso: 56



Tamaño Máximo Absoluto = 1"
Tamaño Máximo Nominal = 3/4"

% RETENIDO ACUMULADO (3", 1 1/2", 3/4", 3/8", Nº 4, Nº 8, Nº 16, Nº 30, Nº 50, Nº 100)

MÓDULO DE FINEZA = 7.02



Anexo B 18 Mezcla de agregados Gruesos (Grueso 01 y 02) - Cantera Abrill (grava angulosa de 1").
Fuente: Elaboración Propia.

Muestra: GRAVA ANGULOSA DE 1"

Grueso 01: ABRILL

Grueso 02: ABRILL

MEZCLA DE AGREGADOS GRUESOS

GRAVA ANGULOSA DE "3/4" = 30.00%

GRAVA ANGULOSA DE 1/2" = 70.00%

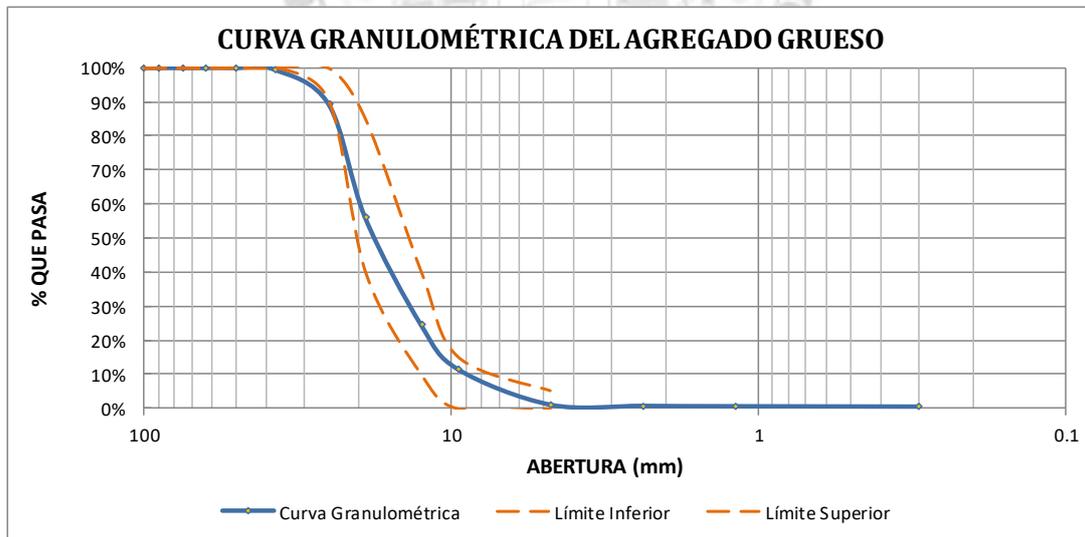
TAMIZ Nº	ABERTURA (mm)	% RETENIDO DE LA MEZCLA	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA	HUSO: 56	
					LÍMITE INFERIOR	LÍMITE SUPERIOR
4"	100	0.00%	0.00%	100.00%	100%	100%
3½"	90	0.00%	0.00%	100.00%	100%	100%
3"	75	0.00%	0.00%	100.00%	100%	100%
2½"	63	0.00%	0.00%	100.00%	100%	100%
2"	50	0.00%	0.00%	100.00%	100%	100%
1½"	37.5	0.51%	0.51%	99.49%	100%	100%
1"	25	10.20%	10.71%	89.29%	90%	100%
3/4"	19	33.35%	44.07%	55.93%	40%	85%
1/2"	12.5	31.44%	75.51%	24.49%	10%	40%
3/8"	9.5	12.92%	88.43%	11.57%	0%	15%
Nº 4	4.75	10.42%	98.85%	1.15%	0%	5%
Nº 8	2.36	0.34%	99.19%	0.81%		
Nº 16	1.18	0.10%	99.29%	0.71%		
Nº 50	0.30	0.10%	99.40%	0.60%		
Bandeja		0.13%	99.52%			

Total Fracción Retenida en Lavado = 99.52%

Fracciones de Grava, Arena y Finos de la Muestra
 % de grava (Retiene Tamiz Nº 4) = 98.85%
 % de arena (Pasa Nº 4 y Ret. Nº 200) = 0.68%
 % de finos (Pasa Tamiz Nº 200) = 0.31%
 Total: 169.83%

Fracción Gruesa
 % de grava = 99.32%
 % de arena = 0.68%
 Total = 100.00%

Huso: 56



Tamaño Máximo Absoluto = 2"

Tamaño Máximo Nominal = 1"

$$\sum \% \text{RETENIDO ACUMULADO} (3", 1\frac{1}{2}", 3/4", 3/8", \text{N}^\circ 4, \text{N}^\circ 8, \text{N}^\circ 16, \text{N}^\circ 30, \text{N}^\circ 50, \text{N}^\circ 100)$$

MÓDULO DE FINEZA = 7.29



Anexo B 19 Ensayo Peso Específico y Absorción del agregado Grueso (Grueso 01) - Cantera Abrill (Piedra chancada 3/4"). Fuente: Elaboración Propia.

Muestra: PIEDRA CHANCADA 3/4"

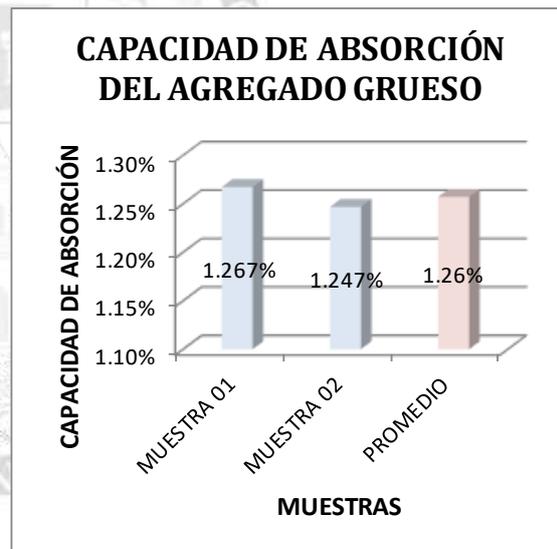
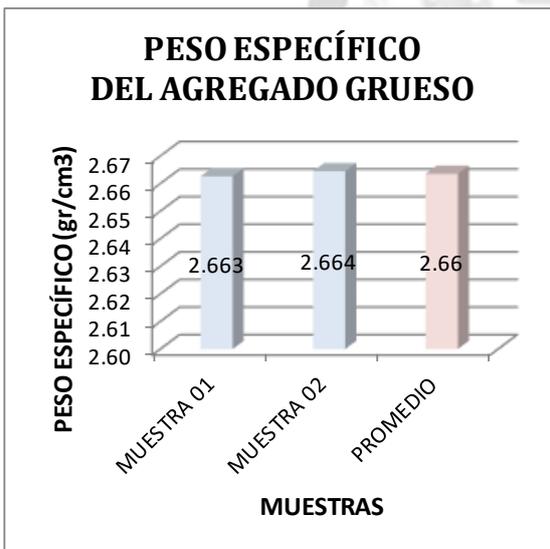
Agregado: GRUESO 01
Cantera: ABRILL

PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO

MTC E 206 - 2000, Basado en la Norma ASTM C-127 y AASHTO T-85

DATOS DEL ENSAYO	MUESTRA 01	MUESTRA 02
Peso de la Muestra Seca (gr)	868.00	802.00
Peso de la muestra saturada sobre la canastilla (gr)	542.00	501.00
Temperatura del Agua (°C)	15.7	15.7
Peso de la Muestra Saturada con Superficie Seca (gr)	879.00	812.00
Peso del Agua Absorbida (gr)	11.00	10.00
Peso Específico (gr/cm ³)	2.663	2.664
Capacidad de Absorción	1.267%	1.247%

% de Error		
Peso Específico	0.07%	Ok!
Capacidad de Absorción	1.64%	Ok!



<p>PESO ESPECÍFICO = 2.66 gr/cm³ CAPACIDAD DE ABSORCIÓN = 1.26%</p>



Anexo B 20 Ensayo Peso Específico y Absorción del agregado Grueso (Grueso 02) - Cantera Abrill (Piedra chancada 1/2"). Fuente: Elaboración Propia.

Muestra: PIEDRA CHANCADA DE 1/2"

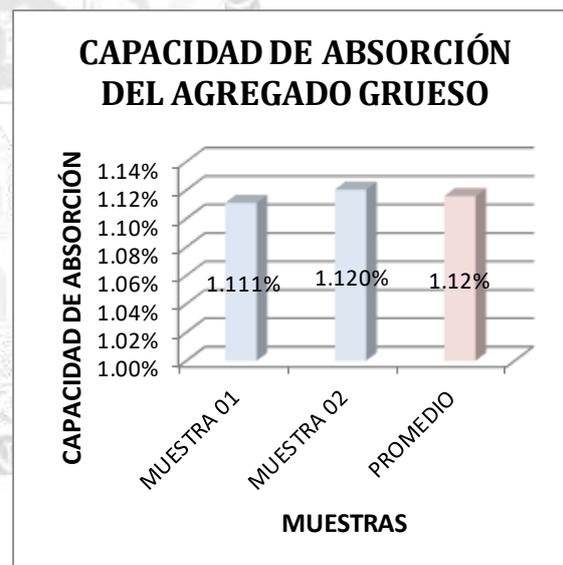
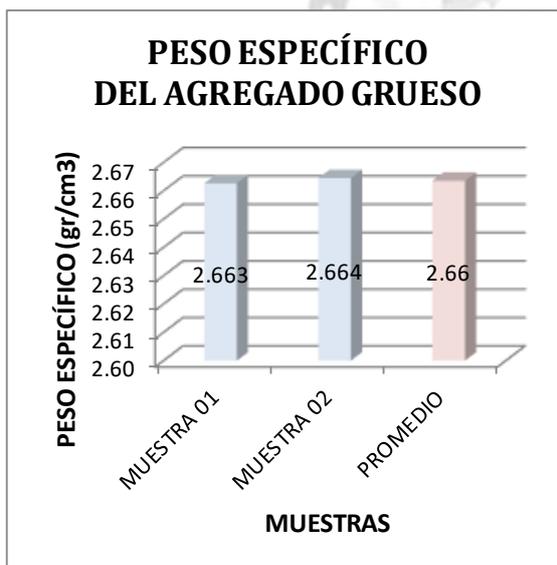
Agregado: GRUESO 02
Cantera: ABRILL

PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO

MTC E 206 - 2000, Basado en la Norma ASTM C-127 y AASHTO T-85

DATOS DEL ENSAYO	MUESTRA 01	MUESTRA 02
Peso de la Muestra Seca (gr)	720.00	714.00
Peso de la muestra saturada sobre la canastilla (gr)	449.59	446.03
Temperatura del Agua (°C)	15.7	15.7
Peso de la Muestra Saturada con Superficie Seca (gr)	728.00	722.00
Peso del Agua Absorbida (gr)	8.00	8.00
Peso Específico (gr/cm3)	2.663	2.664
Capacidad de Absorción	1.111%	1.120%

% de Error		
Peso Específico	0.07%	Ok!
Capacidad de Absorción	0.84%	Ok!



PESO ESPECÍFICO = 2.66 gr/cm3
CAPACIDAD DE ABSORCIÓN = 1.12%



Anexo B 21 Ensayo Peso Unitario y Vacíos del agregado Grueso (Grueso 01) - Cantera Abrill (Piedra chancada 3/4"). Fuente: Elaboración Propia.

Muestra: PIEDRA CHANCADA 3/4"

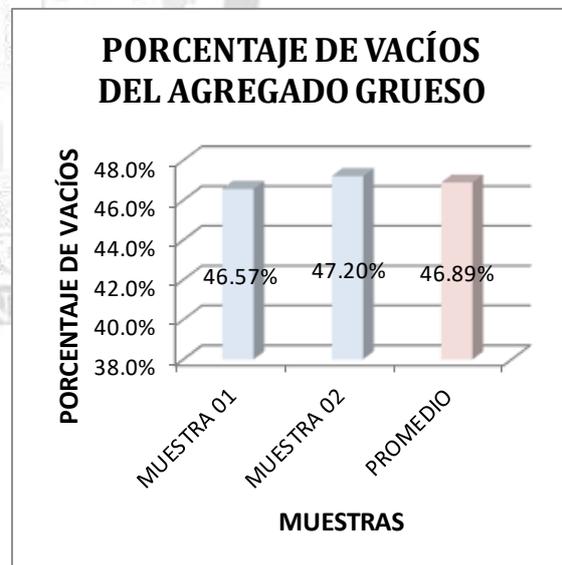
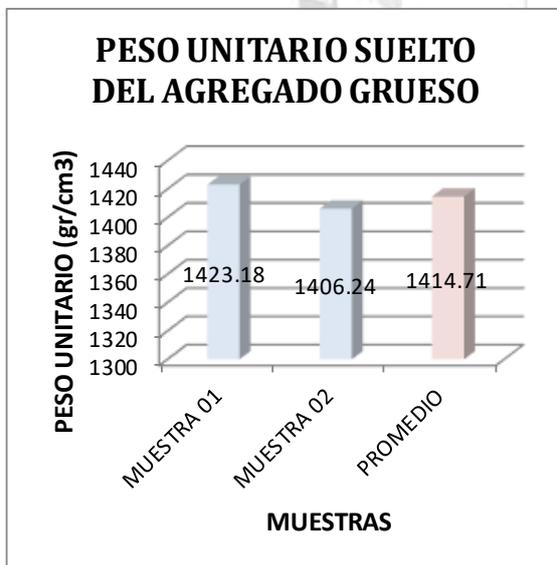
Agregado: GRUESO 01
Cantera: ABRILL

PESO UNITARIO Y VACÍOS DEL AGREGADO GRUESO

MTC E 203 - 2000, Basado en la Norma ASTM C-29

DATOS DEL ENSAYO	MUESTRA 01	MUESTRA 02
Número de Molde	P-1	P-1
Peso del Molde (gr)	8000.00	8000.00
Peso del Molde + Muestra Suelta (gr)	12200.00	12150.00
Peso de la Muestra Suelta (gr)	4200.00	4150.00
Altura del Molde (cm)	16.7	16.7
Diámetro del Molde (cm)	15.00	15.00
Volumen del Molde (cm ³)	2951.13	2951.13
Peso Unitario Suelto (gr/cm ³)	1.423	1.406
Peso Específico (kg/m ³)	2663.51	2663.51
Peso Unitario Suelto (kg/m ³)	1423.18	1406.24
Porcentaje de Vacíos	46.57%	47.20%

% de Error		
Peso Unitario Suelto	1.20%	Ok!
Porcentaje de Vacíos	1.37%	Ok!



PESO UNITARIO SUELTO = 1414.71 kg/m³
PORCENTAJE DE VACIOS = 46.89%



Anexo B 22 Ensayo Peso Unitario y Vacíos del agregado Grueso (Grueso 01) - Cantera Abrill (Piedra chancada 3/4"). Fuente: Elaboración Propia.

Muestra: PIEDRA CHANCADA 3/4"

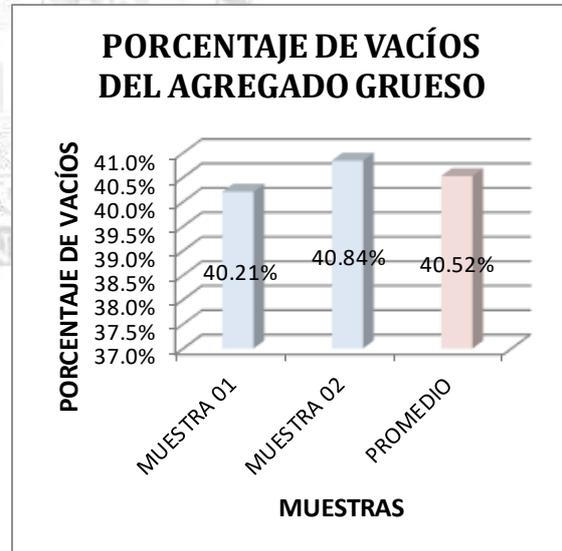
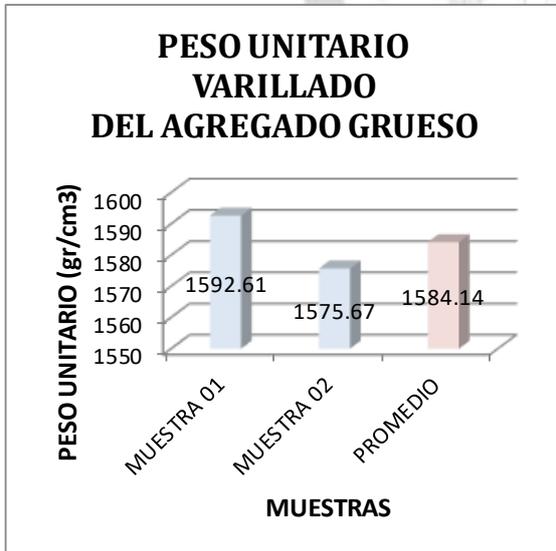
Agregado: GRUESO 01
Cantera: ABRILL

PESO UNITARIO Y VACÍOS DEL AGREGADO GRUESO

MTC E 203 - 2000, Basado en la Norma ASTM C-29

DATOS DEL ENSAYO	MUESTRA 01	MUESTRA 02
Número de Capas	3	3
Número de Golpes	25	25
Número de Molde	P-1	P-1
Peso del Molde (gr)	8000.00	8000.00
Peso del Molde + Muestra Varillada (gr)	12700.00	12650.00
Peso de la Muestra Varillada (gr)	4700.00	4650.00
Altura del Molde (cm)	16.7	16.7
Diámetro del Molde (cm)	15	15
Volumen del Molde (cm ³)	2951.13	2951.13
Peso Unitario Varillado (gr/cm ³)	1.593	1.576
Peso Específico (kg/m ³)	2663.51	2663.51
Peso Unitario Varillado (kg/m ³)	1592.61	1575.67
Porcentaje de Vacíos	40.21%	40.84%

% de Error		
Peso Unitario Varillado	1.08%	Ok!
Porcentaje de Vacíos	1.58%	Ok!



PESO UNITARIO VARILLADO = 1584.14 kg/m³
PORCENTAJE DE VACIOS = 40.52%



Anexo B 23 Ensayo Peso Unitario y Vacíos del agregado Grueso (Grueso 02) - Cantera Abrill (Piedra chancada 1/2").
Fuente: Elaboración Propia.

Muestra: PIEDRA CHANCADA DE 1/2"

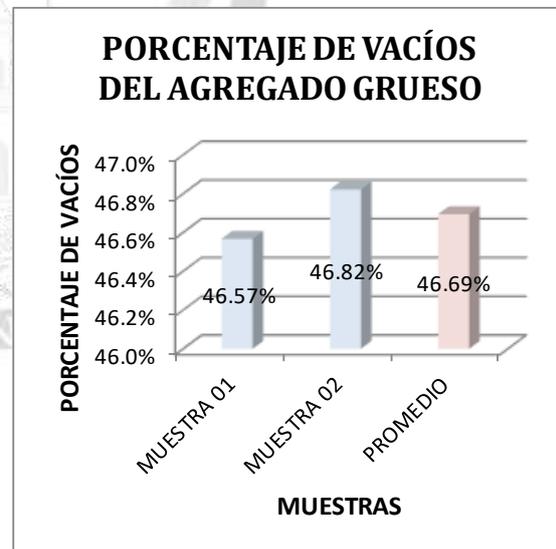
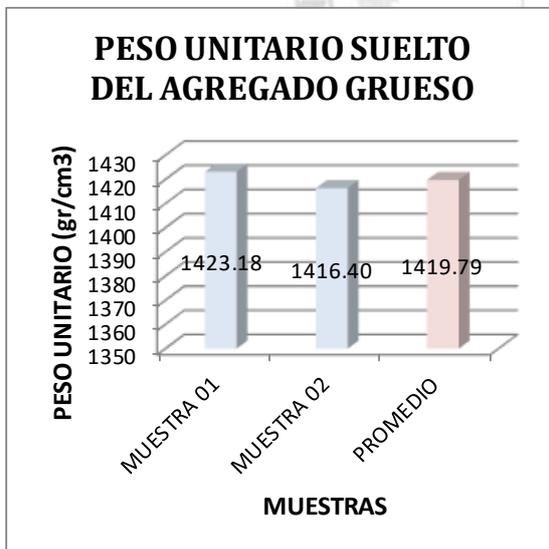
Agregado: GRUESO 02
Cantera: ABRILL

PESO UNITARIO Y VACÍOS DEL AGREGADO GRUESO

MTC E 203 - 2000, Basado en la Norma ASTM C-29

DATOS DEL ENSAYO	MUESTRA 01	MUESTRA 02
Número de Molde	P-1	P-1
Peso del Molde (gr)	8000.00	8000.00
Peso del Molde + Muestra Suelta (gr)	12200.00	12180.00
Peso de la Muestra Suelta (gr)	4200.00	4180.00
Altura del Molde (cm)	16.7	16.7
Diámetro del Molde (cm)	15	15
Volumen del Molde (cm ³)	2951.13	2951.13
Peso Unitario Suelto (gr/cm ³)	1.423	1.416
Peso Específico (kg/m ³)	2663.51	2663.51
Peso Unitario Suelto (kg/m ³)	1423.18	1416.40
Porcentaje de Vacíos	46.57%	46.82%

% de Error		
Peso Unitario Suelto	0.48%	Ok!
Porcentaje de Vacíos	0.55%	Ok!



PESO UNITARIO SUELTO = 1419.79 kg/m³
PORCENTAJE DE VACIOS = 46.69%



Anexo B 24 Ensayo Peso Unitario y Vacíos del agregado Grueso (Grueso 02) - Cantera Abrill (Piedra chancada 1/2"). Fuente: Elaboración Propia.

Muestra: PIEDRA CHANCADA DE 1/2"

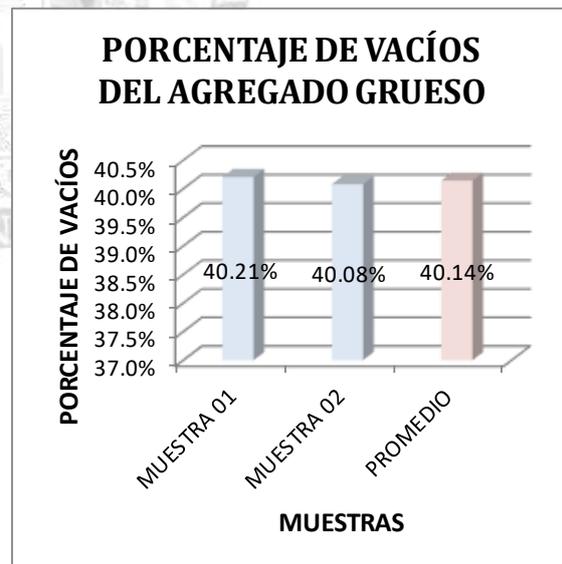
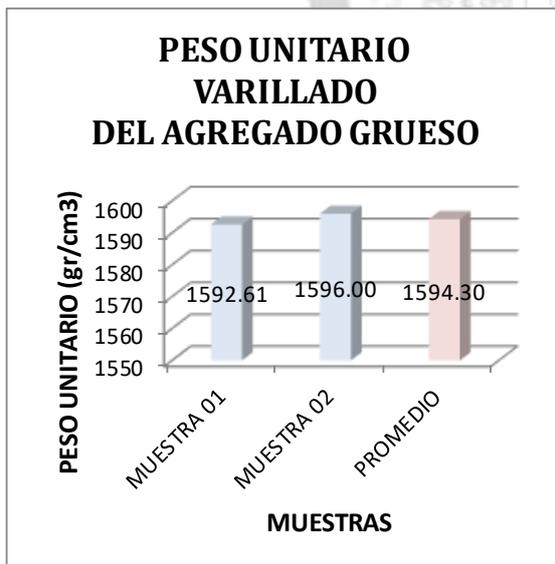
Agregado: GRUESO 02
Cantera: ABRILL

PESO UNITARIO Y VACÍOS DEL AGREGADO GRUESO

MTC E 203 - 2000, Basado en la Norma ASTM C-29

DATOS DEL ENSAYO	MUESTRA 01	MUESTRA 02
Número de Capas	3	3
Número de Golpes	25	25
Número de Molde	P-1	P-1
Peso del Molde (gr)	8000.00	8000.00
Peso del Molde + Muestra Varillada (gr)	12700.00	12710.00
Peso de la Muestra Varillada (gr)	4700.00	4710.00
Altura del Molde (cm)	16.7	16.7
Diámetro del Molde (cm)	15	15
Volumen del Molde (cm ³)	2951.13	2951.13
Peso Unitario Varillado (gr/cm ³)	1.593	1.596
Peso Específico (kg/m ³)	2663.51	2663.51
Peso Unitario Varillado (kg/m ³)	1592.61	1596.00
Porcentaje de Vacíos	40.21%	40.08%

% de Error		
Peso Unitario Varillado	0.21%	Ok!
Porcentaje de Vacíos	0.32%	Ok!



PESO UNITARIO VARILLADO = 1594.30 kg/m³
PORCENTAJE DE VACIOS = 40.14%



Anexo B 25 Ensayo Índice de aplanamiento y alargamiento del agregado Grueso (Grueso 01) - Cantera Abrill (piedra chancada 3/4"). Fuente: Elaboración Propia.

Muestra: PIEDRA CHANCADA DE 3/4"

Agregado: GRUESO 01

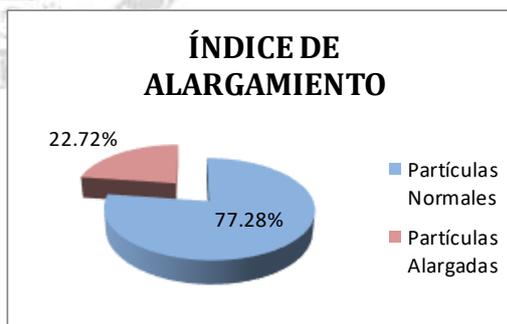
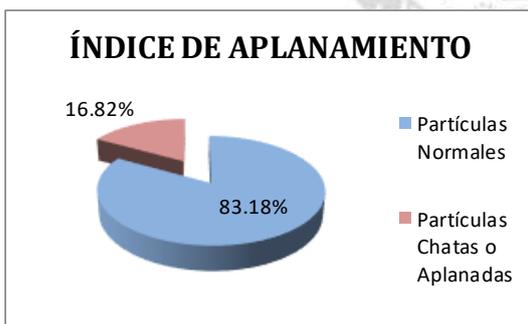
Cantera: ABRILL

ÍNDICE DE APLANAMIENTO Y ALARGAMIENTO

MTC E 221 - 2000, Basado en la Norma NET 354/91

Table with 5 columns: PASA TAMIZ, RETIENE TAMIZ, PESO SECO DE LA MUESTRA REPRESENTATIVA (gr), PESO SECO (gr), and % TOTAL. Rows include various sieve sizes and a total row showing 16.82% for flat particles.

Table with 5 columns: PASA TAMIZ, RETIENE TAMIZ, PESO SECO DE LA MUESTRA REPRESENTATIVA (gr), PESO SECO (gr), and % TOTAL. Rows include various sieve sizes and a total row showing 22.72% for elongated particles.



ÍNDICE DE APLANAMIENTO = 16.82%

ÍNDICE DE ALARGAMIENTO = 22.72%



Anexo B 26 Ensayo Índice de aplanamiento y alargamiento del agregado Grueso (Grueso 02) - Cantera Abrill (piedra chancada 1/2"). Fuente: Elaboración Propia.

Muestra: PIEDRA CHANCADA DE 1/2"

Agregado: GRUESO 02

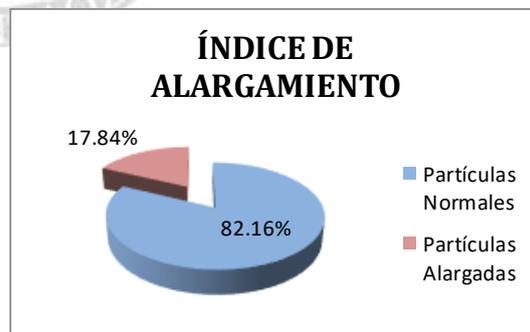
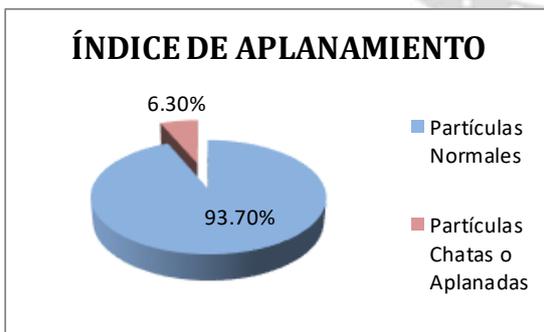
Cantera: ABRILL

ÍNDICE DE APLANAMIENTO Y ALARGAMIENTO

MTC E 221 - 2000, Basado en la Norma NLT 354/91

PASA TAMIZ	RETIENE TAMIZ	PESO SECO DE LA MUESTRA REPRESENTATIVA (gr)	PARTÍCULAS CHATAS	
			PESO SECO (gr)	% TOTAL
2 1/2" (63 mm)	2" (50 mm)	-	-	-
2" (50 mm)	1 1/2" (37.5 mm)	-	-	-
1 1/2" (37.5 mm)	1" (25 mm)	-	-	-
1" (25 mm)	3/4" (19 mm)	586.00	53.00	1.00%
3/4" (19 mm)	1/2" (12.5 mm)	1074.00	214.00	4.03%
1/2" (12.5 mm)	3/8" (9.5 mm)	344.00	52.00	0.98%
3/8" (9.5 mm)	1/4" (6.3 mm)	126.00	16.00	0.30%
TOTALES		5316.00	335.00	6.30%

PASA TAMIZ	RETIENE TAMIZ	PESO SECO DE LA MUESTRA REPRESENTATIVA (gr)	PARTÍCULAS ALARGADAS	
			PESO SECO (gr)	% TOTAL
2" (50 mm)	1 1/2" (37.5 mm)	-	-	-
1 1/2" (37.5 mm)	1" (25 mm)	-	-	-
1" (25 mm)	3/4" (19 mm)	586.00	38.00	1.78%
3/4" (19 mm)	1/2" (12.5 mm)	1074.00	214.00	10.05%
1/2" (12.5 mm)	3/8" (9.5 mm)	344.00	72.00	3.38%
3/8" (9.5 mm)	1/4" (6.3 mm)	126.00	56.00	2.63%
TOTALES		2130.00	380.00	17.84%



ÍNDICE DE APLANAMIENTO = 6.30%

ÍNDICE DE ALARGAMIENTO = 17.84%



Anexo B 27 Ensayo Desgaste por Abrasión en la máquina de los Ángeles agregado Grueso - Cantera Abrill.
Fuente: Elaboración Propia.

Muestra: GRAVA ANGULOSA DE 1"

Material
GRUESO1: ABRILL
GRUESO2: ABRILL

DESGASTE POR ABRASIÓN EN LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES

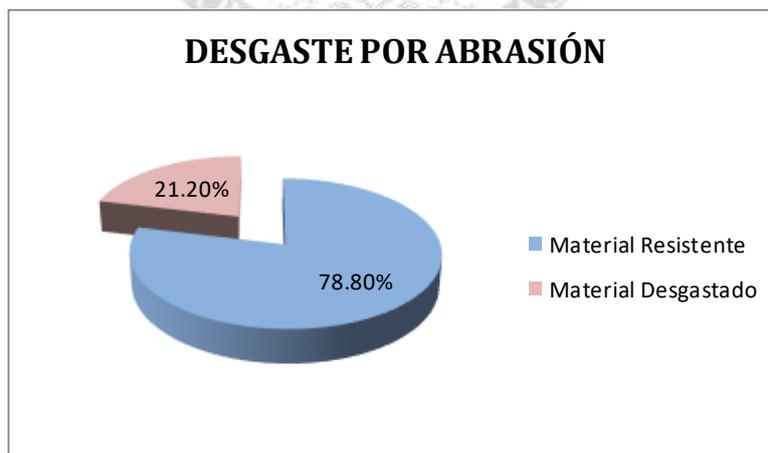
MTC E 207 - 2000, Basado en la Norma ASTM C-131, ASTM C-535 y AASHTO T-96

DATOS DE LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES	DATOS DE LA CARGA ABRASIVA (Esferas)
Longitud Interior (cm) = 50.80	Diámetro Promedio (mm) = 46.65
Diámetro Interior (cm) = 71.10	Peso Promedio (gr) = 416.06
Velocidad de Giro del Cilindro (rpm) = 33	Número de Esferas = 12
Número total de vueltas = 500	

GRANULOMETRÍA SEGÚN TIPO DE GRADACIÓN		
Pasa Tamiz	Retiene Tamiz	Gradación A
3" (75 mm)	2½" (63 mm)	-
2½" (63 mm)	2" (50 mm)	-
2" (50 mm)	1½" (37.5 mm)	-
1½" (37.5 mm)	1" (25 mm)	1250 ± 25
1" (25 mm)	¾" (19 mm)	1250 ± 25
¾" (19 mm)	½" (12.5 mm)	1250 ± 10
½" (12.5 mm)	3/8" (9.5 mm)	1250 ± 10
3/8" (9.5 mm)	¼" (6.3 mm)	-
¼" (6.3 mm)	Nº 4 (4.75 mm)	-
Nº 4 (4.75 mm)	Nº 8 (2.36 mm)	-
Total (gr)		5000 ± 10

PESO DE LA MUESTRA SECA ANTES DEL ENSAYO	
	1256.00
	1246.00
	1248.00
	1250.00
	-
	-
	-
	5000.00

DATOS DEL ENSAYO	
Peso de la Muestra seca retenida en el tamiz Nº 12, después del ensayo (gr)	3940.00
Peso que pasa el tamiz Nº 12, después del ensayo (gr)	1060.00



% DE ABRASIÓN = 21.20%



ANEXOS C DISEÑO DE MEZCLA

Anexo C 1 Gradación continua de agregado grueso.
Fuente: Elaboración Propia.

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO GRUESO-GRADACION CONTINUA

MTC E 204 - 2000, Basado en la Norma ASTM C-136 y AASHTO T-27

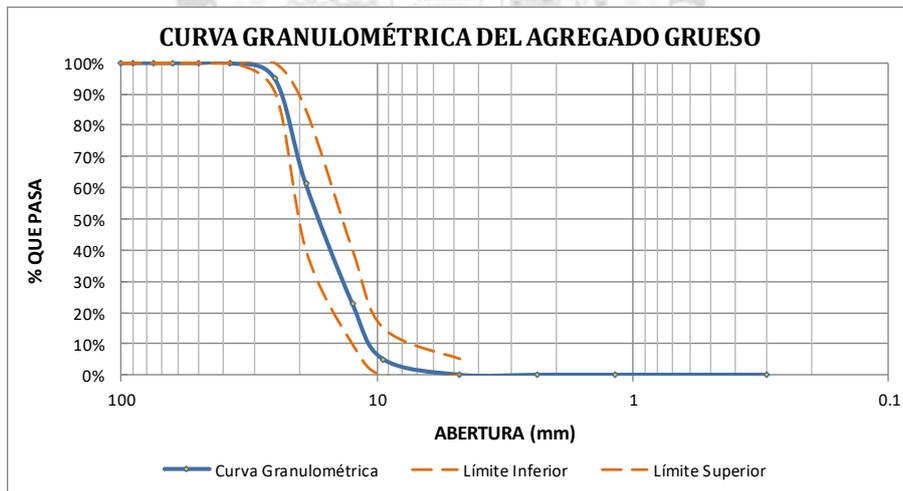
Peso de la Muestra Seca = 9750.00 gr

TAMIZ Nº	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (gr)	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA	HUSO: 56	
						LÍMITE INFERIOR	LÍMITE SUPERIOR
4"	100	0.00	0.00%	0.00%	100.00%	100%	100%
3½"	90	0.00	0.00%	0.00%	100.00%	100%	100%
3"	75	0.00	0.00%	0.00%	100.00%	100%	100%
2½"	63	0.00	0.00%	0.00%	100.00%	100%	100%
2"	50	0.00	0.00%	0.00%	100.00%	100%	100%
1½"	37.5	0.00	0.00%	0.00%	100.00%	100%	100%
1"	25	500.00	5.13%	5.13%	94.87%	90%	100%
¾"	19	3250.00	33.33%	38.46%	61.54%	40%	85%
½"	12.5	3750.00	38.46%	76.92%	23.08%	10%	40%
⅜"	9.5	1750.00	17.95%	94.87%	5.13%	0%	15%
Nº 4	4.75	500.00	5.13%	100.00%	0.00%	0%	5%
Nº 8	2.36		0.00%	100.00%	0.00%		
Nº 16	1.18		0.00%	100.00%	0.00%		
Nº 50	0.30		0.00%	100.00%	0.00%		
Bandeja			0.00%	100.00%			

Fracción Retenida en Lavado = **9750.00** **100.00%**

Fracciones de Grava, Arena y Finos de la Muestra
 % de grava (Retiene Tamiz Nº 4) = 100.00%
 % de arena (Pasa Nº 4 y Ret. Nº 200) = 0.00%
 % de finos (Pasa Tamiz Nº 200) = 0.16%
 Total: 100.16%

Fracción Gruesa
 % de grava = 100.00%
 % de arena = 0.00%
 Total = 100.00%
 Huso: 56



Tamaño Máximo Absoluto = 1½"	Tamaño Máximo Nominal = 1"
------------------------------	----------------------------

$$\sum \% \text{ RETENIDO ACUMULADO } (3", 1\frac{1}{2}", 3/4", 3/8", N^{\circ} 4, N^{\circ} 8, N^{\circ} 16, N^{\circ} 30, N^{\circ} 50, N^{\circ} 100)$$

MÓDULO DE FINEZA = 7.33



Anexo C 2 Gradación continua de agregado fino.
Fuente: Elaboración Propia.

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL AGREGADO FINO-GRADACION CONTINUA

MTC E 204 - 2000, Basado en la Norma ASTM C-136 y AASHTO T-27

Peso de la Muestra Seca = 500.00 gr

TAMIZ Nº	ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (gr)	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO	% QUE PASA	HUSO	
						LÍMITE INFERIO	LÍMITE SUPERI
3/8"	9.5	0.00	0.00%	0.00%	100.00%	100%	100%
Nº 4	4.75	12.50	2.50%	2.50%	97.50%	95%	100%
Nº 8	2.36	37.50	7.50%	10.00%	90.00%	80%	100%
Nº 16	1.18	112.50	22.50%	32.50%	67.50%	50%	85%
Nº 30	0.600	125.00	25.00%	57.50%	42.50%	25%	60%
Nº 50	0.300	125.00	25.00%	82.50%	17.50%	5%	30%
Nº 100	0.150	62.50	12.50%	95.00%	5.00%	0%	10%
Nº 200	0.075	25.00	5.00%	100.00%	0.00%		
Bandeja		0.00	0.00%	100.00%			

ón Retenida en Lavado =

500.00	100.00%
--------	---------

Fracciones de Grava, Arena y Finos de la Muestra

% de grava (Retiene Tamiz Nº 4) = 2.50%

% de arena (Pasa Nº 4 y Ret. Nº 200) = 97.50%

% de finos (Pasa Tamiz Nº 200) = 2.00%

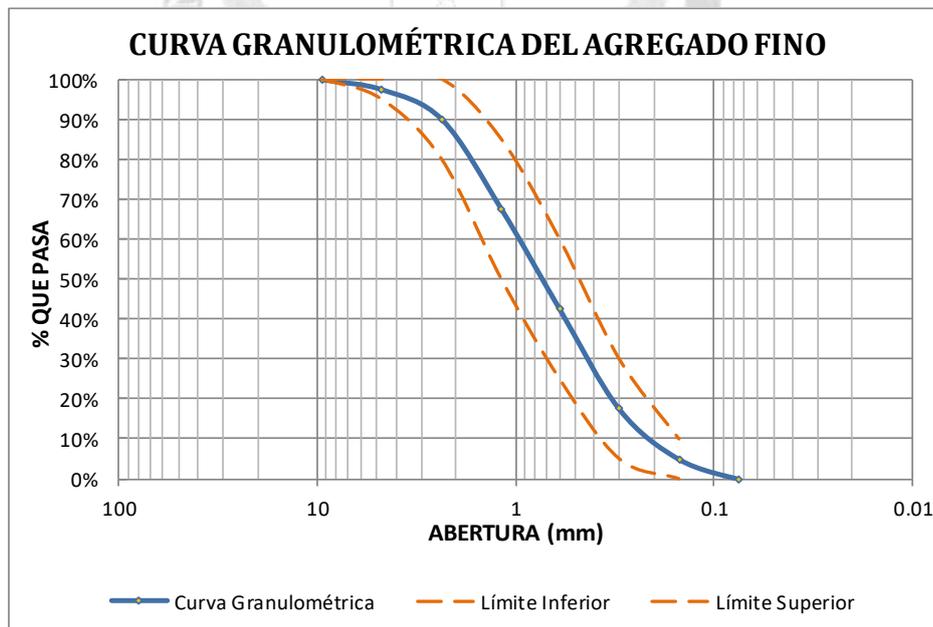
Total: 102.00%

Fracción Gruesa

% de grava = 2.50%

% de arena = 97.50%

Total = 100.00%



\sum % RETENIDO ACUMULADO (3/8", Nº 4, Nº 8, Nº 16, Nº 30, Nº 50, Nº 100)

Módulo de Fineza recomendable estará entre 2.35 y 3.

MÓDULO DE FINEZA = 2.80

Observaciones: Es una ARENA MEDIA



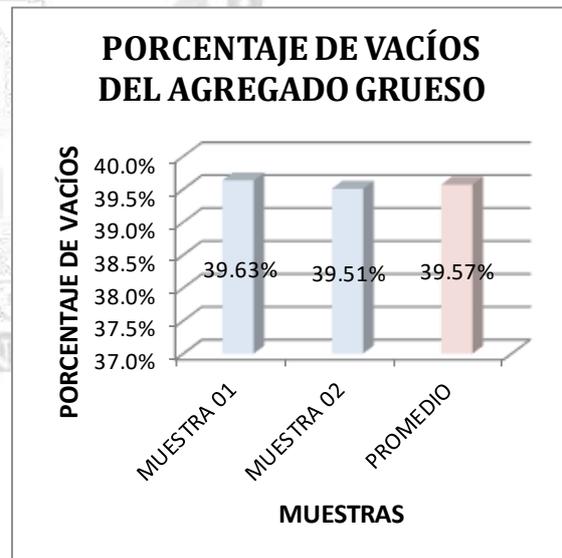
Anexo C 3 Peso unitario y vacíos del grueso con gradación continua.
Fuente: Elaboración Propia.

PESO UNITARIO Y VACÍOS DEL AGREGADO GRUESO-GRADACION CONTINUA

MTC E 203 - 2000, Basado en la Norma ASTM C-29

DATOS DEL ENSAYO	MUESTRA 01	MUESTRA 02
Número de Capas	3	3
Número de Golpes	25	25
Número de Molde	P-1	P-1
Peso del Molde (gr)	8000.00	8000.00
Peso del Molde + Muestra Varillada (gr)	12745.00	12755.00
Peso de la Muestra Varillada (gr)	4745.00	4755.00
Altura del Molde (cm)	16.7	16.7
Diámetro del Molde (cm)	15	15
Volumen del Molde (cm ³)	2951.13	2951.13
Peso Unitario Varillado (gr/cm ³)	1.608	1.611
Peso Específico (kg/m ³)	2663.51	2663.51
Peso Unitario Varillado (kg/m ³)	1607.86	1611.25
Porcentaje de Vacíos	39.63%	39.51%

% de Error		
Peso Unitario Varillado	0.21%	Ok!
Porcentaje de Vacíos	0.32%	Ok!



PESO UNITARIO VARILLADO = 1609.55 kg/m³
PORCENTAJE DE VACIOS = 39.57%



Anexo C 4 Diseño de Mezcla Para Concreto Hidráulico M 2.
Fuente: Elaboración Propia.

DISEÑO DE MEZCLA PARA CONCRETO M2

1.- Condiciones de Diseño

1.1.- Uso de Aditivos

Plastificante: NO

Incorporador de Aire: NO

1.2.- Tipo de Diseño, Resistencia y Asentamiento

Diseño por: Resistencia

$f'_c = 245 \text{ kg/cm}^2$
Slump = 4"

2.- Características de los Materiales

2.1.- Cemento

Marca: Yura
Tipo: HE

Peso Específico: 2.89 gr/cm³
Peso Volumétrico: 1500 kg/m³

2.2.- Agua

Agua potable de la red pública

2.3.- Agregado Grueso

Tipo de Agregado: Anguloso

Contenido de Humedad: 0.35%

Peso Específico: 2.60 gr/cm³
Capacidad de absorción: 1.26%
Peso Unitario Varillado: 1609.55 kg/m³

Tamaño Máximo Absoluto: 1½"

Tamaño Máximo Nominal: 1"

Módulo de Fineza: 7.33

2.4.- Agregado Fino

Tipo de Agregado: Arena Media

Contenido de Humedad: 1.09%

Peso Específico: 2.71 gr/cm³
Capacidad de absorción: 1.47%

Módulo de Fineza: 2.80

2.5.- Aditivos

Plastificante: Ninguno

Incorporador de Aire: Ninguno

3.- Volumen de Agua y Contenido de Aire Atrapado por metro cúbico de Concreto

Asentamiento = 4"

Tamaño Máximo Nominal = 1"

3.1.- Selección del Volumen de Agua por metro cúbico de Concreto

El Volumen de Agua será: 193 lt/m³

3.2.- Selección del Contenido de Aire Atrapado por metro cúbico de Concreto

Por lo tanto el Volumen de Aire será: 1.80%



4.- Relación Agua/Cemento y Contenido de Cemento

4.1.- Selección de la relación Agua/Cemento por Resistencia

$$\text{Agua/Cemento} = 0.677$$

4.2.- Cálculo del contenido de Cemento

$$\text{Cantidad de Cemento} = 285.00 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Factor Cemento} = 6.71 \text{ bolsas/m}^3$$

$$6.705882425$$

5.- Cálculo del Volumen Absoluto de la pasta por metro cúbico

Material	Peso (kg)	PE (kg/m ³)	Vol. Abs. (m ³)
Cemento	285.00	2890	0.0986
Agua	193.00	1000	0.1930
Aire	1.80%	-	0.0180

$$\text{Volumen Absoluto} = 0.3096 \text{ m}^3$$

6.- Cálculo de los Volúmenes Absolutos de los Agregados Grueso y Fino

$$\text{Volumen Absoluto de los Agregados} = 0.6904 \text{ m}^3$$

6.1.- Cálculo del Volumen Absoluto del Agregado Grueso (Método: PU Varillado Agr. Grueso)

$$\text{Tamaño Máximo Nominal} = 1''$$

$$\text{Módulo de Fineza del Agregado Fino} = 2.80$$

$$\text{Factor de Agregado Grueso (b/bo)} = 0.67$$

$$\text{Peso Unitario Varillado del Agregado Grueso} = 1609.55 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Peso del Agregado Grueso} = 1078.40 \text{ kg}$$

$$\text{Peso Específico del Agregado Grueso} = 2.60 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Volumen Absoluto del Agregado Grueso} = 0.4148 \text{ m}^3$$

6.2.- Cálculo del Volumen Absoluto del Agregado Grueso (Método: Combinación de MF)

$$\text{Tamaño Máximo Nominal} = 1''$$

$$\text{Bolsas de Cemento por metro cúbico} = 6.71 \text{ bolsas/m}^3$$

$$\text{Módulo de Fineza de la Combinación de Agregados} = 5.32$$

$$\text{Módulo de Fineza del Agregado Grueso} = 7.33$$

$$\text{Módulo de Fineza del Agregado Fino} = 2.80$$

$$\% \text{ de Agregado Grueso} = 55.51\%$$

$$\text{Volumen Absoluto de los Agregados} = 0.6904 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen Absoluto del Agregado Grueso} = 0.3832 \text{ m}^3$$

6.3.- Cálculo de los Volúmenes Absolutos de los Agregados Grueso y Fino

$$\text{Volumen Absoluto del Agregado Grueso} = 0.3832 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen Absoluto del Agregado Fino} = 0.3071 \text{ m}^3$$

(Método: Combinación de MF)

7.- Cálculo de los Pesos Secos de los Agregados Grueso y Fino

$$\text{Peso Específico del Agregado Grueso} = 2.60 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Peso Específico del Agregado Fino} = 2.71 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Peso Seco del Agregado Grueso} = 996.41 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Peso Seco del Agregado Fino} = 832.37 \text{ kg/m}^3$$



8.- Pesos Secos de los Materiales por metro cúbico

Materiales	Pesos Secos (kg/m3)
Cemento	285.00
Agua	193.00
Agregado Grueso	996.41
Agregado Fino	832.37

Total = 2306.79 kg/m3

9.- Corrección de los Agregados por Humedad

Peso Seco del Agregado Grueso = 996.41 kg/m3

Peso Seco del Agregado Fino = 832.37 kg/m3

Contenido de Humedad del Agregado Grueso = 0.35%

Contenido de Humedad del Agregado Fino = 1.09%

Peso Húmedo del Agregado Grueso = 999.90 kg/m3

Peso Húmedo del Agregado Fino = 841.45 kg/m3

10.- Ajustes por Humedad y Absorción de los agregados

Capacidad de absorción del Agregado Grueso = 1.26%

Capacidad de absorción del Agregado Fino = 1.47%

Ajuste de Agua del Agregado Grueso = 9.07 lt

Ajuste de Agua del Agregado Fino = 3.16 lt

Ajuste Total de Agua = 12.23 lt

Agua de Diseño = 193 lt/m3

Agua Efectiva = 205 lt/m3

11.- Pesos Corregidos de los Materiales por metro cúbico

Materiales	Pesos Húmedos (kg/m3)
Cemento	285.00
Agua	205.23
Agregado Grueso	999.90
Agregado Fino	841.45

Total = 2331.58 kg/m3

12.- Proporción en Peso

Cemento	Agreg. Fino	Agreg. Grueso	Agua
1 kg	2.95 kg	3.51 kg	0.720 lt

13.- Proporción en Peso por tandas de una bolsa de Cemento

Cemento	Agreg. Fino	Agreg. Grueso	Agua
1 bolsa	125.48 kg	149.11 kg	30.60 lt

14.- Proporción en Peso por tandas de un metro cúbico de Concreto

Cemento	Agreg. Fino	Agreg. Grueso	Agua
6.71 bolsas	841.45 kg	999.90 kg	205.23 lt



Anexo C 5 Diseño de mezcla de concreto hidráulico M 3.
Fuente: Elaboración Propia.

DISEÑO DE MEZCLA PARA CONCRETO M 3

1.- Condiciones de Diseño

1.1.- Uso de Aditivos

Plastificante: SI Incorporador de Aire: NO
Marca: ULMEN W-84
Porcentaje: 1.60% en peso del Cemento
Peso Específico: 1.05 gr/cm³

1.2.- Tipo de Diseño, Resistencia y Asentamiento

Diseño por: Resistencia $f'_c = 245 \text{ kg/cm}^2$
Slump = 4"

2.- Características de los Materiales

2.1.- Cemento

Marca: Yura Peso Específico: 2.89 gr/cm³
Tipo: HE Peso Volumétrico: 1500 kg/m³

2.2.- Agua

Agua potable de la red pública

2.3.- Agregado Grueso

Tipo de Agregado: Anguloso Peso Específico: 2.60 gr/cm³
Contenido de Humedad: 0.35% Capacidad de absorción: 1.26%
Peso Unitario Varillado: 1609.55 kg/m³

Tamaño Máximo Absoluto: 1½"

Tamaño Máximo Nominal: 1"

Módulo de Fineza: 7.33

2.4.- Agregado Fino

Tipo de Agregado: Arena Media Peso Específico: 2.71 gr/cm³
Contenido de Humedad: 1.09% Capacidad de absorción: 1.47%

Módulo de Fineza: 2.80

2.5.- Aditivos

Plastificante: ULMEN W-84 Incorporador de Aire: Ninguno
Porcentaje: 1.60%
Reduce Agua en: 15.00%

3.- Volumen de Agua y Contenido de Aire Atrapado por metro cúbico de Concreto

Asentamiento = 4"

Tamaño Máximo Nominal = 1"

3.1.- Selección del Volumen de Agua por metro cúbico de Concreto

El Volumen de Agua será: 185 lt/m³

3.2.- Selección del Contenido de Aire Atrapado por metro cúbico de Concreto

Por lo tanto el Volumen de Aire será: 1.80%



4.- Relación Agua/Cemento y Contenido de Cemento

4.1.- Selección de la relación Agua/Cemento por Resistencia

$$\text{Agua/Cemento} = 0.649$$

4.2.- Cálculo del contenido de Cemento

$$\text{Cantidad de Cemento} = 285.00 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Factor Cemento} = 6.71 \text{ bolsas/m}^3$$

5.- Cálculo del Volumen Absoluto de la pasta por metro cúbico

Materiales	Peso (kg)	PE (kg/m3)	Vol. Abs. (m3)
Cemento	285.00	2890	0.0986
Agua	185.00	1000	0.1850
Aire	1.80%	-	0.0180
Aditivo Plastificante	4.56	1050	0.0043

$$\text{Volumen Absoluto} = 0.3060 \text{ m}^3$$

6.- Cálculo de los Volúmenes Absolutos de los Agregados Grueso y Fino

$$\text{Volumen Absoluto de los Agregados} = 0.6940 \text{ m}^3$$

6.1.- Cálculo del Volumen Absoluto del Agregado Grueso (Método: PU Varillado Agr. Grueso)

$$\text{Tamaño Máximo Nominal} = 1''$$

$$\text{Módulo de Fineza del Agregado Fino} = 2.80$$

$$\text{Factor de Agregado Grueso (b/bo)} = 0.67$$

$$\text{Peso Unitario Varillado del Agregado Grueso} = 1609.55 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Peso del Agregado Grueso} = 1078.40 \text{ kg}$$

$$\text{Peso Específico del Agregado Grueso} = 2.60 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Volumen Absoluto del Agregado Grueso} = 0.4148 \text{ m}^3$$

6.2.- Cálculo del Volumen Absoluto del Agregado Grueso (Método: Combinación de MF)

$$\text{Tamaño Máximo Nominal} = 1''$$

$$\text{Bolsas de Cemento por metro cúbico} = 6.71 \text{ bolsas/m}^3$$

$$\text{Módulo de Fineza de la Combinación de Agregados} = 5.32$$

$$\text{Módulo de Fineza del Agregado Grueso} = 7.33$$

$$\text{Módulo de Fineza del Agregado Fino} = 2.80$$

$$\% \text{ de Agregado Grueso} = 55.51\%$$

$$\text{Volumen Absoluto de los Agregados} = 0.6940 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen Absoluto del Agregado Grueso} = 0.3853 \text{ m}^3$$

6.3.- Cálculo de los Volúmenes Absolutos de los Agregados Grueso y Fino

$$\text{Volumen Absoluto del Agregado Grueso} = 0.3853 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen Absoluto del Agregado Fino} = 0.3088 \text{ m}^3$$

(Método: Combinación de MF)

7.- Cálculo de los Pesos Secos de los Agregados Grueso y Fino

$$\text{Peso Específico del Agregado Grueso} = 2.60 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Peso Específico del Agregado Fino} = 2.71 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Peso Seco del Agregado Grueso} = 1001.69 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Peso Seco del Agregado Fino} = 836.78 \text{ kg/m}^3$$



8.- Pesos Secos de los Materiales por metro cúbico

Materiales	Pesos Secos (kg/m3)
Cemento	285.00
Agua	185.00
Agregado Grueso	1001.69
Agregado Fino	836.78
Aditivo Plastificante	4.56

Total = 2313.03 kg/m3

9.- Corrección de los Agregados por Humedad

Peso Seco del Agregado Grueso = 1001.69 kg/m3

Peso Seco del Agregado Fino = 836.78 kg/m3

Contenido de Humedad del Agregado Grueso = 0.35%

Contenido de Humedad del Agregado Fino = 1.09%

Peso Húmedo del Agregado Grueso = 1005.19 kg/m3

Peso Húmedo del Agregado Fino = 845.90 kg/m3

10.- Ajustes por Humedad y Absorción de los agregados

Capacidad de absorción del Agregado Grueso = 1.26%

Capacidad de absorción del Agregado Fino = 1.47%

Ajuste de Agua del Agregado Grueso = 9.12 lt

Ajuste de Agua del Agregado Fino = 3.18 lt

Ajuste Total de Agua = 12.30 lt

Agua de Diseño = 185 lt/m3

Agua Efectiva = 197 lt/m3

11.- Pesos Corregidos de los Materiales por metro cúbico

Materiales	Pesos Húmedos (kg/m3)
Cemento	285.00
Agua	197.30
Agregado Grueso	1005.19
Agregado Fino	845.90
Aditivo Plastificante	4.56

Total = 2337.95 kg/m3

12.- Proporción en Peso

Cemento	Agreg. Fino	Agreg. Grueso	Agua	Aditivo Plastif.
1 kg	2.97 kg	3.53 kg	0.692 lt	16.00 gr

13.- Proporción en Peso por tandas de una bolsa de Cemento

Cemento	Agreg. Fino	Agreg. Grueso	Agua	Aditivo Plastif.
1 bolsa	126.14 kg	149.90 kg	29.42 lt	680.00 gr

14.- Proporción en Peso por tandas de un metro cúbico de Concreto

Cemento	Agreg. Fino	Agreg. Grueso	Agua	Aditivo Plastif.
6.71 bolsas	845.90 kg	1005.19 kg	197.30 lt	4.560 kg



ANEXOS D CONCRETO EN ESTADO FRESCO

Anexo D 1 Propiedades del concreto en estado fresco y verificación del rendimiento en laboratorio. .
Fuente: Elaboración Propia.

PROPIEDADES DEL CONCRETO EN ESTADO FRESCO Y VERIFICACION DE RENDIMIENTO

MTC E 714 - 2000, Basado en la Norma ASTM C-138

TEMPERATURA AMBIENTE	19.04	°C
TEMPERATURA DEL CONCRETO	20.52	°C
SLUMP	3	pulgadas

% DE AIRE	2.2	%
-----------	-----	---

Volumen Total	1	m ³
---------------	---	----------------

DESCRIPCIÓN	PESO TOTAL CARGADO (kg)	PESO UNITARIO TEORICO (kg)
Arena Fina	752.00	2480.00
Arena Gruesa	317.18	2720.00
Piedra de 3/4"	492.40	2647.00
Piedra de 1/2"	377.00	2494.00
Cemento	285.00	2890.00
Agua	187.23	1000.00
Aditivo 1	4.56	1053.00
Total	2415.37	

PESO UNITARIO		
Olla	3.53	kg
Vol. Olla	0.01	m ³
Tara + Concreto	19.34	kg
PU=Neto Concreto	15.80	kg
Peso Unitario	2249.17	kg/m³

RENDIMIENTO	1.07
--------------------	-------------



Anexo D 2 Propiedades del concreto en estado fresco in situ y verificación del rendimiento Estación 1+145.
Fuente: Elaboración Propia.

PROPIEDADES DEL CONCRETO EN ESTADO FRESCO Y VERIFICACIÓN DE RENDIMIENTO

MTC E 714 - 2000, Basado en la Norma ASTM C-138

ESTACIÓN	1+145
-----------------	--------------

	N° Bachada	Temperatura (°C)
AMBIENTE	1	20
	2	19.75
	3	19.94
CONCRETO	1	24
	2	24.56
	3	25

SLUMP	3	pulgadas
--------------	----------	----------

% DE AIRE	2	%
------------------	----------	---

Volumen Total	7	m ³
----------------------	----------	----------------

DESCRIPCIÓN	PESO TOTAL CARGADO (kg)	PESO UNITARIO TEÓRICO (kg)
Arena Fina	3045.00	3055.00
Arena Gruesa	3969.00	3975.00
Piedra de 3/4"	7164.00	7170.00
Piedra de 1/2"	2885.00	2897.00
Cemento	2000.00	2000.00
Agua	1115.00	1120.00
Aditivo 1	32.00	32.00
Total	20210.00	20249.00
Peso cargado	2887.14	kg/m³

PESO UNITARIO		
Olla	3.53	kg
Vol. Olla	0.01	m ³
Tara + Concreto	20.34	kg
PU=Neto Concreto	16.80	kg
Peso Unitario	2391.48	kg/m³

RENDIMIENTO	1.21
--------------------	-------------



Anexo D 3 Propiedades del concreto en estado fresco in situ y verificación del rendimiento Estación 1+050.
Fuente: Elaboración Propia.

PROPIEDADES DEL CONCRETO EN ESTADO FRESCO Y VERIFICACIÓN DE RENDIMIENTO

MTC E 714 - 2000, Basado en la Norma ASTM C-138

ESTACIÓN	1+050
-----------------	--------------

	N° Bachada	Temperatura (°C)
AMBIENTE	1	25.3
	2	25.8
	3	26.05
CONCRETO	1	23.61
	2	25.14
	3	20.69
SLUMP	3.5	pulgadas
% DE AIRE	2.2	%

Volumen Total	7	m3
----------------------	----------	----

DESCRIPCIÓN	PESO TOTAL CARGADO (kg)	PESO UNITARIO TEÓRICO (kg)
Arena Fina	3040.00	3055.00
Arena Gruesa	4000.00	3975.00
Piedra de 3/4"	7150.00	7170.00
Piedra de 1/2"	2880.50	2897.00
Cemento	2000.00	2000.00
Agua	1115.00	1120.00
Aditivo 1	32.00	32.00
Total	20217.50	20249.00
Peso Cargado	2888.21	kg/m³

PESO UNITARIO		
Olla	3.53	kg
Vol. Olla	0.01	m3
Tara + Concreto	20.34	kg
PU=Neto Concreto	16.78	kg
Peso Unitario	2387.99	kg/m³

RENDIMIENTO	1.21
--------------------	-------------



ANEXOS E CONCRETO EN ESTADO ENDURECIDO

Anexo E 1 Resistencia a compresión.
Fuente: Elaboración Propia.

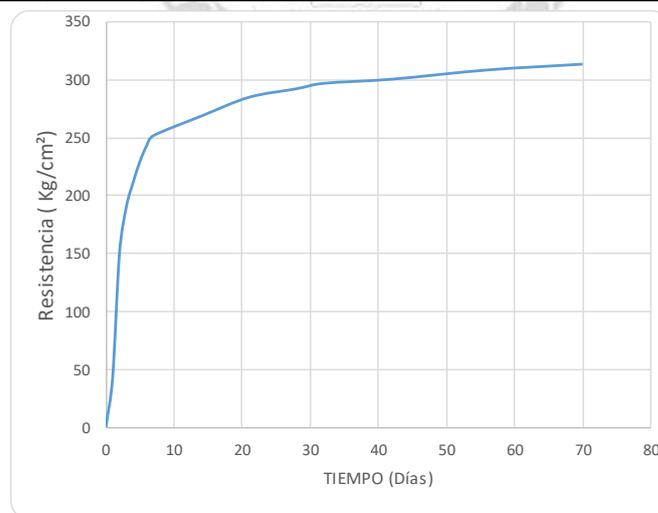
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE TESTIGOS CILÍNDRICOS 6"x12"
MTC E 704 - 2000, Basado en la Norma ASTM C-39 y AASHTO T-22

f'_c de Diseño: 245 kg/cm²

Estudio. Laboratorio

Tipo de Cemento: HE

Moldeo	Fecha		Edad (días)	Edad (días)	Código	Resistencia (MPa)	Resistencia (Kg/cm ²)	Resistencia Promedio	Desviación	% evolución f'_c
	Rotura									
	Fecha	Hora								
16/09/2016	17/09/2016	13:31:00	1	1	B-01	4.23	43.13	42.93	0.95%	17.52%
16/09/2016	17/09/2016	13:35:00	1		B-02	4.19	42.73			
16/09/2016	18/09/2016	13:50:00	2	2	B-03	15.17	154.69	150.05	6.18%	61.24%
16/09/2016	18/09/2016	13:57:00	2		B-04	14.26	145.41			
16/09/2016	19/09/2016	12:53:00	3	3	B-07	18.27	186.30	190.12	4.02%	77.60%
16/09/2016	19/09/2016	12:56:00	3		B-08	19.02	193.95			
16/09/2016	20/09/2016	13:02:00	4	4	B-09	20.73	211.38	211.28	0.10%	86.24%
16/09/2016	20/09/2016	13:04:00	4		B-10	20.71	211.18			
16/09/2016	21/09/2016	12:06:00	5	5	B-11	22.24	226.78	229.48	2.36%	93.67%
16/09/2016	21/09/2016	12:10:00	5		B-12	22.77	232.19			
16/09/2016	22/09/2016	23:51:00	6	6	B-13	23.35	238.10	243.20	4.19%	99.26%
16/09/2016	22/09/2016	23:55:00	6		B-14	24.35	248.30			
16/09/2016	23/09/2016	12:50:00	7	7	B-15	24.53	250.13	251.87	1.38%	102.80%
16/09/2016	23/09/2016	12:57:00	7		B-16	24.87	253.60			
16/09/2016	30/09/2016	12:40:00	14	14	B-19	26.61	271.34	268.72	2.43%	109.68%
16/09/2016	30/09/2016	12:45:00	14		B-20	25.97	264.82			
16/09/2016	30/09/2016	12:48:00	14		B-21	26.48	270.02			
16/09/2016	07/10/2016	10:35:00	21	21	B-22	27.42	279.60	284.96	3.76%	116.31%
16/09/2016	07/10/2016	10:40:00	21		B-23	28.47	290.31			
16/09/2016	14/10/2016	11:51:00	28	28	B-24	28.58	291.43	292.35	0.63%	119.33%
16/09/2016	14/10/2016	11:55:00	28		B-25	28.76	293.27			
16/09/2016	18/10/2016	16:04:00	32	32	B-26	29.69	302.75	297.04	3.84%	121.24%
16/09/2016	18/10/2016	16:07:00	32		B-27	28.57	291.33			
16/09/2016	28/10/2016	11:36:00	42	42	B-28	29.42	300.00	300.63	0.42%	122.71%
16/09/2016	28/10/2016	11:30:00	42		B-29	29.54	301.26			
16/09/2016	11/11/2016	11:46:00	56	56	B-30	30.12	307.15	308.58	0.92%	125.95%
16/09/2016	11/11/2016	11:52:00	56		B-31	30.40	310.00			
16/09/2016	25/11/2016	11:21:00	70	70	B-32	30.89	315.00	313.62	0.88%	128.01%
16/09/2016	25/11/2016	11:30:00	70		B-33	30.62	312.24			





Anexo E 2 Resistencia a flexión.
Fuente: Elaboración Propia.

RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE VIGAS DE 15cm X 15cm X 55cm

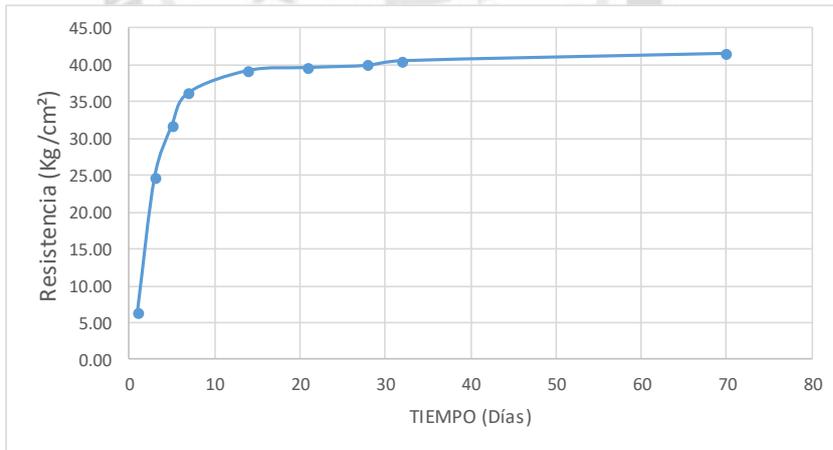
MTC E 704 - 2000, Basado en la Norma ASTM C-39 y AASHTO T-22

MR de Diseño: 36 kg/cm²

Estudio. Laboratorio

Tipo de Cemento: HE

Moldeo	Fecha		Edad (días)	Edad (días)	Código	Dial (KN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (Kg/cm ²)	Resistencia Promedio	Desviación	% evolución f'c
	Rotura										
	Fecha	Hora									
16/09/2016	17/09/2016	13:16:00	1	1	V-01	4.85	0.647	6.59	6.33	8.38%	17.58%
16/09/2016	17/09/2016	13:21:00	1	V-02	4.46	0.595	6.06				
16/09/2016	19/09/2016	12:43:00	3	3	V-03	17.72	2.36	24.09	24.57	3.93%	68.26%
16/09/2016	19/09/2016	12:48:00	3	V-04	18.43	2.46	25.06				
16/09/2016	21/09/2016	13:21:00	5	5	V-05	22.27	2.97	30.28	31.59	8.31%	87.75%
16/09/2016	21/09/2016	13:21:00	5	V-06	24.20	3.23	32.90				
16/09/2016	23/09/2016	13:09:00	7	7	V-07	25.99	3.47	35.34	36.17	4.59%	100.46%
16/09/2016	23/09/2016	13:12:00	7	V-08	27.21	3.63	36.99				
16/09/2016	30/09/2016	12:58:00	14	14	V-09	29.29	3.91	39.82	39.17	3.33%	108.81%
16/09/2016	30/09/2016	13:00:00	14	V-10	28.33	3.78	38.52				
16/09/2016	07/10/2016	10:49:00	21	21	V-11	29.00	3.87	39.43	39.56	0.69%	109.90%
16/09/2016	07/10/2016	10:55:00	21	V-12	29.20	3.89	39.70				
16/09/2016	14/10/2016	11:14:00	28	28	V-13	28.43	3.79	38.65	39.86	6.04%	110.71%
16/09/2016	14/10/2016	11:18:00	28	V-14	30.20	4.03	41.06				
16/09/2016	18/10/2016	15:53:00	32	32	V-15	29.80	3.97	40.52	40.49	0.13%	112.47%
16/09/2016	18/10/2016	15:58:00	32	V-16	29.76	3.97	40.46				
16/09/2016	25/11/2016	11:35:00	70	70	V-17	29.21	3.90	39.72	41.49	8.51%	115.24%
16/09/2016	25/11/2016	11:39:00	70	V-18	31.81	4.24	43.25				





ÍNDICE DE MADUREZ PARA LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN

NTP 339.217 , Basado en la Norma ASTM C-1074

f'_c de Diseño: 245 kg/cm²

Tipo de Cemento: HE

Moldeo	Fecha			Edad (días)	Edad (días)	Código	Resistencia Promedio (Kg/cm ²)	Índice de Madurez	
	Rotura							TTF (°C·hr)	Edad Equivalente (hr)
	Fecha	Hora	Hora Promedio						
16/09/2016	17/09/2016	13:31:00	13:33:00	1	1	B-01	42.93	337.52	16.23
16/09/2016	17/09/2016	13:35:00		1		B-02			
16/09/2016	18/09/2016	13:50:00	13:54:00	2	2	B-03	150.05	683.79	32.32
16/09/2016	18/09/2016	13:57:00		2		B-04			
16/09/2016	19/09/2016	12:53:00	12:55:00	3	3	B-07	190.12	979.18	46.50
16/09/2016	19/09/2016	12:56:00		3		B-08			
16/09/2016	20/09/2016	13:02:00	13:03:00	4	4	B-09	211.28	1264.22	60.64
16/09/2016	20/09/2016	13:04:00		4		B-10			
16/09/2016	21/09/2016	12:06:00	12:08:00	5	5	B-11	229.48	1530.17	73.97
16/09/2016	21/09/2016	12:10:00		5		B-12			
16/09/2016	22/09/2016	23:51:00	23:53:00	6	6	B-13	243.20	1803.81	87.69
16/09/2016	22/09/2016	23:55:00		6		B-14			
16/09/2016	23/09/2016	12:50:00	12:54:00	7	7	B-15	251.87	2087.69	102.01
16/09/2016	23/09/2016	12:57:00		7		B-16			
16/09/2016	30/09/2016	12:40:00	12:45:00	14	14	B-19	268.72	4003.74	198.44
16/09/2016	30/09/2016	12:45:00		14		B-20			
16/09/2016	30/09/2016	12:48:00		14		B-21			
16/09/2016	07/10/2016	10:35:00	22:38:00	21	21	B-22	284.96	5870.89	292.97
16/09/2016	07/10/2016	10:40:00		21		B-23			
16/09/2016	14/10/2016	23:51:00	11:53:00	28	28	B-24	292.35	7759.16	388.95
16/09/2016	14/10/2016	23:55:00		28		B-25			
16/09/2016	18/10/2016	16:04:00	16:06:00	32	32	B-26	297.04	8864.31	445.42
16/09/2016	18/10/2016	16:07:00		32		B-27			
16/09/2016	28/10/2016	11:36:00	11:33:00	42	42	B-28	300.63	11490.89	578.94
16/09/2016	28/10/2016	11:30:00		42		B-29			
16/09/2016	11/11/2016	11:46:00	11:49:00	56	56	B-30	308.58	15258.59	770.08
16/09/2016	11/11/2016	11:52:00		56		B-31			
16/09/2016	25/11/2016	11:21:00	11:25:00	70	70	B-32	313.62	19019.03	960.85
16/09/2016	25/11/2016	11:30:00		70		B-33			



ÍNDICE DE MADUREZ PARA LA RESISTENCIA A FLEXIÓN

NTP 339.217 , Basado en la Norma ASTM C-1074

f'_c de Diseño: 245 kg/cm²

Tipo de Cemento: HE

Moldeo	Fecha			Edad (días)	Edad (días)	Código	Resistencia Promedio (Kg/cm ²)	Índice de Madurez	
	Rotura							TTF (°C-hr)	Edad Equivalente (hr)
	Fecha	Hora	Hora Promedio						
16/09/2016	17/09/2016	13:16:00	13:19:00	1	1	V-01	6.33	328.42	15.83
16/09/2016	17/09/2016	13:21:00		1		V-02			
16/09/2016	19/09/2016	12:43:00	12:46:00	3	3	V-03	24.57	954.68	45.64
16/09/2016	19/09/2016	12:48:00		3		V-04			
16/09/2016	21/09/2016	12:21:00	12:21:00	5	5	V-05	31.59	1493.36	72.85
16/09/2016	21/09/2016	12:21:00		5		V-06			
16/09/2016	23/09/2016	13:09:00	13:11:00	7	7	V-07	36.17	2057.19	101.08
16/09/2016	23/09/2016	13:12:00		7		V-08			
16/09/2016	30/09/2016	12:58:00	12:59:00	14	14	V-09	39.17	3996.80	198.18
16/09/2016	30/09/2016	13:00:00		14		V-10			
16/09/2016	07/10/2016	10:49:00	10:52:00	21	21	V-11	39.56	5882.30541	293.23
16/09/2016	07/10/2016	10:55:00		21		V-12			
16/09/2016	14/10/2016	11:14:00	23:16:00	28	28	V-13	39.86	7787.49	389.48
16/09/2016	14/10/2016	11:18:00		28		V-14			
16/09/2016	18/10/2016	15:53:00	15:55:00	32	32	V-15	40.49	8907.73	446.48
16/09/2016	18/10/2016	15:58:00		32		V-16			
16/09/2016	25/11/2016	11:35:00	23:37:00	70	70	V-13	41.49	19165.50	964.94
16/09/2016	25/11/2016	11:39:00		70		V-14			

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE TESTIGOS CILÍNDRICOS 6"x12"

MTC E 704 - 2000, Basado en la Norma ASTM C-39 y AASHTO T-22

f'_c de Diseño: 245 kg/cm²

Tipo de Cemento: HE

Estación : Km 1+ 145

Estudio : Pavimentación.

Moldeo	Fecha		Edad (días)	Código	Resistencia (MPa)	Resistencia (Kg/cm ²)	Resistencia Promedio	Desviación	% evolución f'_c
	Rotura								
	Fecha	Hora Promedio							
19/10/2016	22/10/2016	13:31:00	3	A-1	15.08	153.8	156.53	3.48%	63.89%
19/10/2016	22/10/2016		3	A-2	15.61	159.25			
19/10/2016	27/10/2016	14:30:00	8	A-3	15.01	223.25	225.88	2.32%	92.19%
19/10/2016	27/10/2016		8	A-4	15.85	228.50			
19/10/2016	03/11/2016	13:20:00	15	A-5	25.20	257.00	255.55	1.13%	104.31%
19/10/2016	03/11/2016		15	A-6	24.91	254.10			
19/10/2016	10/11/2016	12:28:00	22	A-7	26.29	268.20	260.66	5.79%	106.39%
19/10/2016	10/11/2016		22	A-8	24.82	253.12			
19/10/2016	23/11/2016	12:00:00	35	A-9	25.98	265.00	261.65	2.56%	106.80%
19/10/2016	23/11/2016		35	A-10	25.32	258.30			
19/10/2016	01/12/2016	12:35:00	43	A-11	26.29	268.20	263.30	3.72%	107.47%
19/10/2016	01/12/2016		43	A-12	25.33	258.40			



RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE VIGAS DE 15cm X 15cm X 55cm

MTC E 704 - 2000, Basado en la Norma ASTM C-39 y AASHTO T-22

f'_c de Diseño: 36 kg/cm²
Tipo de Cemento: HE

Estación : Km 1+ 145
Estudio : Pavimentación.

Fecha	Rotura		Edad (días)	Código	Dial (KN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (Kg/cm ²)	Resistencia Promedio	Desviación	% evolución f'_c
	Fecha	Hora								
19/10/2016	27/10/2016	13:35:00	3	A-01	23.72	3.163	32.25	30.75	9.76%	85.42%
19/10/2016	27/10/2016		3	A-02	21.51	2.868	29.25			
19/10/2016	27/10/2016	14:45:00	8	A-03	31.08	4.143	42.25	44.23	8.93%	122.85%
19/10/2016	27/10/2016		8	A-04	33.98	4.531	46.20			
19/10/2016	03/11/2016	12:31:00	15	A-05	38.36	5.114	52.15	50.70	5.72%	140.83%
19/10/2016	03/11/2016		15	A-06	36.22	4.830	49.25			
19/10/2016	27/10/2016	12:06:00	35	A-07	38.43	5.124	52.25	51.28	3.80%	142.43%
19/10/2016	27/10/2016		35	A-08	37.00	4.933	50.30			

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE TESTIGOS CILÍNDRICOS 6"x12"

MTC E 704 - 2000, Basado en la Norma ASTM C-39 y AASHTO T-22

f'_c de Diseño: 245 kg/cm²
Tipo de Cemento: HE

Estación : Km 1+ 050
Estudio : Pavimentación.

Fecha	Rotura		Edad (días)	Código	Resistencia (MPa)	Resistencia (Kg/cm ²)	Resistencia Promedio	Desviación	% evolución f'_c
	Fecha	Hora Promedio							
25/10/2016	28/10/2016	11:30:00	3	A-01	20.61	210.21	212.855	2.49%	86.88%
25/10/2016	28/10/2016		3	A-02	21.13	215.5			
25/10/2016	03/11/2016	9:30:00	9	A-03	24.73	252.20	253.23	0.81%	103.36%
25/10/2016	03/11/2016		9	A-04	24.93	254.25			
25/10/2016	10/11/2016	12:22:00	16	A-05	25.71	262.20	259.23	2.30%	105.81%
25/10/2016	10/11/2016		16	A-06	25.12	256.25			
25/10/2016	23/11/2016	23:49:00	29	A-07	26.30	268.25	265.73	1.90%	108.46%
25/10/2016	23/11/2016		29	A-08	25.80	263.20			



RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE VIGAS DE 15cm X 15cm X 55cm
MTC E 704 - 2000, Basado en la Norma ASTM C-39 y AASHTO T-22

f'c de Diseño: 45 kg/cm² Estación : Km 1+ 050
Tipo de Cemento: HE Estudio : Pavimentación.

Fecha			Edad (días)	Código	Dial (KN)	Resistencia (MPa)	Resistencia (Kg/cm ²)	Resistencia Promedio	Desviación	% evolución f'c
Moldeo	Rotura									
	Fecha	Hora								
25/10/2016	28/10/2016	11:40:00	3	A-01	30.29	4.04	41.2	42.725	7.14%	94.94%
25/10/2016	28/10/2016		3	A-02	32.54	4.34	44.25			
25/10/2016	03/11/2016	12:20:00	9	A-03	34.93	4.66	47.50	49.38	7.59%	109.72%
25/10/2016	03/11/2016		9	A-04	37.68	5.02	51.25			
25/10/2016	10/11/2016	12:30:00	16	A-05	39.12	5.22	53.20	50.65	10.07%	112.56%
25/10/2016	10/11/2016		16	A-06	35.37	4.72	48.10			
25/10/2016	23/11/2016	23:55:00	29	A-07	39.56	5.27	53.80	51.85	7.52%	115.22%
25/10/2016	23/11/2016		29	A-08	36.69	4.89	49.90			





Anexo E 3 Modulo de Elasticidad Estático por Compresión Simple.
Fuente: Elaboración Propia.

Edad (Días)	f_c (kg/cm ²)	0.4 f_c (kg/cm ²)	δ (0.4 f_c) (mm)	ϵ (0.4 f_c) (mm/mm)	f_c (0.00005) (kg/cm ²)	ϵ (0.00005) (mm/mm)	Módulo Elasticidad (kg/cm ²)	Promedio del Módulo de Elasticidad (Kg/cm ²)
1	43.13	17.25	0.24573	0.00082	2.72	0.00005	18896.53	16841.63
	42.73	17.09	0.30594	0.00102	2.75	0.00005	14786.73	
2	154.69	61.88	0.30564	0.00102	2.807	0.00005	60970.68	67367.99
	145.41	58.16	0.23679	0.00079	3.629	0.00005	73765.30	
3	186.30	74.52	0.364284	0.00121	3	0.00005	61428.24	76588.36
	193.95	77.58	0.255	0.00085	4.18	0.00005	91748.47	
4	211.38	84.55	0.29655	0.00099	5.56	0.00005	84169.98	83628.12
	211.18	84.47	0.3	0.00100	5.54	0.00005	83086.26	
5	226.78	90.71	0.29655	0.00099	5.56	0.00005	90732.56	91263.27
	232.19	92.87	0.3	0.00100	5.67	0.00005	91793.97	
6	238.10	95.24	0.29451	0.00098	5.59	0.00005	96221.94	97405.06
	248.30	99.32	0.3	0.00100	5.66	0.00005	98588.19	
7	250.13	100.05	0.285	0.00095	5.76	0.00005	104769.96	104876.06
	253.60	101.44	0.2883	0.00096	5.801	0.00005	104982.17	
14	271.34	108.54	0.28668	0.00096	5.82	0.00005	113424.10	121815.91
	264.82	105.93	0.250585	0.00084	6.57	0.00005	126523.04	
21	270.02	108.01	0.257692	0.00086	6.48	0.00005	125500.58	144715.27
	279.60	111.84	0.217971	0.00073	7.68	0.00005	153954.06	
28	290.31	116.12	0.257928	0.00086	6.42	0.00005	135476.48	151551.96
	291.43	116.57	0.248652	0.00083	6.7	0.00005	141071.47	
32	293.27	117.31	0.217971	0.00073	7.68	0.00005	162032.44	154212.86
	302.75	121.10	0.232074	0.00077	7.16	0.00005	157466.45	
42	291.33	116.53	0.232452	0.00077	7.11	0.00005	150959.27	177385.80
	300.00	120.00	0.216	0.00072	7.43	0.00005	168014.93	
56	301.26	120.50	0.195	0.00065	8.45	0.00005	186756.67	195121.61
	307.15	122.86	0.19383	0.00065	8.58	0.00005	191712.80	
70	310.00	124.00	0.1892	0.00063	8.72	0.00005	198530.42	214890.87
	315.00	126.00	0.176742	0.00059	9.43	0.00005	216214.71	
	312.24	124.90	0.177379	0.00059	9.3	0.00005	213567.03	



ANEXOS F ENSAYO DE EXTRACCIÓN DE NÚCLEOS

RESULTADO DE ENSAYOS A COMPRESIÓN DE NÚCLEOS EXTRAIDOS

FECHA			EDAD (días)	CÓDIGO	DESCRIPCIÓN N	DIMENSIONES (cm)			Factor de corrección	ÁREA (cm ²)	RESISTENCIA A (KN)	RESISTENCIA A (Kg/cm ²)	RESISTENCIA A CORREGIDA (Kg/cm ²)	RESISTENCIA A PROMEDIO (Kg/cm ²)	% DE f'c
MOLDEO	ROTURA	Hora				DIÁMETRO (D)	ALTURA(L)	L/D							
19/10/2016	03/12/2016	10:50:00	45	M-01	1+145 Km	10	16.65	1.67	0.97	78.5398163	241.48	313.41	305.01	303.28	123.79%
25/10/2016	03/12/2016		39	M-02	1+075 Km	10	17	1.70	0.98	78.5398163	233.6	303.20	295.92		
25/10/2016	03/12/2016		39	M-02	1+100 Km	10	16.8	1.68	0.97	78.5398163	244.25	317.01	308.90		

EDAD (días)	DESCRIPCIÓN	Resistencia Estimada Nurse-Saul			Resistencia Estimada Arrhenius			Predicción NURSE-SAUL			Predicción ARRHENIUS			promedio nurse-Saul	promedio Arrhenius
		Acumulado TTF para ?t (Pavimento 12.5cm)	Acumulado TTF para ?t (Pavimento 7.5cm)	Acumulado TTF para ?t (Pavimento 2.5cm)	Acumulado Factor Edad para ?t (Pavimento 12.5cm)	Acumulado Factor Edad para ?t (Pavimento 7.5cm)	Acumulado Factor Edad para ?t (Pavimento 2.5cm)	Acumulado TTF para ?t (Pavimento 12.5cm)	Acumulado TTF para ?t (Pavimento 7.5cm)	Acumulado TTF para ?t (Pavimento 2.5cm)	Acumulado Factor Edad para ?t (Pavimento 12.5cm)	Acumulado Factor Edad para ?t (Pavimento 7.5cm)	Acumulado Factor Edad para ?t (Pavimento 2.5cm)		
45	1+145 Km	23754.66	23783.06	23523.57	1076.99	1058.11	1039.46	296.484671	296.489365	296.44605	295.926542	295.852472	295.776674	296.473362	295.851896
39	1+075 Km	20402.14403	21636.9439	21357.8947	901.32	965.70	965.64	295.838668	296.099892	296.0435	295.117582	295.448191	295.447926	295.99402	295.3379
39	1+100 Km	20402.14403	21636.9439	21357.8947	901.319591	965.695727	965.640467	295.838668	296.099892	296.0435	295.117582	295.448191	295.447926	295.99402	295.3379

Descripción		Resistencia estimada		Resistencia
Edad (días)	Estación	Nurse-Saul	Arrhenius	Ensayo de Diamantina (Kg/cm ²)
45	1+145 Km	296.47	295.85	305.01
39	1+075 Km	295.99	295.34	295.92
39	1+100 Km	295.99	295.34	308.90



PANEL FOTOGRÁFICO

A. ENSAYOS DE CARACTERIZACION DE AGREGADOS

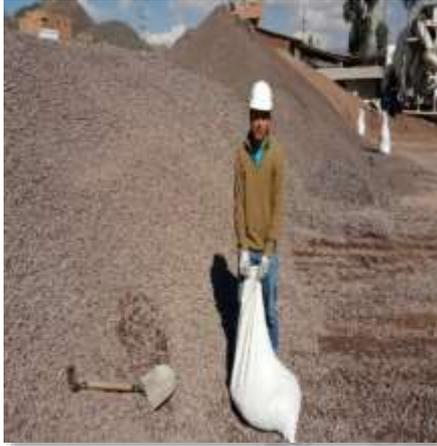


Figura 2 Carguío y transporte de los agregados



Figura 2 Carguío y transporte de los agregados



Figura 3 Secado de agregado para realizar ensayos



Figura 4 selecciones de agregados para ensayos



Figura 5 Ensayo de tamiz #200.- cantidad de finos



Figura 6 Ensayo de tamiz #200.- cantidad de finos



Figura 7 Análisis granulométrico de agregado grueso



Figura 8 Análisis granulométrico de agregado fino



Figura 9 Saturación de agregados para ensayo de pesos específicos y absorción



Figura 10 Análisis de peso unitario de agregados



Figura 11 Ensayo de índice de aplastamientos y alargamiento en agregados.



Figura 12 Ensayo de índice de aplastamiento y alargamiento en agregados

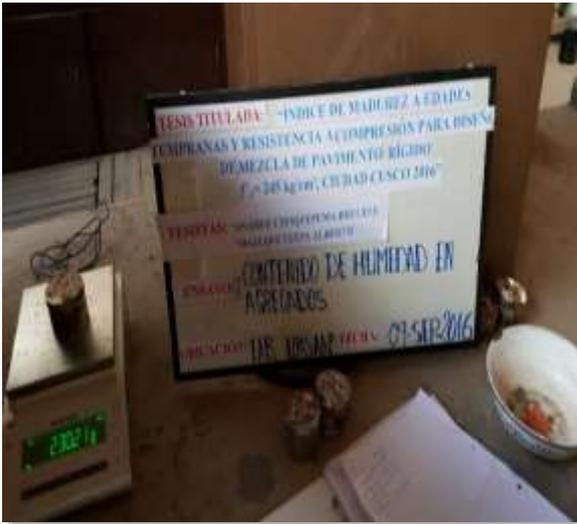


Figura 13 Contenido de Humedad en agregados



Figura 14 Ensayo de abrasión de los ángeles



Figura 15 Muestra triturada del ensayo a abrasión



Figura 16 Ensayo de absorción en agregado fino



Figura 17 Ensayo de peso específico de agregado fino



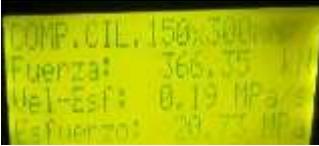
Figura 18 Limpieza de la poza de curado de especímenes de concreto



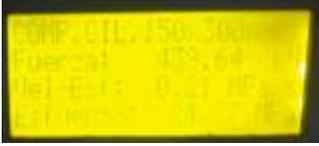
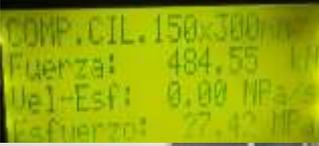
B. RESISTENCIA A COMPRESION

EDAD	RESISTENCIA A COMPRESION	
01 DIAS		
02 DIAS	 	 
03 DIAS		 



EDAD	RESISTENCIA A COMPRESION	
04. DIAS	 	 
05. DIAS	 	 
06. DIAS	 	 



EDAD	RESISTENCIA A COMPRESION	
07. DIAS	 	 
14. DIAS	  	 
21. DIAS	 	 



EDAD	RESISTENCIA A COMPRESION	
28. DIAS		
32. DIAS		
42. DIAS		



EDAD	RESISTENCIA A COMPRESION	
56. DIAS		
70. DIAS		





C. APLICACIÓN DEL PROYECTO DE INVESTIGACION



Figura 3 pavimentación con concreto premezclado Av.tupac amaru tramo III



Figura 2 pavimentación con concreto premezclado Av.tupac amaru tramo III



Figura 3 Colocación de Sensores de temperatura por medio de grapas en la progresiva km 1+145



Figura 4 los sensores de temperatura ingresan por debajo del encofrado lateral de pavimento



Figura 5 Sensores de temperatura en obra , progresiva km 1+050 .



Figura 6 Ensayos de asentamiento en obra



Figura 7 Ensayos de aire incorporado y rendimiento del concreto en obra.



Figura 8 Control de la temperatura del concreto .



Figura 9 Elaboración de Briquetas y vigas de concreto en obra



Figura 10 Vigas y briquetas de concreto curadas en obra



Figura 11 Aserrado de juntas de concreto en la pavimentación



Figura 12 Extracción de registro de temperatura de los equipos de madurez. Luego del periodo de estudio



Figura 13 ubicación de los equipos de madurez



Figura 14 Ensayo de Flexión en vigas curadas en Campo



Figura 15 Ensayo a compresión en cilindros curados en campo .



Figura 16 cilindros curados en campo sujeta a esfuerzo de compresión



Figura 17 Extracción de núcleos de diamantina de la pavimentación



Figura 18 ensayo a compresión de núcleos de diamantina



PLANO DE UBICACIÓN DE SENSORES

