



**Caracterización de la influencia de aditivos sobre la hidratación del cemento portland  
puzolánico**

Carrera Figueroa, Carlos Efraín

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Mecánica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico

Ing. Goyos Pérez, Leonardo. PhD






25 de enero del 2021



### Document Information

**Analyzed document** trabajo de titulacion.pdf (D96563705)  
**Submitted** 2/25/2021 9:39:00 PM  
**Submitted by**  
**Submitter email** cecarrera2@espe.edu.ec  
**Similarity** 1%  
**Analysis address** llgoyos.espe@analysis.arkund.com

### Sources included in the report

<b>W</b>	URL: <a href="http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3377_C.pdf">http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3377_C.pdf</a> Fetched: 12/20/2020 10:41:03 PM	 1
<b>W</b>	URL: <a href="https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/11318/1/T-ESPE-049460.pdf">https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/11318/1/T-ESPE-049460.pdf</a> Fetched: 11/26/2019 9:48:07 AM	 4
<b>W</b>	URL: <a href="https://www.cemexnicaragua.com/productos-y-servicios/cemento/como-hacemos-el-cemento">https://www.cemexnicaragua.com/productos-y-servicios/cemento/como-hacemos-el-cemento</a> Fetched: 2/25/2021 9:40:00 PM	 1
<b>W</b>	URL: <a href="https://docplayer.es/26075693-Evolucion-de-las-normas-para-la-fabricacion-de-cemen...">https://docplayer.es/26075693-Evolucion-de-las-normas-para-la-fabricacion-de-cemen ...</a> Fetched: 2/25/2021 9:40:00 PM	 2
<b>W</b>	URL: <a href="https://docplayer.es/62658196-Tesis-evaluacion-de-las-propiedades-mecanicas-del-co...">https://docplayer.es/62658196-Tesis-evaluacion-de-las-propiedades-mecanicas-del-co ...</a> Fetched: 6/6/2020 1:13:20 AM	 1





**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "**Caracterización de la influencia de aditivos sobre la hidratación del cemento portland puzolánico**" fue realizado por el señor **Carrera Figueroa, Carlos Efraín** el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la "Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE", razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 25 de enero de 2021



Firmado electrónicamente por:  
**LEONARDO  
GOYOS PEREZ**

.....  
**Ing. Leonardo Goyos Pérez. Ph.D.**

C.C 1757783525



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **Carrera Figueroa, Carlos Efraín**, con cedula de identidad N° 171619508-4, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **"Caracterización de la influencia de aditivos sobre la hidratación del cemento portland puzolánico"** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, metodológicos y legales establecidos por la "Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE", respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 29 de enero de 2021

Firma:

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir 'Carlos E. F.' sobre una línea de puntos.

Carrera Figueroa Carlos Efraín

C.I: 171619508-4





**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo, Carrera Figueroa, Carlos Efraín, con cedula de identidad N° 171619508-4, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: "Caracterización de la influencia de aditivos sobre la hidratación del cemento portland puzolánico" en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolqui, 29 de enero de 2021

Firma:

A handwritten signature in blue ink that reads 'Carlos E. F.' written over a dotted line.

Carrera Figueroa Carlos Efraín

C.I.: 171619508-4

## **Dedicatoria**

El presente trabajo investigativo se lo dedico a mi mamá Mónica Figueroa Carvajal y a mi papá Carlos Carrera Haro quienes han sido mi fuente infinita de amor, apoyo y enseñanza durante toda mi vida.

Sin ellos ninguno de mis logros serían importantes y mis fracasos tan insignificantes.

Este título es completamente suyo.

**Efraín Carrera Figueroa**

## **Agradecimiento**

A mi mamá por demostrarme cada día que las mujeres son los seres más fuertes que existen, por unir y mantener en pie a nuestra familia, desde limpiar la casa hasta cocinar los más deliciosos platillos que he probado, que cualquier actividad es importante sea cual sea. Sin miedo a demostrar amor incluso a los animales más indefensos.

A mi papá por enseñarme tantas cosas toda mi vida, desde aprender a nadar sosteniéndome para no ahogarme, ser mi compañero para salir en bicicleta o simplemente trotar, hasta manejar máquinas y darme la responsabilidad de construir y reparar cualquier daño que encuentre, le debo mi pasión por la mecánica.

Me han inspirado e instruido para ser la persona que soy con todas las virtudes y debilidades, y nunca podre agradecerles por sus sacrificios, su compañía, por ayudarme a continuar y distinguir lo bueno e importante de la vida, que la honestidad se valora, ante todo.

A mis abuelos María Carvajal y Rubén Figueroa por su amor y cuidado, estar siempre presentes con un abrazo y un beso, siempre dispuestos a apoyar a su familia, demostrándome que la humildad y honradez son lo más importante.

A mis abuelos Fanny Haro, y Efrain Carrera quienes han demostrado con el paso de sus vidas que ayudar a los demás, como ustedes lo hicieron por sus hijos, sus amigos, por su comunidad siempre agradecida con ustedes, sin esperar nada a cambio es vital y necesario.

**Efraín Carrera Figueroa**

## Índice de contenidos

Dedicatoria .....	6
Agradecimiento .....	7
Índice de contenidos.....	8
Índice de tablas .....	11
Índice de figuras .....	11
Simbología .....	17
Resumen.....	19
Abstract.....	20
Capítulo I Generalidades.....	21
Antecedentes.....	21
Definición del problema.....	22
Objetivos.....	24
General .....	24
Específicos.....	24
Alcance del proyecto.....	24
Justificación del proyecto .....	24
Área de influencia .....	25
Capítulo II Marco teórico.....	26
Definición del cemento.....	26
Historia del uso del cemento portland .....	27
Fabricación del cemento portland .....	27
Tipos de Cemento.....	29
Propiedades físicas del cemento .....	29
Finura o superficie específica .....	29
Falso fraguado .....	30



Tiempo de fraguado .....	30
Consistencia normal .....	30
Densidad .....	30
Propiedades mecánicas.....	31
Resistencia a la tracción.....	31
Resistencia a la compresión.....	31
Resistencia a la Flexión.....	31
Propiedades químicas del cemento.....	31
Hidratación .....	31
Calor de hidratación .....	32
Composición química del cemento .....	32
Formación pasta cemento.....	32
Definición de biomazas .....	35
Arundo Donax (o Carrizo).....	36
Caña de azúcar .....	37
Palma oleífera (o Palma africana) .....	37
Definición de aditivos para cemento .....	38
Tipos de aditivos .....	39
Capítulo III Método de ensayo.....	39
Calorímetro adiabático.....	39
Calibración del equipo .....	40
Preparación de pasta de cemento .....	42
Preparación de biomasa .....	42
Preparación de aditivos.....	44
Preparación de agua destilada.....	45
Ensayos realizados en calorímetro .....	46

Capítulo IV Procesamiento de datos y análisis de resultados .....	51
Procesamiento de datos .....	51
Curvas de hidratación .....	52
Cemento Portland Puzolanico Tipo IP Marca Chimborazo .....	52
Biomosas .....	53
Aditivo Superplastificante Viscomix 2 gramos .....	54
Aditivo Superplastificante Viscomix 1 gramo .....	56
Aditivo Superplastificante Megamix 2 gramos .....	58
Curvas de temperatura de aislamiento.....	62
Análisis de resultados .....	72
Análisis de curvas de aislamiento .....	75
Índice de compatibilidad.....	76
Resultados agrupados por aditivos .....	78
Índice de tiempo.....	78
Índice de temperatura.....	81
Índice de pendiente .....	84
Índice de compatibilidad .....	87
Resultados agrupados por biomosas.....	90
Resumen de resultados .....	93
Capítulo V Análisis de costos .....	95
Costos de proyecto.....	95
Capítulo VI Conclusiones y recomendaciones.....	97
Conclusiones .....	97
Recomendaciones .....	98
Referencias.....	98
Anexos .....	105

Anexo A Partes del calorímetro.....	105
Anexo B Bitácora de rehabilitación de calorímetro .....	111
Anexo C Manual de operación .....	118
Anexo D Balance de flujo del calorímetro adiabático .....	128

### Índice de tablas

<b>Tabla 1</b> Composición química del cemento .....	32
<b>Tabla 2</b> Composición química del Clinker .....	34
<b>Tabla 3</b> Bitácora de mantenimiento preventivo.....	111
<b>Tabla 4</b> Bitácora de mantenimiento correctivo.....	113
<b>Tabla 5</b> Bitácora de modificaciones adicionales .....	115
<b>Tabla 6</b> Índice de compatibilidad .....	78
<b>Tabla 7</b> Resultados de índice de tiempo .....	78
<b>Tabla 8</b> Resultados de índice de temperatura .....	82
<b>Tabla 9</b> Resultados de índice de pendiente .....	85
<b>Tabla 10</b> Resultados de índice de compatibilidad .....	88
<b>Tabla 11</b> Resumen de resultados.....	93
<b>Tabla 12</b> Costos de proyecto .....	95

### Índice de figuras

<b>Figura 1</b> Gráfica calorimétrica sobre el comportamiento del cemento .....	33
<b>Figura 2</b> Mapamundi sobre existencia de tipos de Arundo Donax.....	36
<b>Figura 3</b> Planta de Palma africana.....	38
<b>Figura 4</b> Captura de programa termocipla .....	41

<b>Figura 5</b> Medición de termómetro ambiental .....	41
<b>Figura 6</b> Medición de termómetro digital .....	41
<b>Figura 7</b> Bagazo seco de caña de azúcar .....	43
<b>Figura 8</b> Hojas secas de palma africana .....	43
<b>Figura 9</b> Hojas secas de carrizo.....	44
<b>Figura 10</b> Hojas de palma africana recortadas.....	44
<b>Figura 11</b> Aditivo Superplastificante Viscomix.....	45
<b>Figura 12</b> Aditivo Superplastificante Megamix .....	45
<b>Figura 13</b> Galón de agua destilada .....	46
<b>Figura 14</b> Medición de cemento portland puzolánico .....	46
<b>Figura 15</b> Medición de agua destilada .....	47
<b>Figura 16</b> Medición de biomasa .....	47
<b>Figura 17</b> Medición de aditivo superplastificante.....	48
<b>Figura 18</b> Separación de elementos para la mezcla .....	48
<b>Figura 19</b> Envase de vidrio y agitador metálico.....	49
<b>Figura 20</b> Mezcla homogénea de cemento .....	49
<b>Figura 21</b> Mezcla vertida en un vaso térmico.....	50
<b>Figura 22</b> Vaso térmico dentro del calorímetro .....	50
<b>Figura 23</b> División de ensayos.....	51
<b>Figura 24</b> Curva de hidratación del Cemento Portland Tipo IP .....	52
<b>Figura 25</b> Curva de hidratación del Cemento Portland Tipo IP con Carrizo .....	53
<b>Figura 26</b> Curva de hidratación del cemento portland tipo IP con caña.....	53
<b>Figura 27</b> Curva de hidratación del cemento portland tipo IP con palma.....	54
<b>Figura 28</b> Curva de hidratación del cemento portland tipo IP con viscomix 2g.....	54
<b>Figura 29</b> Curva de hidratación del cemento portland tipo IP con viscomix 2g y carrizo .....	55

<b>Figura 30</b>	Curva de hidratación del cemento portland tipo IP con viscomix 2g y caña .55
<b>Figura 31</b>	Curva de hidratación del cemento portland tipo IP con viscomix 2g y palma56
<b>Figura 32</b>	Curva de hidratación del cemento portland tipo IP con viscomix 1g.....56
<b>Figura 33</b>	Curva de hidratación del cemento portland tipo IP con viscomix 1g y carrizo .....57
<b>Figura 34</b>	Curva de hidratación del cemento portland tipo IP con viscomix 1g y caña .57
<b>Figura 35</b>	Curva de hidratación del cemento portland tipo IP con viscomix 1g y palma58
<b>Figura 36</b>	Curva de hidratación del cemento portland tipo IP con megamix 2g .....58
<b>Figura 37</b>	Curva de hidratación del cemento portland tipo IP con megamix 2g y carrizo .....59
<b>Figura 38</b>	Curva de hidratación del cemento portland tipo IP con megamix 2g y caña.59
<b>Figura 39</b>	Curva de hidratación del cemento portland tipo IP con megamix 2g y palma .....60
<b>Figura 40</b>	Curva de hidratación del cemento portland tipo IP con megamix 1g .....60
<b>Figura 41</b>	Curva de hidratación del cemento portland tipo IP con megamix 1g y carrizo .....61
<b>Figura 42</b>	Curva de hidratación del cemento portland tipo IP con megamix 1g y caña.61
<b>Figura 43</b>	Curva de hidratación del cemento portland tipo IP con megamix 1g y palma .....62
<b>Figura 44</b>	Curva de aislamiento del cemento portland tipo IP .....62
<b>Figura 45</b>	Curva de aislamiento del cemento portland tipo IP con carrizo .....63
<b>Figura 46</b>	Curva de aislamiento del cemento portland tipo IP con caña .....63
<b>Figura 47</b>	Curva de aislamiento del cemento portland tipo IP con palma .....64
<b>Figura 48</b>	Curva de aislamiento del cemento portland tipo IP con viscomix 2g .....64
<b>Figura 49</b>	Curva de aislamiento del cemento portland tipo IP con viscomix 2g y carrizo .....65

<b>Figura 50</b> Curva de aislamiento del cemento portland tipo IP con viscomix 2g y caña.	65
<b>Figura 51</b> Curva de aislamiento del cemento portland tipo IP con viscomix 2g y palma .....	66
<b>Figura 52</b> Curva de aislamiento del cemento portland tipo IP con viscomix 1g .....	66
<b>Figura 53</b> Curva de aislamiento del cemento portland tipo IP con viscomix 1g y carrizo .....	67
<b>Figura 54</b> Curva de aislamiento del cemento portland tipo IP con viscomix 1g y caña.	67
<b>Figura 55</b> Curva de aislamiento del cemento portland tipo IP con viscomix 1g y palma .....	68
<b>Figura 56</b> Curva de aislamiento del cemento portland tipo IP con megamix 2g .....	68
<b>Figura 57</b> Curva de aislamiento del cemento portland tipo IP con megamix 2g y carrizo .....	69
<b>Figura 58</b> Curva de aislamiento del cemento portland tipo IP con megamix 2g y caña	69
<b>Figura 59</b> Curva de aislamiento del cemento portland tipo IP con megamix 2g y palma .....	70
<b>Figura 60</b> Curva de aislamiento del cemento portland tipo IP con megamix 1g .....	70
<b>Figura 61</b> Curva de aislamiento del cemento portland tipo IP con megamix 1g y carrizo .....	71
<b>Figura 62</b> Curva de aislamiento del cemento portland tipo IP con megamix 1g y caña	71
<b>Figura 63</b> Curva de aislamiento del cemento portland tipo IP con megamix 1g y palma .....	72
<b>Figura 64</b> Índice de tiempo para mezclas con aditivo viscomix .....	80
<b>Figura 65</b> Índice de tiempo para mezclas con aditivo megamix .....	81
<b>Figura 66</b> Índice de temperatura para mezclas con aditivo viscomix.....	83
<b>Figura 67</b> Índice de temperatura para mezclas con aditivo megamix.....	84
<b>Figura 68</b> Índice de pendiente para mezclas con aditivo viscomix .....	86

<b>Figura 69</b>	Índice de pendiente para mezclas con aditivo megamix .....	87
<b>Figura 70</b>	Índice de compatibilidad viscomix .....	89
<b>Figura 71</b>	Índice de compatibilidad megamix .....	90
<b>Figura 72</b>	Índice de compatibilidad caña .....	91
<b>Figura 73</b>	Índice de compatibilidad carrizo .....	91
<b>Figura 74</b>	Índice de compatibilidad palma .....	92
<b>Figura 75</b>	Esquema principal del calorímetro .....	106
<b>Figura 76</b>	Tubo de vidrio .....	107
<b>Figura 77</b>	Jarro de vidrio .....	107
<b>Figura 78</b>	Envase de polipropileno .....	108
<b>Figura 79</b>	Tapas de PVC .....	108
<b>Figura 80</b>	Gránulos de poliestireno .....	109
<b>Figura 81</b>	Termocupla tipo k .....	109
<b>Figura 82</b>	Página principal de LabVIEW 2012.....	118
<b>Figura 83</b>	Icono del documento termocipla .....	119
<b>Figura 84</b>	Página principal del documento termocipla .....	119
<b>Figura 85</b>	Ventana de panel de control .....	120
<b>Figura 86</b>	Ventana de administrador de dispositivos .....	120
<b>Figura 87</b>	Icono de dispositivos USB .....	121
<b>Figura 88</b>	Pantalla de programación .....	121
<b>Figura 89</b>	Puerto de entrada de arduino .....	122
<b>Figura 90</b>	Control de datos .....	122
<b>Figura 91</b>	Propiedades del objeto .....	123
<b>Figura 92</b>	Ruta de la carpeta .....	123
<b>Figura 93</b>	Selección de carpeta .....	124
<b>Figura 94</b>	Formato de archivo .....	124



<b>Figura 95</b> Opción abrir con .....	125
<b>Figura 96</b> Aplicación WordPad.....	125
<b>Figura 97</b> Encabezados de segmento.....	126
<b>Figura 98</b> Opción para correr el programa .....	126
<b>Figura 99</b> Detener el programa .....	126
<b>Figura 100</b> Limpiar los gráficos .....	127
<b>Figura 101</b> Limpiar los indicadores de valor.....	128

## Simbología

### Capítulo 2

$CaCO_3$	Carbonato de calcio
$CaO$	Oxido cálcico
$CO_2$	Dióxido de carbono
$C$	Carbonato de calcio
$Al_2O_3$	Oxido de aluminio
$A$	Oxido de aluminio
$Fe_2O_3$	Óxido de hierro
$F$	Óxido de hierro
$SiO_2$	Dióxido de silicio
$S$	Dióxido de silicio
$H_2O$	Agua
$H$	Agua
$MgO$	Oxido de magnesio
$SO_3$	Óxido de azufre
$C3S$	Silicato tricálcico
$C2S$	Silicato dicálcico
$C3A$	Aluminato tricálcico
$C4AF$	Aluminato tetracálcico

### Capítulo 4

$I$	Índice de compatibilidad
$I_t$	Índice de tiempo
$I_T$	Índice de temperatura
$I_p$	Índice de pendiente

$t_m$	Tiempo para alcanzar la temperatura máxima (cemento)
$t_c$	Tiempo para alcanzar la temperatura máxima (pasta).
$T_m$	Temperatura máxima de hidratación (cemento).
$T_c$	Temperatura máxima de hidratación (pasta).
$P_m$	Pendiente máxima en el tiempo (cemento).
$P_c$	Tasa máxima de temperatura en el tiempo (pasta).

### **Anexo C**

$q$	Energía
$q_{total}$	Energía total
$q_{absorbido}$	Energía absorbida
$q_{cedido}$	Energía cedida
$m$	Masa
$c_a$	Capacidad calorífica
$T$	Temperatura

## Resumen

La combinación entre cemento y biomasas se ha tratado desde la invención del cemento, siempre buscando su perfecto balance, es indispensable encontrar su correcta homogeneización para mejorar las características del hormigón.

En nuestro país existen varias fuentes de biomasas desechadas que no se utilizan por completo, como la caña de azúcar, o la palma africana; igual que varias plantas originarias sin ningún uso en particular, tal es el caso del carrizo.

Por otro lado, los aditivos de cemento en la actualidad han aumentado su uso debido a que modifican las propiedades físicas y mecánicas del cemento, aumentando su dureza o modificando su tiempo de fraguado dependiendo su necesidad.

En el presente proyecto se utilizarán las biomasas anteriormente descritas que conjuntamente con aditivos superplastificantes, se determinara cuál de sus combinaciones posee una mejor compatibilidad al mezclarse con cemento portland puzolanico tipo IP de la marca Chimborazo; se obtendrán datos de temperatura y tiempo para determinar la curva de hidratación de cada ensayo, los mismos que serán adquiridos por el calorímetro adiabático, siguiendo los lineamientos de la norma NTE INEN 199 “Cemento hidráulico. Determinación del calor de hidratación”.

Palabras claves

- **CEMENTO PUZOLÁNICO**
- **BIOMASAS**
- **ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES**
- **CALORÍMETRO ADIABÁTICO**
- **COMPATIBILIDAD**

## Abstract

The combination between cement and biomass has been dealt with since the invention of cement, always seeking their perfect balance, it is essential to find their correct homogenization to improve the characteristics of concrete.

In our country there are several sources of discarded biomass that are not fully used, such as sugar cane or African palm; like several native plants without any particular use, such is the case of carrizo.

On the other hand, cement additives have now increased their use because they modify the physical and mechanical properties of cement, increasing hardness or modifying setting time depending on their need.

In this project the biomasses described above will be used, together with superplasticizer additives, it will be determined which of their combinations has a better compatibility when mixed with portland pozzolana type IP cement of the Chimborazo brand; temperature and time data will be obtained to determine the hydration curve of each test, which will be acquired by the adiabatic calorimeter, following the guidelines of the NTE INEN 199 "Hydraulic cement. Determination of the heat of hydration".

### Keywords

- **POZZOLANA CEMENT**
- **BIOMASS**
- **SUPERPLASTICIZER ADDITIVES**
- **ADIABATIC CALORIMETER**
- **COMPATIBILITY**

## **Capítulo I**

### **Generalidades**

#### **Antecedentes**

La necesidad de protección siempre conlleva a los humanos a buscar lugares en los cuales se sientan seguros y refugiados de los peligros que existen en el exterior. Se puede ver evidencias de vestigios de construcciones erigidas por los años 7000 A.C y las construcciones más antiguas que aún sobreviven a nuestro tiempo, las pirámides de Egipto ya se utilizaba una mezcla de cal y yeso que junto con agua unían piedras para formar la gran pirámide de Gizeh. (Argiz Lucio, Menéndez Mendez , & Moragues, 2013)

Siempre se requirió de nuevas formas de construcción para que las edificaciones sean más fuertes, solidas, resistan los ataques de la naturaleza y perduren por largo tiempo, no solamente colocando piedras una junto a otra, sino utilizando una sustancia que las una y demuestre una rigidez igual.

Los Romanos utilizaron ceniza volcánica llamada puzolana, la que provenía del monte Vesubio y al ser mezclada con cal y líquidos tales como sangre o grasa animal formaba una pasta cementante. Su utilización se demuestra en el Coliseo Romano, así como el Teatro de Pompeya. (Argiz Lucio, Menéndez Mendez , & Moragues, 2013)

A partir de su descubrimiento, se modificó su mezcla con varias biomásas como carbón de madera, tierra cocida, yeso calcinado, barro cocido, entre otros, pero no contribuían en mejorar las características físicas como la puzolana. (San Juan Barbudo & Chinchón Yopez, 2004)

En el año de 1824, Joseph Aspdin y James Parker presentaron y patentaron el cemento Portland, el cual se obtuvo a partir de caliza arcillosa y carbón. En la modernidad se utiliza el cemento Portland puzolanico que une las dos propiedades del cemento Portland y la puzolana para crear un material con una alta resistencia mecánica que se comercializa globalmente. (San Juan Barbudo & Chinchón Yopez, 2004)

Sin embargo, en la búsqueda de mejorar su composición, acortar los tiempos de fraguado, disminuir la cantidad de agua o simplemente mejorar sus características, se ha buscado el complemento de aditivos a la mezcla de cemento para crear hormigón de gran calidad.

Su uso se remonta a 1873, cuando se utilizaba cloruro de calcio como acelerante de fraguado; posteriormente se utilizó silicato de calcio para brindar permeabilidad a la mezcla; sin embargo, en el siglo XX se comenzó a investigar las propiedades de los aditivos plastificantes, los mismos reducen la cantidad de agua y aceleran el tiempo de fraguado; siendo hoy en día uno de los aditivos más empleados en la construcción. (Delgado Vallejo & Negrete Martinez)

### **Definición del problema**

La combinación de biomasa con cemento para utilizarlo en la construcción no se realiza extensamente en el país debido a la insuficiencia de datos para determinar si su uso es el adecuado para las diferentes construcciones que van en aumento en el Ecuador. (Corporación para la investigación energética, 2015)

La biomasa en el país es abundante, predominando los residuos de banano, café, cacao, flores, maíz y cascarilla de arroz. Diferentes ministerios ecuatorianos como de producción y de electricidad se han enfocado en el uso de estos residuos para investigaciones en el ámbito bioenergético, siendo el objetivo principal la reducción de combustibles fósiles y cambiar su uso por biocombustibles elaborados localmente. (Ministerio del Ambiente y Agua, 2020)

El uso de aditivos en el hormigón autocompactante en combinación con fibras vegetales y otras materias orgánicas cambia drásticamente sus características de hidratación y endurecimiento, pero la dificultad proviene de la existencia de estudios y



recolección de datos con la gran magnitud de biomásas que existen en el Ecuador y su mezcla con cemento portland puzolánico, característico del país. (Aguilar Sánchez, 2015)

Ecuador posee una extensa y diversa producción agrícola que va desde la región costa hasta la región amazónica, aun así, se genera una gran cantidad de residuos que son desechados, desperdiciando importantes fuentes de energía para el área energética o potencial estructural en el área de la construcción. (Barriga & Balseca)

Los cimientos y la estructura de hormigón predominan en las construcciones que se hacen cada año en el país; un total de 29785 permisos de construcción se concedieron durante el 2016, y las proyecciones indican que en el mismo año se levantaron 58.675 viviendas a nivel nacional. (El Universo, 2018)

La preferencia por el hormigón en Ecuador, material que predomina en las urbanizaciones y barrios del país responde a la durabilidad; es el que ha perdurado más a través del tiempo. El hormigón da la resistencia y el acero la flexibilidad. (Cabrera, 2015)

A partir del terremoto ocurrido el 16 de abril del 2016 en la provincia de Manabí es necesario buscar nuevos compuestos que brinden al hormigón la resistencia y flexibilidad necesaria para soportar los movimientos telúricos ocasionados por la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana. (Zibell, 2016)

Se requiere un nuevo enfoque en la construcción con hormigón utilizando la biomasa existente en el país, como un aditivo que puede mejorar sus propiedades mecánicas, reduciendo cantidad de cemento, lo que repercute en la disminución de los costos de materia prima.

## **Objetivos**

### ***General***

Caracterizar la influencia de aditivos orgánicos sobre la hidratación del cemento portland puzolánico.

### ***Específicos***

- Determinar la curva de hidratación del cemento portland ante determinados aditivos y biomásas ecuatorianas.
- Determinar la curva de temperatura de aislamiento del calorímetro ante determinados aditivos y biomásas ecuatorianas.
- Determinar la influencia de diferentes cantidades de aditivos superplastificantes, en combinación con biomásas para el hormigón autocompactante.

### **Alcance del proyecto**

Desarrollar la caracterización de la influencia de biomásas ecuatorianas provenientes de carrizo (Arundo Donax), Bagazo de caña, raquis de palma oleífera y aditivos superplastificantes sobre la hidratación del cemento portland puzolánico tipo IP, siendo el más utilizado y comercializado en el país, mediante diagnosticar, rehabilitar, calibrar y utilizar del calorímetro perteneciente al Laboratorio de Termodinámica del Departamento de Ciencia de la Energía y Mecánica para medir la temperatura en un sistema adiabático; establecer procedimientos de ensayos y determinar la influencia del grado de particulación y volumen de biomasa en el proceso.

### **Justificación del proyecto**

El hormigón es el material de construcción más utilizado en el mundo; el problema es que uno de sus componentes principales, el cemento, y sobre todo el proceso

necesario para producirlo, contribuye de manera significativa al cambio climático. (Watts, 2019)

Todos los años se fabrican unos 4 000 millones de toneladas de cemento, una actividad que genera aproximadamente el 8 % de las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub>. Sin embargo, algo sorprendente es que el 60 % de estas emisiones no se debe a la utilización de combustibles fósiles, sino a las reacciones químicas del proceso. Por lo cual es necesario el aprovechamiento de residuos agroindustriales como fuente sostenible en materiales de construcción. Estos residuos que no se aprovechan por completo y la mayoría de ellos simplemente se queman y contribuyen a la contaminación ambiental. (Rodgers, 2018)

En la industria de la construcción existe una continua búsqueda de agregados minerales como arena y piedra que debido a las distancias cada vez mayores entre la zona de producción y la zona de consumo son necesarias nuevas alternativas,

Una opción es reemplazarlos por materias renovables como la biomasa vegetal en la fabricación de morteros y hormigones no convencionales pero que brinden mayor durabilidad y seguridad a las nuevas construcciones que cada año crecen exponencialmente en el país. (Universidad pedagógica y tecnológica de Colombia, 2013)

### **Área de influencia**

En el presente todavía existe la necesidad de aclarar los procesos que existen en el transcurso del fraguado y endurecimiento de la pasta de cemento debido a su complejidad química. (Arribada, 1978)

En el área de la construcción es necesario un conocimiento sólido de cómo actúan los componentes de la pasta de cemento, y partiendo de una mayor comprensión existe aumenta la facilidad y mejora en el manejo de la economía en su empleo; además de

controlar las resistencias mecánicas y mayor duración de las obras estructurales construidas. (Calleja, 1977)

Por ello, cualquier avance en la comprensión de la química y comportamiento del cemento suele tener inmediata aplicación o sirve como base para investigaciones posteriores, que en su día darán nuevas propiedades prácticas al cemento o incluso a otros materiales diferentes. (Cechin, Matoski, & Lima, 2018)

Además, el proyecto tendrá incidencia en el área de termodinámica, específicamente en transferencia de calor debido a que el calor liberado durante la hidratación del cemento produce un incremento en la temperatura del hormigón. El calor generado por el hormigón durante la hidratación se acumulará continuamente y se aproximará a la entalpía total de la reacción, lo cual resultará en un incremento de temperatura; los mismos datos obtenidos por el calorímetro perteneciente al laboratorio de Termodinámica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE serán trazados y analizados en curvas de hidratación de cada aditivo mezclado con el cemento.

## **Capítulo II**

### **Marco teórico**

#### **Definición del cemento**

Cemento se refiere a todo aglomerante que, al ser mezclado con agregados pétreos, como son la arena o cal y agua forma un compuesto que fragua y se endurece al reaccionar con el aire, su característica de endurecimiento similar a la consistencia pétreo es muy útil para la construcción, demostrando su uso desde el siglo XVII. (Labahn, 1985)

## **Historia del uso del cemento portland**

En la antigua Grecia se utilizaba restos volcánicos, lo cual mejoro sus niveles de resistencia; partiendo del uso de ceniza volcánica, los romanos en el Siglo II A.C, en la región de Puzzolli, cerca del monte Vesubio, utilizaron los restos del volcán y al fusionarlo con cal y agua, creando el cemento Romano o puzolanico, referente a la localidad, con el mismo se edificó el Panteón y el coliseo Romano, que se erigen hasta la actualidad. (Delgado Vallejo & Negrete Martinez)

El cemento Portland es presentado por Joseph Aspdin y James Parker en 1824, a quienes se atribuye su invención. Lo obtuvieron al mezclar caliza arcillosa y carbón. Su nombre se toma del color grisáceo del cemento que es muy similar al de las piedras de la isla de Portland, ubicada al sur del Reino Unido. Sin embargo, el cemento moderno, es presentado por Isaac Johnson en 1845, con una combinación similar a la utilizada por Aspdin y Parker, pero aumento la temperatura de calcinación hasta la formación del Clinker, nombre que se le da a la producción final del horno. (Carrasco García, 2007)

A partir del siglo XIX, se buscó homogeneizar la composición final del cemento, además de proporcionar mejores formas de producción utilizando hornos rotatorios para la calcinación, además del transporte y almacenaje del concreto, variando el modo en el cual se enfría el Clinker, sin forzar que la temperatura baje drásticamente. (Argiz Lucio, Menéndez Mendez , & Moragues, 2013)

## **Fabricación del cemento portland**

La fabricación del cemento Portland consta de 4 procesos básicos (Merritt, Kent Loftin, & Ricketts, 2001), los cuales consisten en:

- 1) Extracción de materia prima: Se constituye en la excavación de caliza y arcilla en canteras a cielo abierto, con el uso de excavadoras para materiales blandos y mediante explosivos para los materiales más duros de extraer.

- 2) Almacenamiento y preparación de la materia prima: Se da en silos o tolvas para pequeñas cantidades, mientras que en mayor volumen de uso se apila en campos cubiertos. La preparación depende del mineral, muchos de ellos deben pasar por una serie de tratamientos para cumplir con el tamaño de grano, el mismo que dará la homogeneidad a la mezcla. (San Juan Barbudo & Chichón Yepes, 2014)
- 2.1) Cribado: Los granos más grandes son separados mediante cedazos de diferentes tamaños.
- 2.2) Trituración: Esta etapa tiene un paso anterior para los trozos grandes, los cuales pasan por chancadoras<sup>1</sup>, para disminuir su tamaño. Al momento que existe una consistencia en el grano, pasan al molino para triturar la materia prima.
- 2.3) Pre homogeneización: Es la clasificación de la materia prima, se distribuye por su composición química y tamaño de forma uniforme.
- 2.4) Secado: Se elimina el agua que puede contener la materia prima mediante hornos, obteniendo un polvo fino.
- 3) Cocción del crudo: Los materiales homogeneizados ingresan al horno, a una temperatura entre 1400 y 1500 °C y se producen las reacciones químicas que forman el Clinker. (CEMEX, s.f.)

Dentro del horno se producen diversos cambios:

- Secado total del material.
- Descomposición de carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ) en óxido cálcico ( $\text{CaO}$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ).
- Clinkerización donde se forman los diversos silicatos, aluminatos y ferro aluminatos de calcio.

---

<sup>1</sup> Chancadora: Maquina que disminuye el tamaño del material mediante mandíbulas que trituran los minerales.

- Enfriamiento del Clinker mediante una parrilla y ventiladores que disminuyen la temperatura con el aire del exterior.
- 4) Almacenamiento de cemento: Se distribuye el producto final a silos totalmente cerrados para impedir su contaminación. Finalmente será envasado y distribuido para su venta. (Merritt, Kent Loftin, & Ricketts, 2001)

## **Tipos de Cemento**

Existen varios tipos de cemento, los que difieren por su composición química, que ocasiona cambios en el fraguado y endurecimiento. (Holcim S.A)

### *Cementos portland*

- Tipo IP: Se refiere al cemento portland puzolanico. Se utiliza de forma general en todo tipo de construcciones, por sus características de baja hidratación y resistencia a los sulfatos.
- Tipo IS: Formado por la escoria que se extrae de los altos hornos.
- Tipo IT: Se producen con dos o más adiciones de caliza o escoria con el fin de mejorar sus propiedades.

La selección del cemento portland tipo IP para el presente proyecto de investigación se debe a que su uso en el país ha incrementado en construcciones de casas y edificios (Revista Lideres, 2014) y la producción del mismo (UNACEM Ecuador, s.f.) existe en varias marcas en el país como Selva legre, Holcim y Cementos Chimborazo.

## **Propiedades físicas del cemento**

### ***Finura o superficie específica***

La hidratación del cemento depende del tamaño de granos que se obtienen de la molienda, se tiene una correlación directa con el tiempo de hidratación y el tamaño del grano, con los granos finos, el agua tiene una mayor superficie de contacto y su



reaccionan es más rápida, por ende, el desprendimiento de calor es mayor. (De la Cruz Alta, 2018)

### ***Falso fraguado***

Se refiere al fenómeno de endurecimiento o rigidez prematura que se da en el cemento al momento de mezclarlo con agua, lo que depende una cantidad baja de calor, pero se puede regresar al estado anterior de plasticidad añadiendo mayor cantidad de agua. (Arribada, 1978)

### ***Tiempo de fraguado***

Es el tiempo necesario para que la mezcla cambie de estado plástico a estado de rigidez.. (Díaz Ponce, 2012)

Tiempo inicial de fraguado comienza al mezclar el cemento con agua y termina cuando la pasta es uniforme y la rigidez comienza a notarse en la composición. El tiempo final de fraguado transcurre hasta que la pasta está totalmente rígida y no se puede deformar. (Labahm, 1985).

### ***Consistencia normal***

Es la cantidad de agua que el cemento necesita para adquirir una consistencia estandarizada, es decir para que la hidratación del cemento sea la adecuada. (Asociación Colombiana de Productores de Concreto, s.f.)

### ***Densidad***

La densidad de un elemento es la relación entre la masa y el volumen de una cantidad dada. El rango para el cemento se encuentra entre 2.90 y 3.20 g/cm<sup>3</sup>. (Calleja, 1977)

## **Propiedades mecánicas**

### ***Resistencia a la tracción***

La resistencia a la tracción en el cemento es muy baja, razón por la cual no es necesaria al momento de diseñar edificaciones. (De la Cruz Alta, 2018)

### ***Resistencia a la compresión***

Es la propiedad mecánica principal del concreto, se define como la capacidad de soportar una carga por unidad de área, lo que se transmite en la función principal del cemento que es soportar las cargas de una edificación, simulando compresión. (Soto Izquierdo & Ramalho, 2018)

### ***Resistencia a la Flexión***

Es baja y sus resultados son variables debido a que la rigidez de la pasta de cemento elimina la capacidad elástica del material y su rotura se da a valores mínimos. Debido a esta característica, se utiliza en las construcciones la mixtura con varillas de acero, las mismas que aportan flexibilidad a la estructura. (Rezola Izaguirre, 1976)

## ***Propiedades químicas del cemento***

### ***Hidratación***

La hidratación del cemento es la reacción química que se produce cuando el Clinker se mezcla con el agua, formando la pasta de cemento; de este proceso se diferencian dos grandes etapas, que posteriormente serán más específicas: fraguado y endurecimiento. En el plano físico, la hidratación ocurre cuando los granos de cemento absorben el agua que está a su alrededor y forman un gel aglutinante o cristalino, que ira ganando dureza con el transcurso de tiempo. (Triviño Vasquez, 1974)

### **Calor de hidratación**

Las reacciones de hidratación son exotérmicas, es decir desprenden calor. Puede llegar a su máximo valor en un promedio de 1 a 3 días y disminuirá después. Las cantidades de calor puede variar dependiendo de varios factores, como el tipo de cemento, aditivos, finura, relación de proporciones agua/ cemento. (Moragues Terrades)

### **Composición química del cemento**

Los componentes principales del Clinker son silicatos y aluminatos de calcio, que se forman en el horno por la fusión de varios óxidos, entre los principales se encuentran los siguientes:

**Tabla 1**

*Composición química del cemento*

Óxidos	Contenido (%)
CaO	60-67
SiO <sub>2</sub>	17-25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3-8
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.5-6.0
MgO	0.1-4.0
Álcalis	0.2-1.3
SO <sub>3</sub>	1-3

*Nota.* Tomado de "Concreto Simple" por Gerardo Rivera.

### **Formación pasta cemento**

El proceso para que la mezcla de Clinker y agua se convierta en un producto duro y resistente consta de cinco fases específicas, donde ocurren varias reacciones químicas, combinadas con cambios de temperaturas. (Universidad de Alcalá)

Las fases son:

Primera fase: Evolución rápida de calor

Segunda fase: Inactividad

Tercera fase: Aceleración

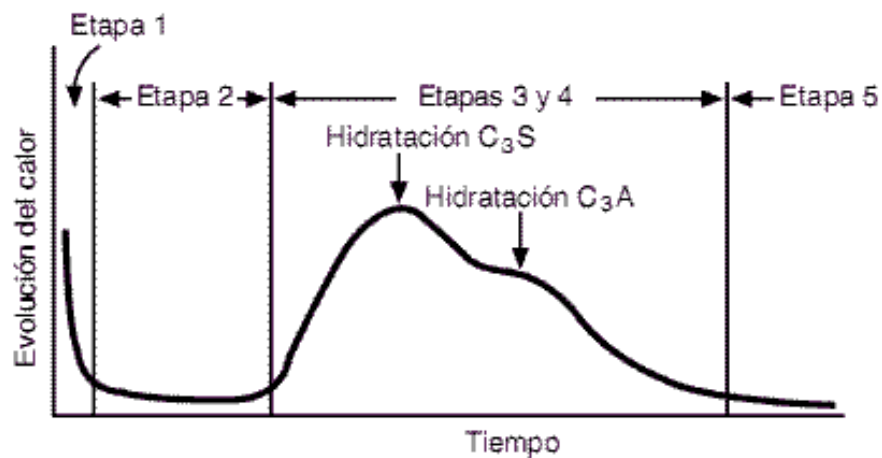
Cuarta fase: Desaceleración

Quinta fase: Estado estable

Mediante la curva calorimétrica (**Figura 1**) se puede apreciar los cambios de temperatura con relación al tiempo y diferenciar las fases para la formación del cemento.

### Figura 1

Gráfica calorimétrica sobre el comportamiento del cemento



*Nota.* Tomado de <http://notasdeconcretos.blogspot.com/2011/04/calor-de-hidratacion-del-hormigon.html>

Todos los cambios y reacciones que ocurren con las diferentes composiciones del cemento son muy extensas, por lo cual se utilizan ecuaciones simplificadas que demuestran los resultados finales de cada mezcla sin ahondar en formulas complicadas.

En un concepto general, las reacciones químicas se pueden simplificar en la siguiente ecuación (Merritt, Kent Loftin, & Ricketts, 2001):

Fases anhidras del Clinker + agua → fases hidratadas + energía (calor)

Las reacciones químicas que se generan forman la Alita, Belita y Celita. (**Tabla 2**)

Al enlazarse forman:

**Tabla 2**

*Composición química del Clinker*

Composición	Nombre	Formula química	Nomenclatura	Porcentaje
Alita	Silicato tricálcico	$3CaOSiO_2$	C3S	50-60%
Belita	Silicato dicálcico	$2CaOSiO_2$	C2S	20-25%
	Aluminato tricálcico	$3CaOAl_2O_3$	C3A	
Celita	Aluminato tetracálcico	$4CaOAl_2O_3Fe_2O_3$	C4AF	5-10%

*Nota.* Tomado de “Procesos de hidratación del cemento Portland. Microestructura del hormigón” por Amparo Moragues Terrades.

Las fases se explican a continuación (Calleja, 1977):

*Primera fase:* Se diluye los sulfatos y aluminatos. Hidrata C3S y forma etringita. La temperatura aumenta debido al aumento de superficie de contacto del cemento con el agua. Existe un cambio de estado líquido a estado sólido. La duración de esta fase es de 15 minutos aproximadamente.

*Segunda fase:* Disminuye las cantidades de concentración de silicatos y aumenta Ca para supersaturación. Produce un núcleo de silicatos de calcio hidratados. La temperatura baja relativamente. Pasa a un proceso de inactividad, llamado inducción, debido a que la formación de hidratos es baja. Se traduce físicamente en la forma plástica que queda la pasta y su maleabilidad. Tiene un periodo de 1 a 3 horas.

*Tercera fase:* Aceleración de la reacción química termina de formar CH CHS. (Formación de hidratos). Pasa de estado plástico a rígido y aumenta la temperatura. Comienza la solidificación. Los silicatos vuelven a hidratarse debido a la cristalización de los mismos, y llegan a su tope máximo de hidratación en un tiempo de 2 a 8 horas.

*Cuarta fase:* Etringita se cristaliza formando mono sulfato y silicatos. La temperatura ralentiza y aumenta la resistencia por la adherencia de la pasta, reflejado en el espesor de la capa de CHS, llegando a un estado estable. Su periodo es de 12 a 24 horas.

*Quinta fase:* Inicia la difusión. La hidratación se detiene porque ya no existe C3S para hidratar y la temperatura bajara hasta estar en balance con la temperatura ambiente.

### **Definición de biomásas**

Es la materia orgánica renovable de origen vegetal y/o animal que se utiliza como fuente de energía; siendo la madera y el carbón vegetal los combustibles mayormente utilizados desde el origen de los seres humanos como su principal fuente energética. Con el inicio de la revolución industrial fue relegada por el uso de combustibles fósiles, debido a que la generación de energía era mayor y más rápida de utilizar. (de Lucas Herguedas & del Peso Taranco, 2012)

Su uso ha resurgido por varios factores económicos y ambientales; lo que ha desencadenado en nuevas investigaciones para fomentar su uso y aprovechar al máximo su capacidad energética. En la actualidad se busca utilizar biomasa para la generación de electricidad y usos secundarios como almacenaje de calor y aditivos para construcción. La obtención de la energía puede ser natural o artificial, se dividen en combustión, digestión anaerobia, gasificación y pirolisis. (Altamirano & Cueva, 2011)

### ***Arundo Donax (o Carrizo)***

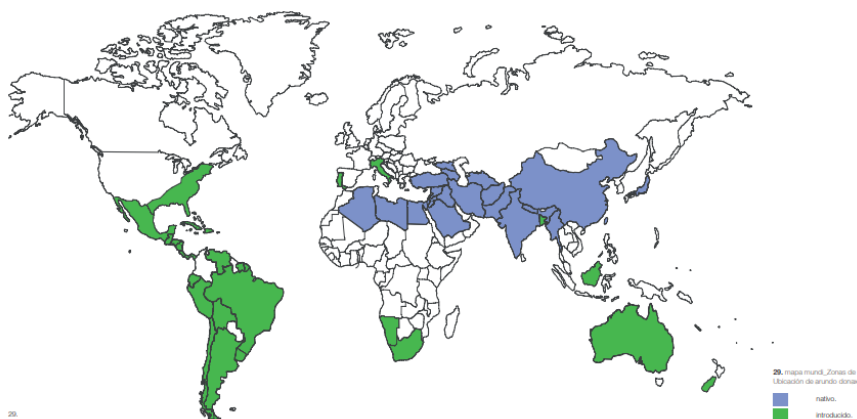
Es el nombre científico que se da a la caña gigante o carrizo como es mayormente conocida en el Ecuador. Crece en ambientes templados y fríos, cerca de suelos húmedos y pantanos, aunque se puede adaptar a cualquier tipo de suelo. Su altura es de 1 a 2 metros, aunque se conocen especímenes que alcanzan los 3 metros de altura. (Acosta Solís, 1960)

En el Ecuador crece principalmente en la región interandina asemejando su apariencia al bambú. Sus hojas son largas y verdes, pero cambian a un color amarillento cuando la planta madura y su tronco tiene un diámetro de 2 a 3 centímetros. (Acosta Solís, 1960)

Se considera como maleza o planta invasiva en el ecosistema debido a su reproducción simple y rápida, pero no produce ningún daño en cultivos y se utiliza en su mayoría para construcciones simples y rudimentarias. Su origen se remonta a Asia, pero su crecimiento se ha registrado en zonas de América, África y Oceanía. (**Figura 2**) (Altamirano & Cueva, 2011)

### **Figura 2**

*Mapamundi sobre existencia de tipos de Arundo Donax*



*Nota.* Tomado de “Estudio y Experimentación de Paneles Estructurales y de revestimiento en Base de la Caña de la Sierra.” Por C. Altamirano y E. Cueva, 2011.

### **Caña de azúcar**

La caña de azúcar es una planta originaria del sudeste asiático, y las islas que forman Oceanía, llegan hasta alturas de 6 metros con un diámetro de 2 a 3 centímetros. (Altamirano & Cueva, 2011)

Su uso se basa en la extracción del zumo rico en sacarosa, el mismo es cristalizado para la formación de azúcar y su posterior comercialización, y en menor cantidad para la preparación de panela y alcohol. En el Ecuador su crecimiento y cosecha es en la región Costa, por las cantidades de humedad y temperatura que necesita la planta para crecer. (Paucar Verdejo & Robalino Jácome, 2009)

El uso del bagazo como biomasa ha existido desde la invención de las fábricas azucareras, siendo el combustible para la generación de vapor en la maquinaria para refinar el azúcar. (Dancé Caballero & Sáenz Yaya)

### **Palma oleífera (o Palma africana)**

Llamada mayormente como palma aceitera, se origina en la región central del continente africano y es introducida a América en el siglo XVI y se expandiendo su crecimiento desde Brasil hacia otros países. Su altura puede llegar hasta los 15 metros y un diámetro de 60 centímetros, con hojas largas pinnadas de 8 metros de largo (**Figura 3**). Se utiliza para la extracción de aceite de su fruto o semilla, para la producción de aceite comestible y aceite industrial, sin embargo, sus tallos y hojas son desechados sin ningún uso específico. (Revista Lideres)

Su cultivación en el Ecuador se remonta al año 1953 en la zona de la Concordia y ampliando sus cultivos en la actualidad a las provincias de Santo domingo de los Tsáchilas, Esmeraldas y la Amazonia, obteniendo una expansión exponencial hasta alcanzar las 600000 toneladas de producción anual, exportando la mayor parte de la misma. (Potter, 2011)



**Figura 3***Planta de Palma africana*

*Nota.* Foto tomada en el complejo Kapari, Cantón San Miguel de los Bancos

**Definición de aditivos para cemento**

Son adicionales a la mezcla de cemento y agua para modificar y mejorar sus propiedades físicas y químicas. Su cantidad no puede exceder el 5% de la masa total de cemento y debe ser añadido antes o durante el proceso de mezclado. La única necesidad para el uso de aditivos es mejorar las características del cemento, si es que no se puede optimizar económicamente con la mezcla básica; ya que su mal uso ocasionara resultados inversos. (Gaspar Tebar, 1985)

Las propiedades a mejorar son la disminución de tiempo de fraguado, aumento en la resistencia mecánica, calor de hidratación y una mejor manejabilidad de la mezcla a utilizar; por lo tanto, estas características son las definitivas para clasificar cada tipo de aditivo existente en el mercado. (San Juan Barbudo & Chichón Yepes, 2014)

## **Tipos de aditivos**

Existen varios tipos de aditivos, dependiendo de la característica que se desea mejorar en la mezcla. (CEMEX, s.f.)

*Tipo A Plastificante:* Ayudan a reducir la cantidad de agua, produciendo una mezcla más fluida, debido a que las partículas de cemento se dispersan para aumentar su hidratación con una cantidad menor de agua.

*Tipo B Retardador:* Se utilizan para prologar el tiempo de fraguado, permitiendo a la mezcla conservar su fluidez y ayuda a que su transporte en distancias largas tenga un periodo más extenso.

*Tipo C Acelerante:* Ayuda a acelerar el fraguado y aumentar la resistencia mecánica, aunque si no es controlado puede ocasionar la contracción en el secado.

*Tipo D Plastificante retardador:* Permite la reducción en la cantidad de agua y retrasar el tiempo de fraguado.

*Tipo E Plastificante acelerante:* Disminuye el uso de agua en la mezcla y el tiempo de fraguado para fomentar su dureza rápidamente.

*Tipo F Superplastificante:* Se implementó su uso aumentar resistencia mecánica y abastecer la demanda con la menor cantidad de material posible, en este caso acortando el uso de agua. (Asociación Colombiana de Productores de Concreto, s.f.)

## **Capítulo III**

### **Método de ensayo**

#### **Calorímetro adiabático**

Un calorímetro es un dispositivo que mide la cantidad de calor que se produce en una reacción. Es un sistema adiabático y por ende no permite la transferencia de energía con el exterior, en nuestro caso el medio ambiente; por lo cual el calor liberado dentro del

calorímetro debe ser totalmente absorbido por el mismo. (Gonzales, Lira Cortés, & Sánchez Rodríguez)

### **Calibración del equipo**

Para el desarrollo de los ensayos se realizó primero la recuperación del equipo, porque no ha sido manejado con cuidado y varios de sus elementos físicos se encuentran deteriorados ni se han realizado pruebas para revisar el funcionamiento de sus componentes electrónicos.

En el Anexo A se especifica cada una de las partes del calorímetro y su reparación constatada en bitácoras de mantenimiento en el Anexo B.

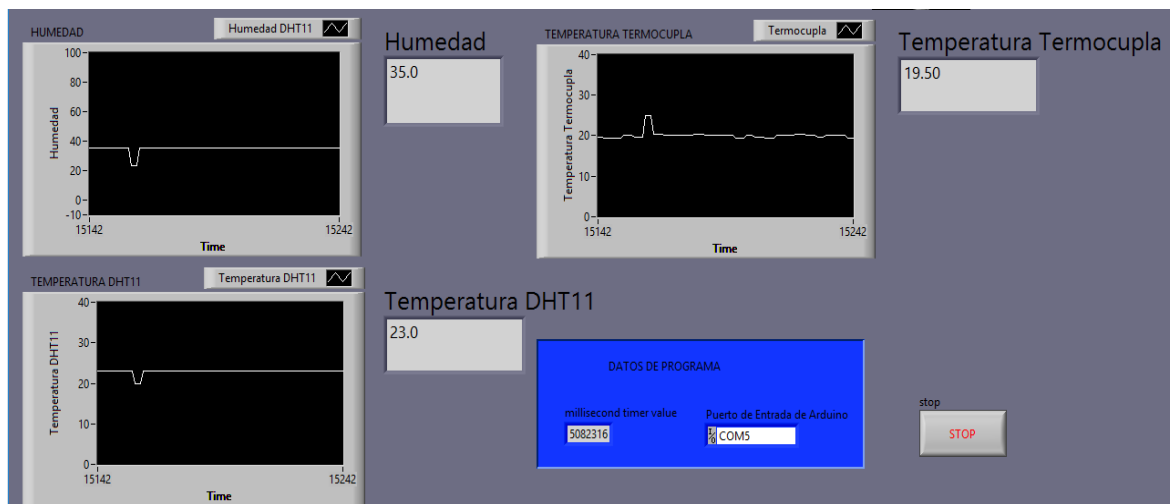
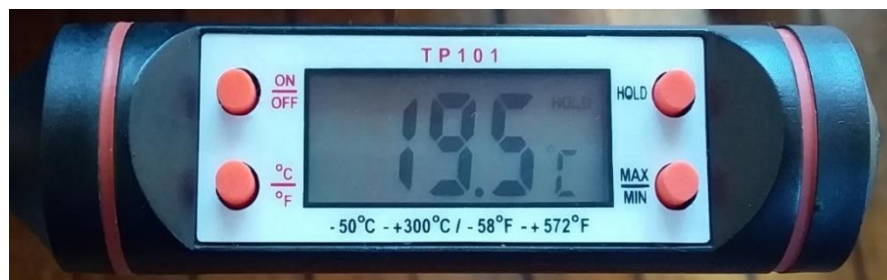
Para revisar y probar que la termocupla tipo k brinda los valores correctos de temperatura, se determinara la temperatura de 50 gramos de agua destilada. Se vierte la cantidad de agua en un envase de vidrio y con la ayuda de un termómetro digital se mide la temperatura, la misma es 19.5°C. (**Figura 6**)

Posteriormente se envasa el agua dentro de un vaso termoplástico y se ingresa el mismo dentro del calorímetro. Pasado un minuto se comprueba la temperatura en la interfaz del programa y es de 19.5°C. (**Figura 4**)

Se concluye que la termocupla tipo k no tiene ningún daño y brinda la medida exacta.

Para calibrar el sensor DHT11 se retira la primera tapa del calorímetro, y se colocó en la parte superior el termómetro ambiental. Después de un minuto con la ayuda de un termómetro ambiental, se determina que la temperatura de la habitación es de 23.2°C. (**Figura 5**)

Correspondientemente la temperatura medida por el sensor es de 23°C. (**Figura 4**). Se concluye que el sensor DHT11 se encuentra en óptimas condiciones.

**Figura 4***Captura de programa termocipila***Figura 5***Medición de termómetro ambiental***Figura 6***Medición de termómetro digital*

### **Preparación de pasta de cemento**

Se utilizó cemento portland puzolanico tipo IP de la marca Chimborazo para las pruebas respectivas.

Basándose en la norma NTE INEN 199 “Cemento hidráulico. Determinación del calor de hidratación”; obtenemos las cantidades necesarias para la preparación de pasta de cemento.

Se debe almacenar el cemento y el agua de mezcla en una habitación con temperatura constante a  $23,0\text{ C} \pm 2,0$  hasta que los materiales alcancen la temperatura ambiente antes de la preparación de la pasta. Posteriormente se mezcla 150 gramos de cemento y  $60\text{ cm}^3$  de agua destilada con ayuda de una espátula y remover la mezcla vigorosamente con un removedor mecánico por 5 minutos. Colocar porciones aproximadamente iguales, representativas de la pasta en cuatro o más recipientes de plástico, llenándolos hasta cerca de 13 mm desde la parte superior. Inmediatamente después del llenado de los recipientes, cerrar con tapones bien ajustados o tapas. (Insituto Ecuatoriano de Normalización, 2009)

### **Preparación de biomasa**

Este estudio se lo denomina exploratorio, debido a que existen varios estudios previos realizados mezclando cemento con diferentes biomásas como caña de azúcar, ceniza y aserrín de madera, utilizaron varios porcentajes de biomasa con respecto a la masa de cemento manipulada, que van de 5% hasta 40%; por lo tanto, en este estudio de investigación se utiliza el 3.33% de masa de biomasa con respecto a la masa de cemento que es de 150 gramos, lo que da un valor de 5 gramos.

El bagazo de caña se adquirió como rechazo de extracción de jugo de caña en la ciudad del Quinche, la caña utilizada es originaria de la ciudad del Puyo. (**Figura 7**)

Las hojas de palma africana se adquirieron en el cantón San Miguel de los Bancos como rechazo de la extracción de aceite de palma. (**Figura 8**)

Las hojas de carrizo se extrajeron de las plantas que crecen a las orillas del Rio Santa Clara cerca del Parque Bulevar Santa Clara ubicado en la ciudad de Sangolquí. (**Figura 9**)

Para una mejor adición en la mezcla de cemento y agua, se deshidrato toda la biomasa esparcida en plástico negro y recibiendo el calor del sol durante 30 días, posteriormente se recortó cada una en partes cuadradas y rectangulares de 5 mm de lado aproximadamente. (**Figura 10**)

### Figura 7

*Bagazo seco de caña de azúcar*



### Figura 8

*Hojas secas de palma africana*



**Figura 9**

*Hojas secas de carrizo*

**Figura 10**

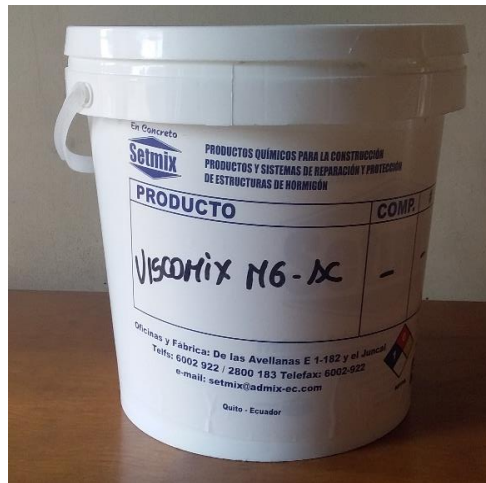
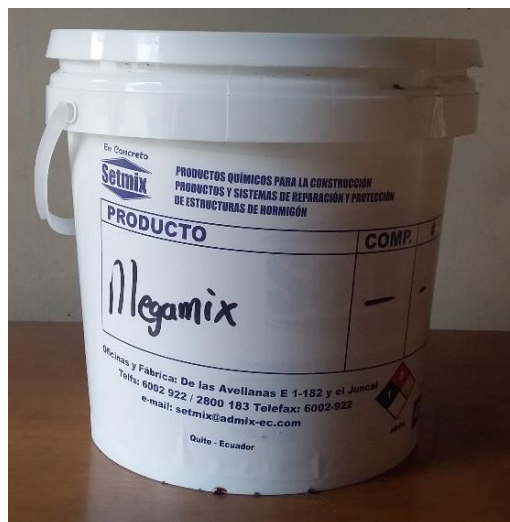
*Hojas de palma africana recortadas*



### **Preparación de aditivos**

Los aditivos que se manejaron en las pruebas son Viscomix (**Figura 11**) y Megamix (**Figura 12**) de tipo superplastificantes de la marca Setmix, los mismos que han sido donados por parte de la empresa.

Se mezclaron variaciones de 2 gramos y 1 gramo de cada uno de los aditivos, representado los porcentajes de 1.33% y 0.67% con respecto a la masa de cemento.

**Figura 11***Aditivo Superplastificante Viscomix***Figura 12***Aditivo Superplastificante Megamix***Preparación de agua destilada**

De acuerdo a la norma NTE INEN 199 se requiere agua destilada para la mezcla de cemento, por lo cual se adquirió un galón de agua destilada (**Figura 13**) de uso automotriz para baterías. (Insituto Ecuatoriano de Normalización, 2009)



**Figura 13**

*Galón de agua destilada*

**Ensayos realizados en calorímetro**

Primero se pesó cada uno de las partes para la mezcla con la ayuda de una balanza electrónica y se colocó en envases separados. (**Figura 14**), (**Figura 15**) y (**Figura 16**).

**Figura 14**

*Medición de cemento portland puzolánico*



**Figura 15**

*Medición de agua destilada*

**Figura 16**

*Medición de biomasa*



El aditivo Superplastificante se extrajo de su recipiente con una pipeta y se pesó en una cuchara plástica debido a la poca cantidad de líquido. (**Figura 17**)

**Figura 17**

*Medición de aditivo superplastificante*

**Figura 18**

*Separación de elementos para la mezcla*



Al tener todos los elementos listos, se procede a mezclarlos en un recipiente de vidrio (**Figura 19**) y con un agitador metálico durante un lapso de 5 minutos. (**Figura 20**)

**Figura 19**

*Envase de vidrio y agitador metálico*

**Figura 20**

*Mezcla homogénea de cemento*



Como recipiente de la mezcla que va a ingresar en el calorímetro se utilizó vasos foam térmicos porque tienen un poder calorífico bajo y no transmitirá calor hacia el calorímetro. (**Figura 21**)

Parte de la mezcla se vierte en el vaso térmico y se deposita en el interior del primer recipiente.

**Figura 21**

*Mezcla vertida en un vaso térmico*



Se coloca la termocupla tipo k en el primer recipiente y se inserta parte de la lámina de cobre en la mezcla hasta que tengan contacto con la mezcla. (**Figura 22**)

**Figura 22**

*Vaso térmico dentro del calorímetro*



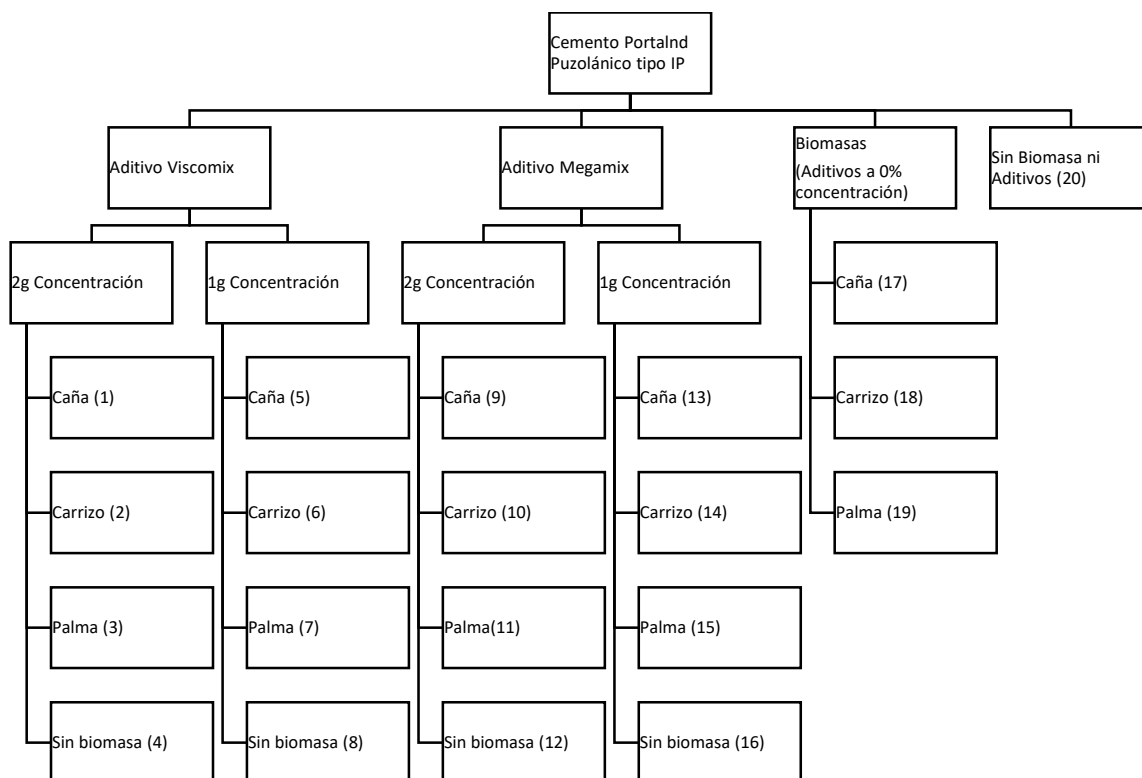
Se cierra cada uno de los recipientes con las tapas de PVC cuidando que el cable de la termocupla no se mueva de su posición.

Posteriormente se corre el programa de LabView.

Cada una de las mezclas se las realizo con el mismo procedimiento previamente explicado, constando un total de 20 ensayos realizados en el calorímetro adiabático, especificados en la siguiente figura

**Figura 23**

*División de ensayos*



## Capítulo IV

### Procesamiento de datos y análisis de resultados

#### Procesamiento de datos

Los datos obtenidos mediante la interfaz LabView son tabulados en tablas de Excel, cada uno separado por un espacio de 5 minutos debido a que la toma de datos se extiende hasta por 14 horas ininterrumpidas y de esta forma se facilita la generación y visualización de las gráficas temperatura vs tiempo para ilustrar las diferentes curvas de hidratación.

Para una mejor comprensión del manejo y obtención de datos por parte del programa se trazó el manual de operación al final del trabajo de investigación, (ver Anexo C).

La termocupla tipo k posee una apreciación de 0.1 grados centígrados, suficientes para interpretar los datos y plasmarlos en las gráficas de curvas de hidratación.

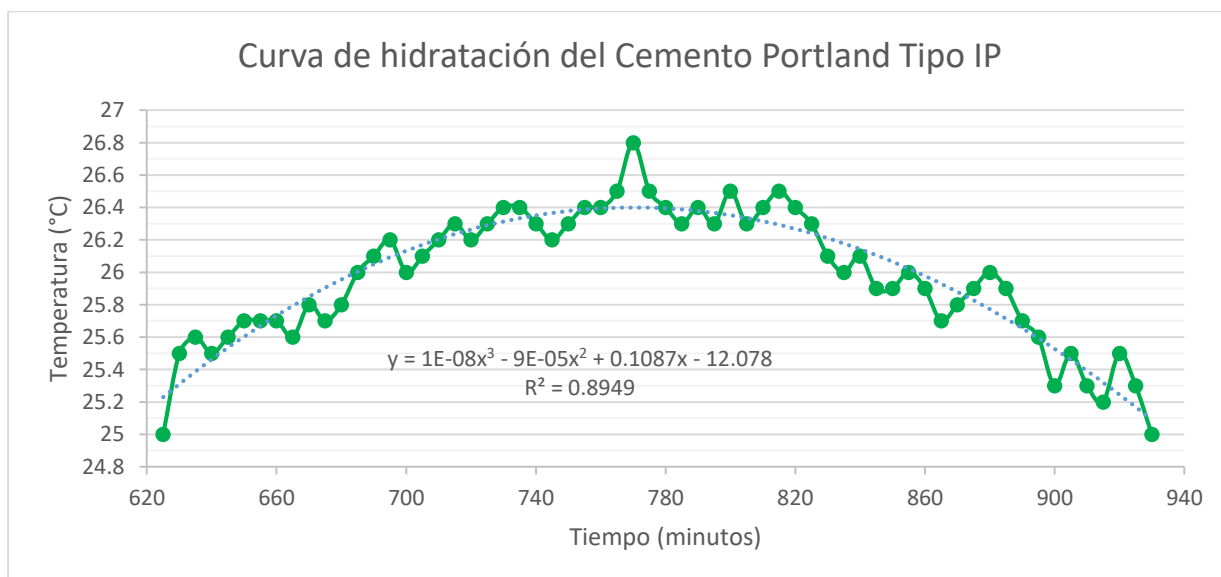
El sensor DHT11 tiene una apreciación de 1°C; el cual no crea ningún inconveniente en la investigación realizada porque los datos recabados solamente ayudan a reflejar que el calorímetro es un sistema adiabático, es decir no existe transferencia de calor entre el exterior y el interior de los recipientes que constituyen el calorímetro.

### Curvas de hidratación

#### ***Cemento Portland Puzolanico Tipo IP Marca Chimborazo***

#### **Figura 24**

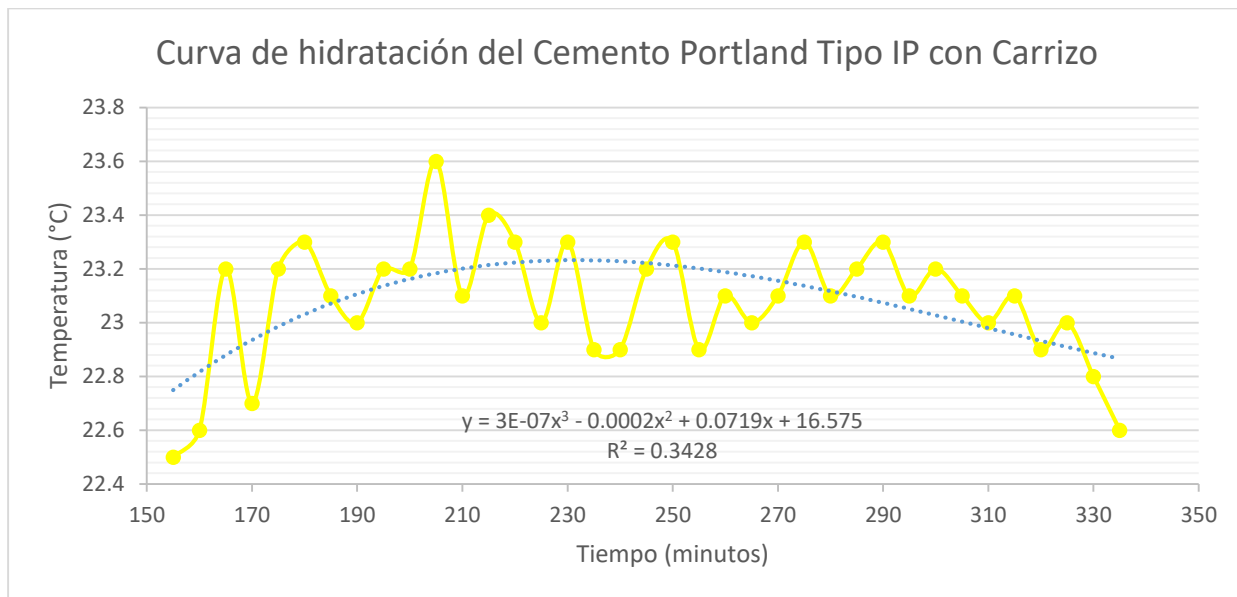
#### *Curva de hidratación del Cemento Portland Tipo IP*



## Biomosas

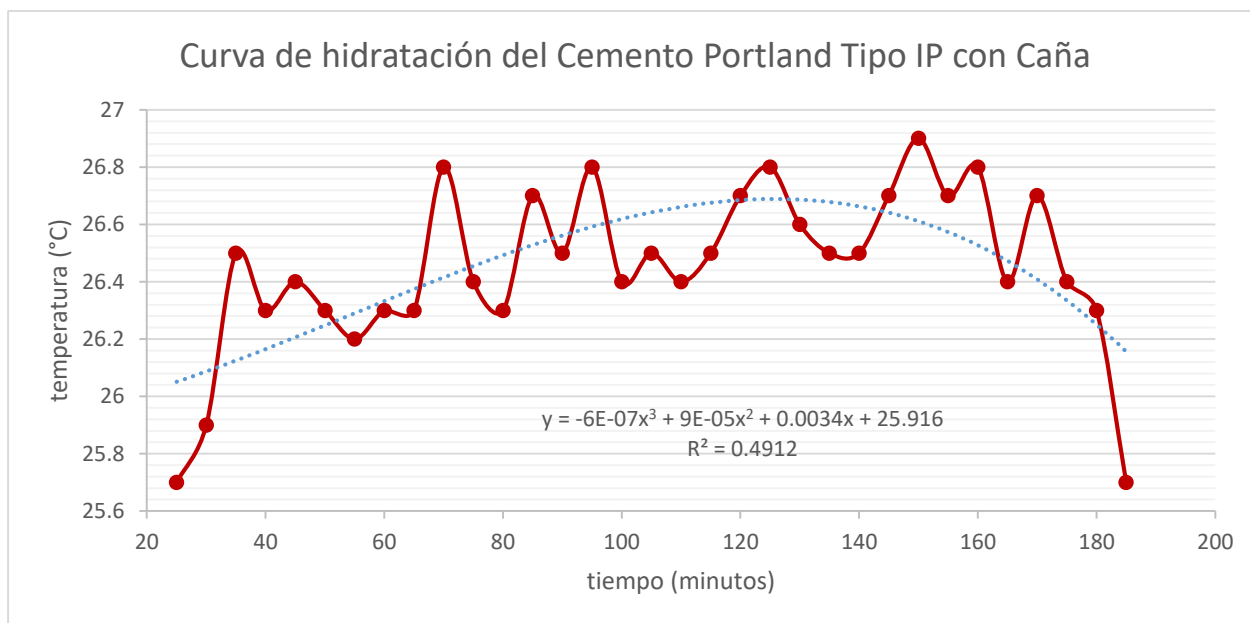
### Figura 25

Curva de hidratación del Cemento Portland Tipo IP con Carrizo



### Figura 26

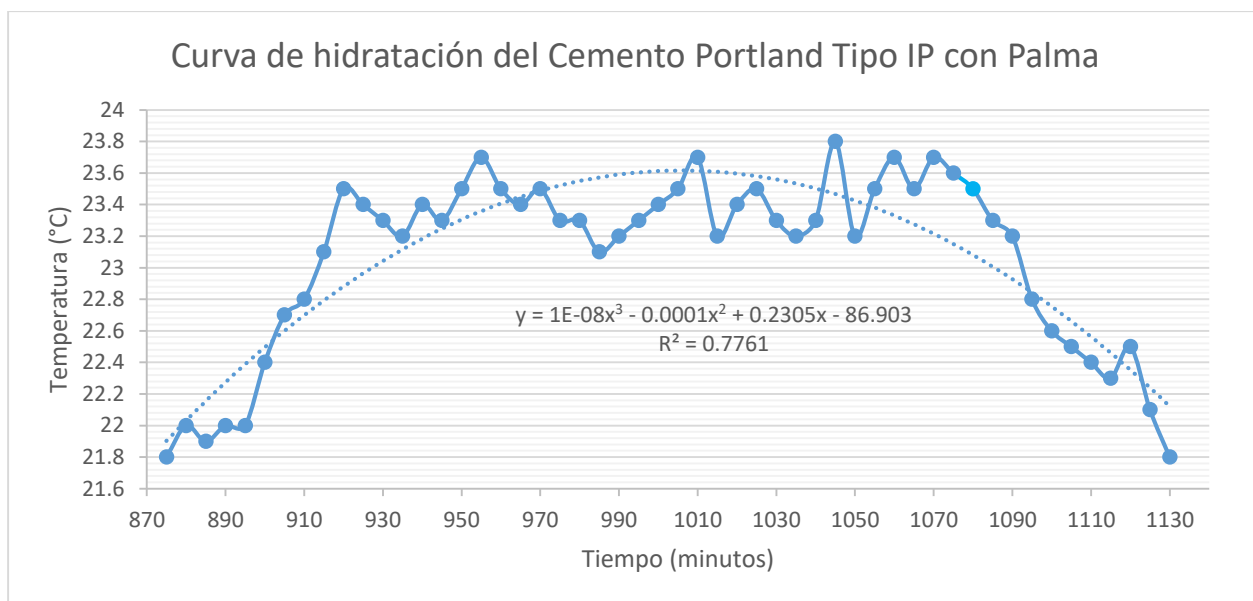
Curva de hidratación del cemento portland tipo IP con caña





**Figura 27**

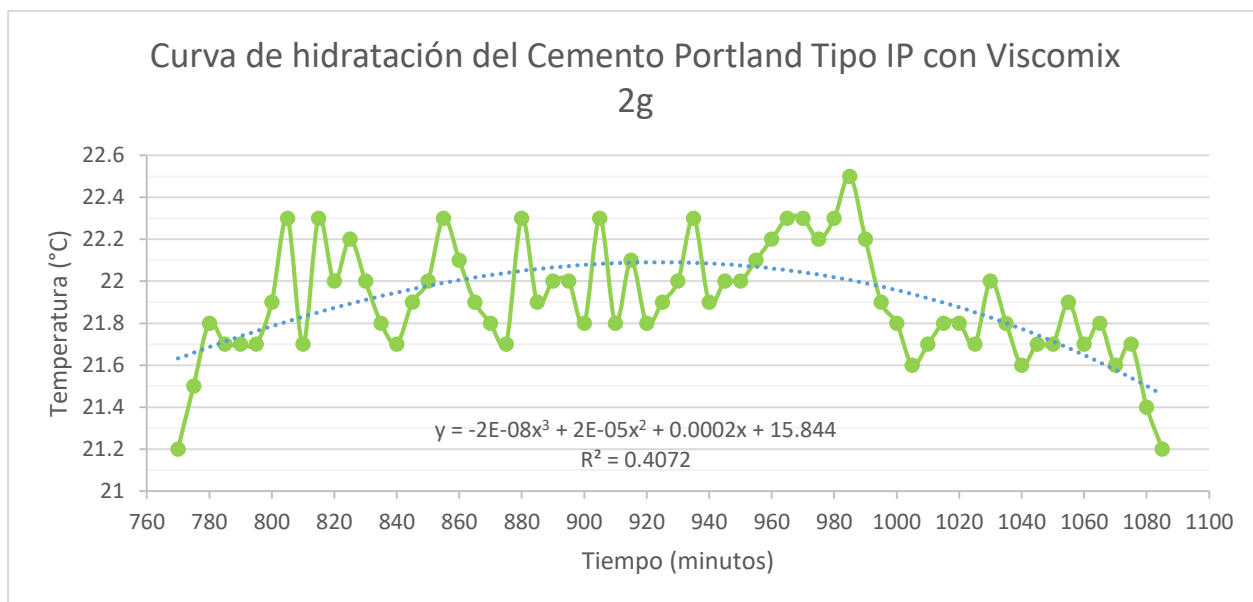
*Curva de hidratación del cemento portland tipo IP con palma*



**Aditivo Superplastificante Viscomix 2 gramos**

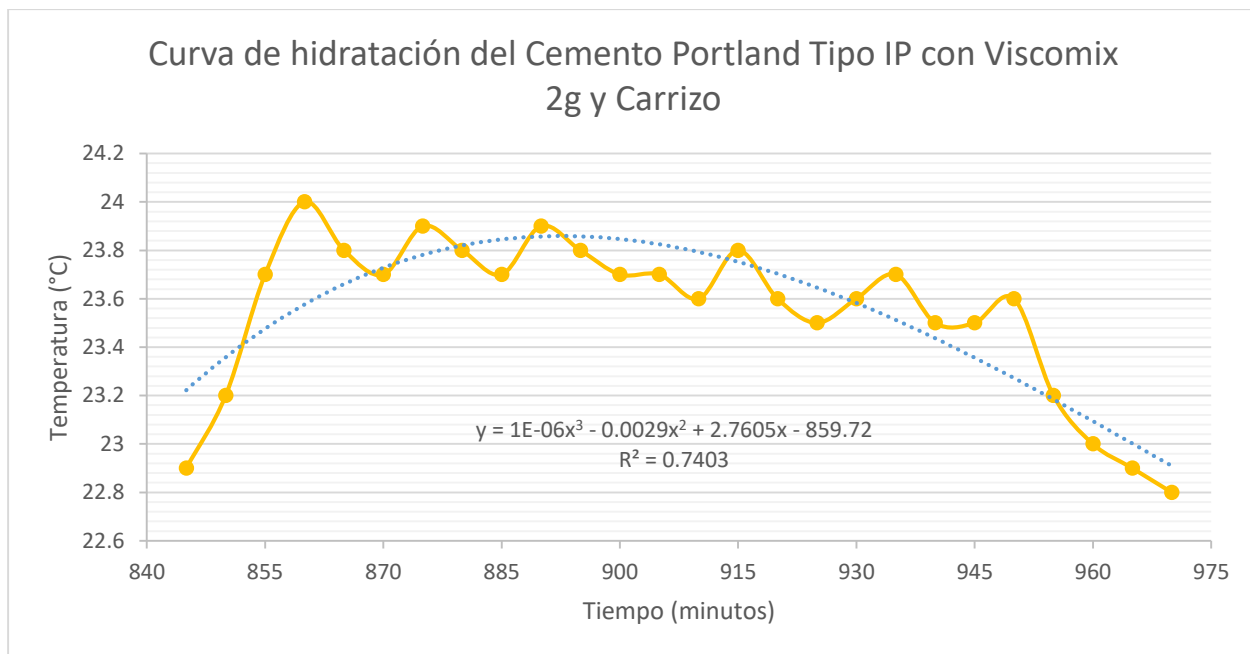
**Figura 28**

*Curva de hidratación del cemento portland tipo IP con viscomix 2g*

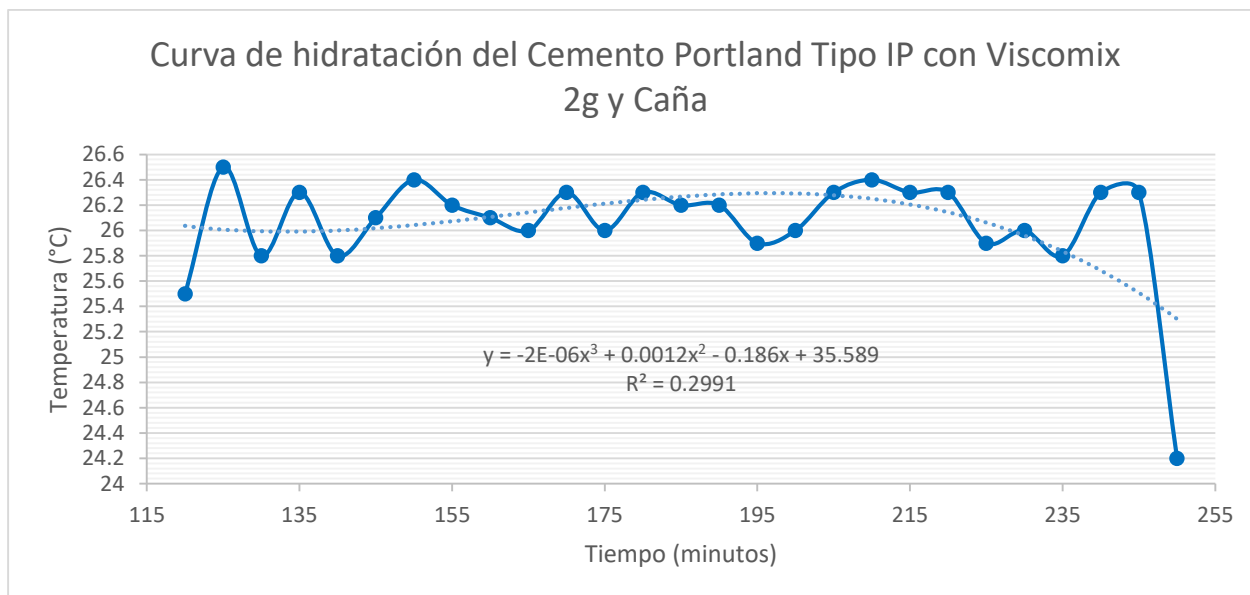


**Figura 29**

Curva de hidratación del cemento portland tipo IP con viscomix 2g y carrizo

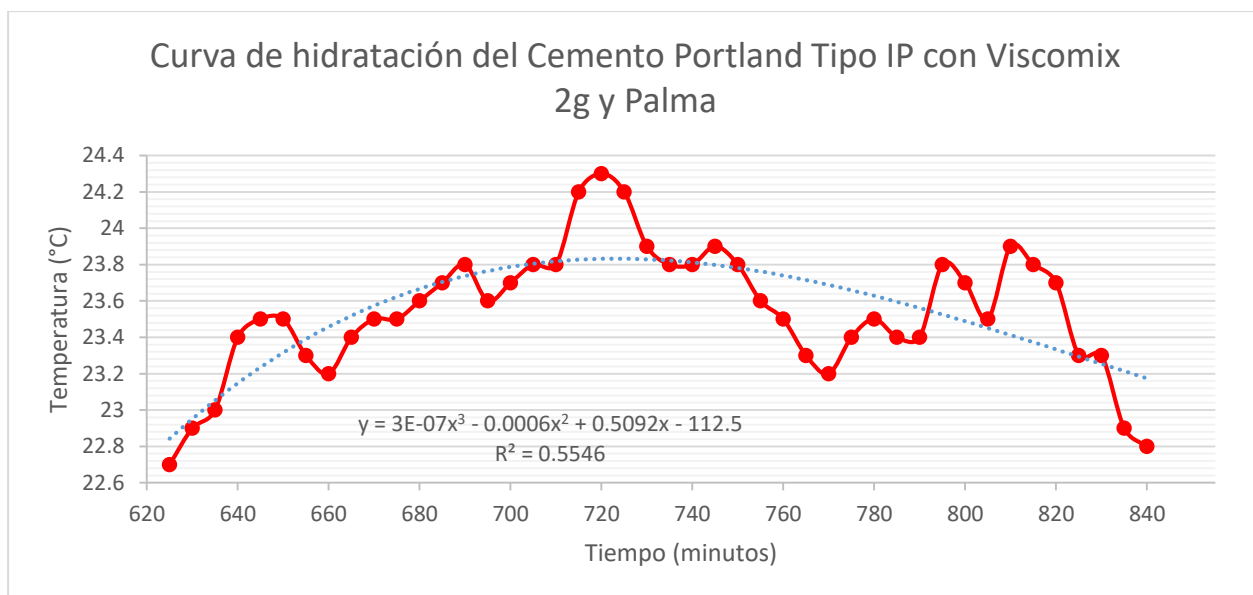
**Figura 30**

Curva de hidratación del cemento portland tipo IP con viscomix 2g y caña



**Figura 31**

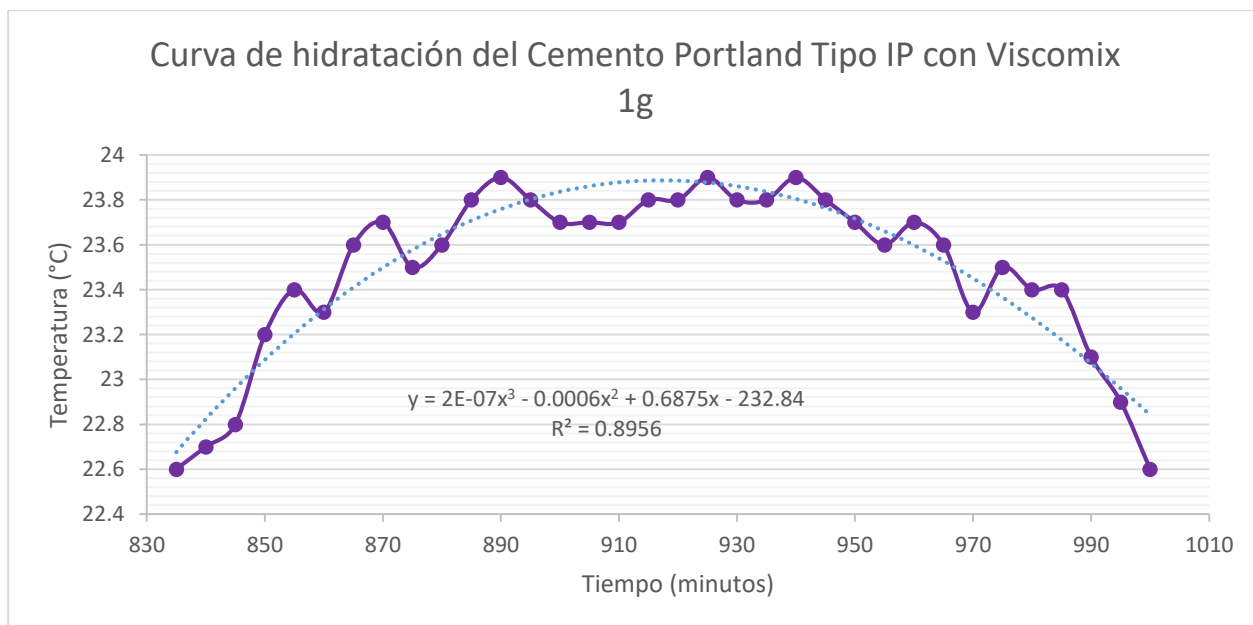
*Curva de hidratación del cemento portland tipo IP con viscomix 2g y palma*



**Aditivo Superplastificante Viscomix 1 gramo**

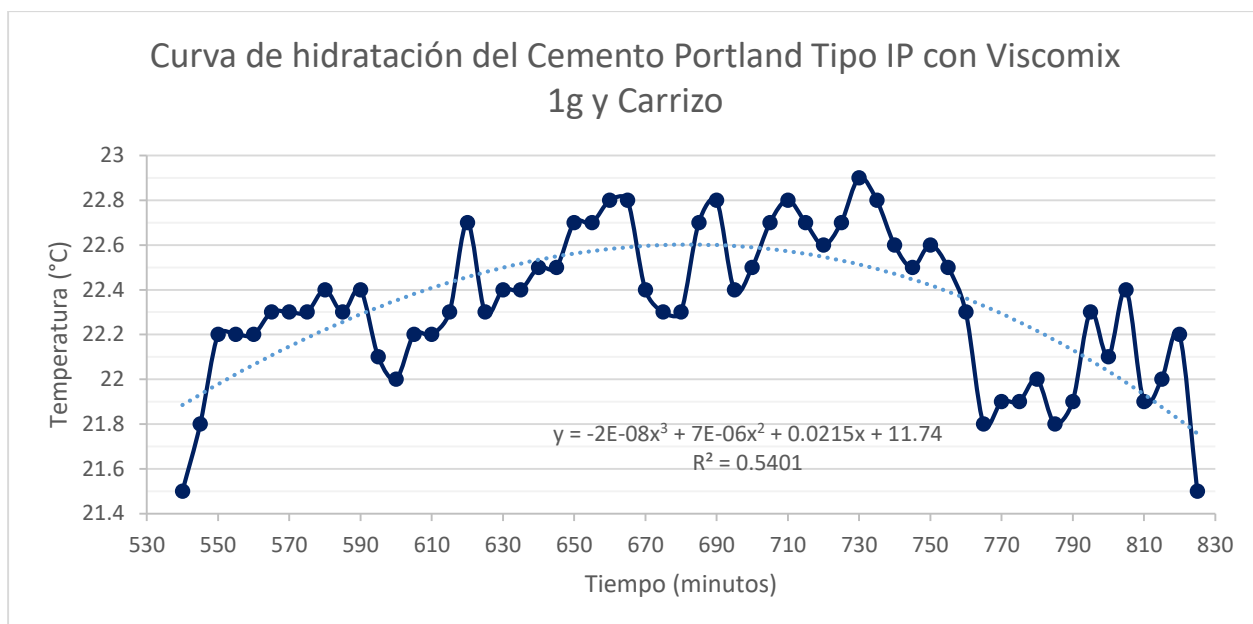
**Figura 32**

*Curva de hidratación del cemento portland tipo IP con viscomix 1g*

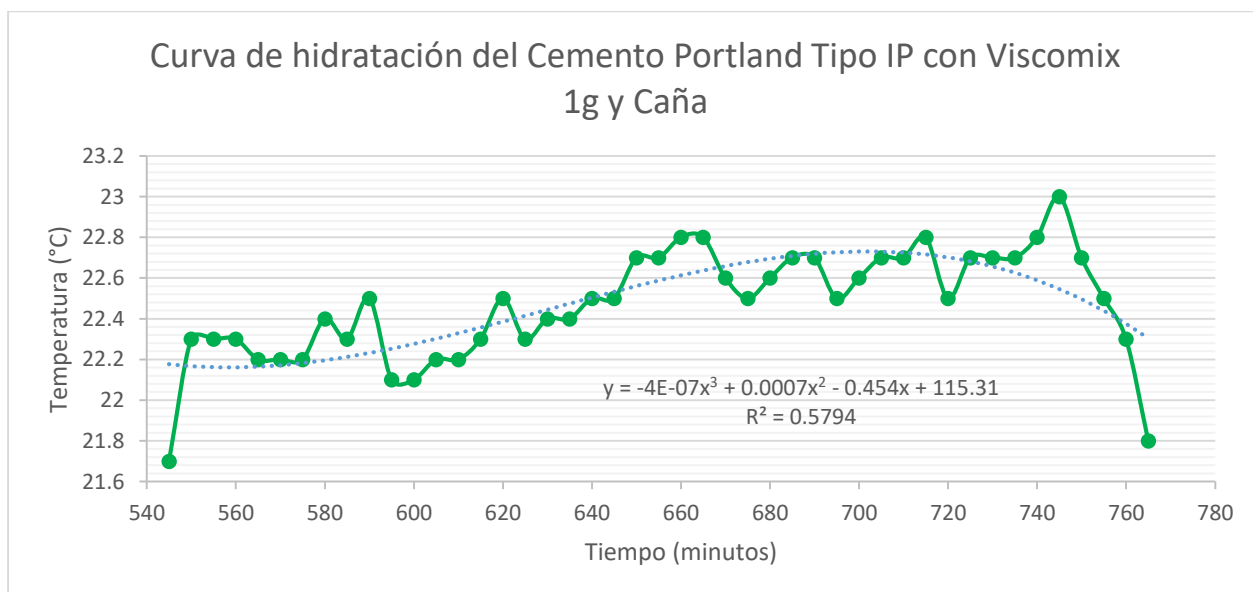


**Figura 33**

Curva de hidratación del cemento portland tipo IP con viscomix 1g y carrizo

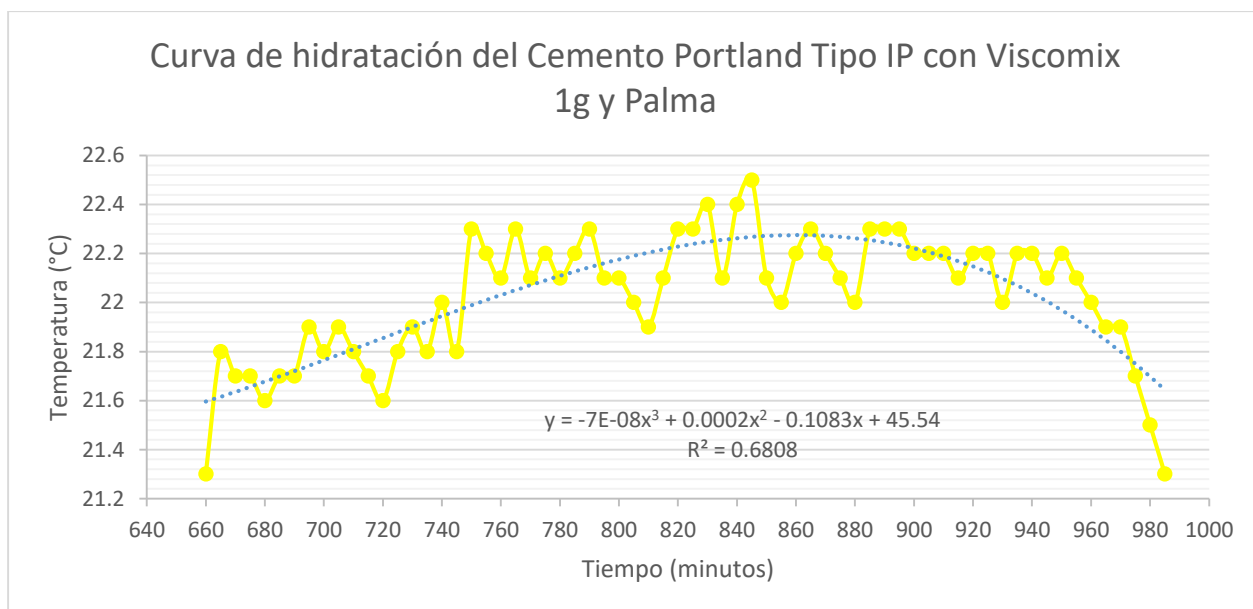
**Figura 34**

Curva de hidratación del cemento portland tipo IP con viscomix 1g y caña



**Figura 35**

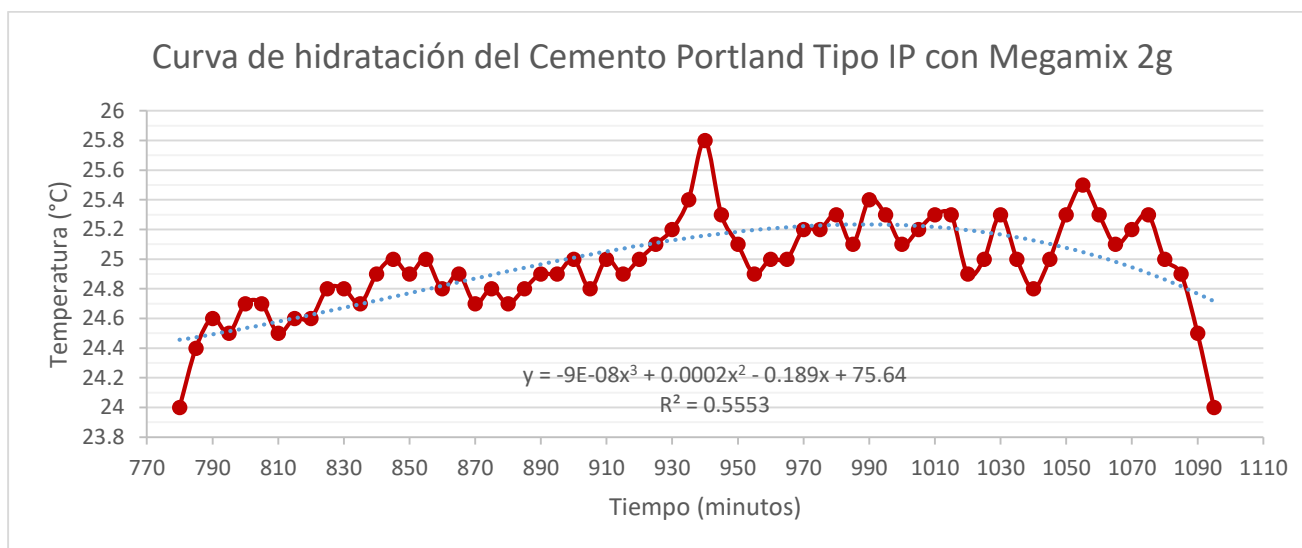
*Curva de hidratación del cemento portland tipo IP con viscomix 1g y palma*



**Aditivo Superplastificante Megamix 2 gramos**

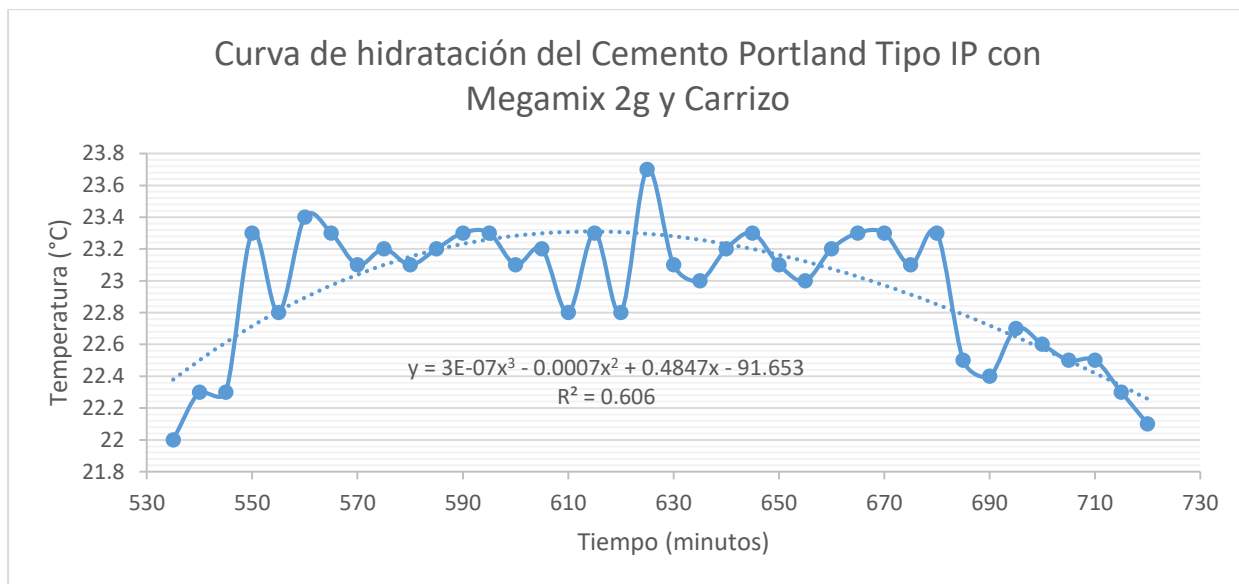
**Figura 36**

*Curva de hidratación del cemento portland tipo IP con megamix 2g*

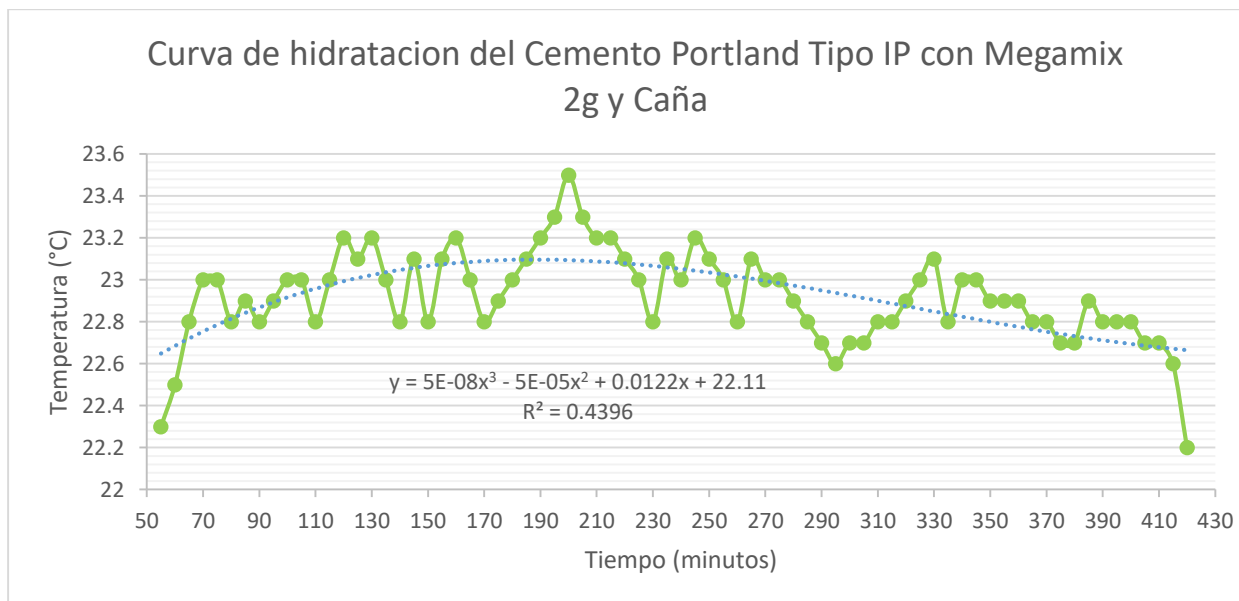


**Figura 37**

*Curva de hidratación del cemento portland tipo IP con megamix 2g y carrizo*

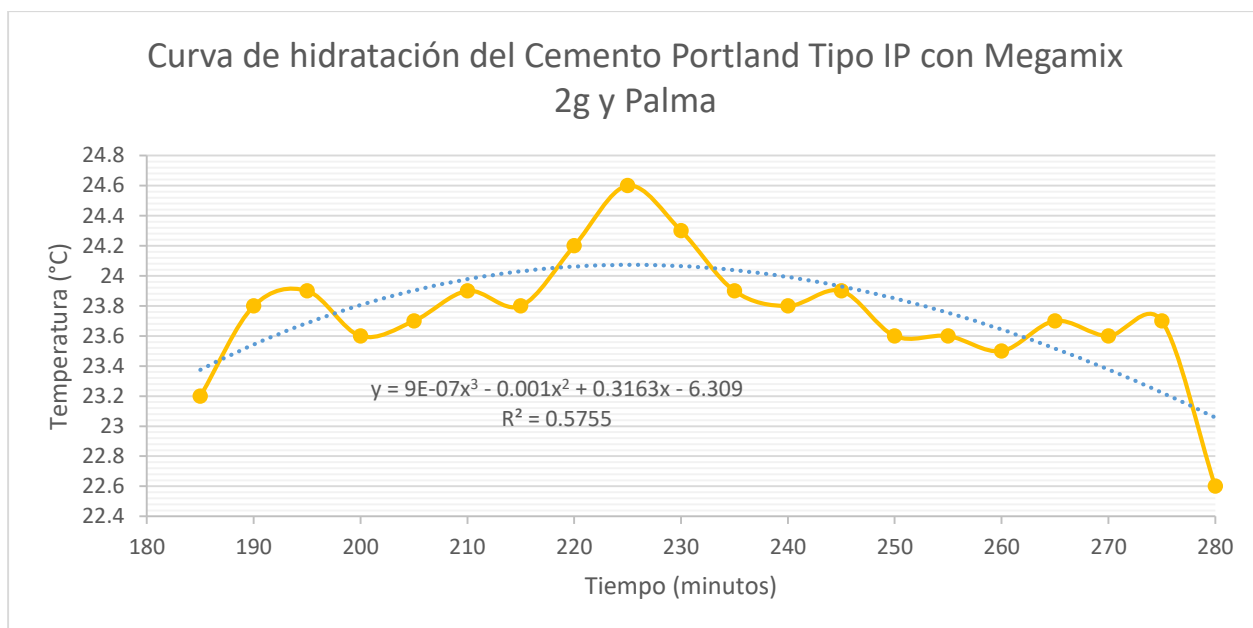
**Figura 38**

*Curva de hidratación del cemento portland tipo IP con megamix 2g y caña*

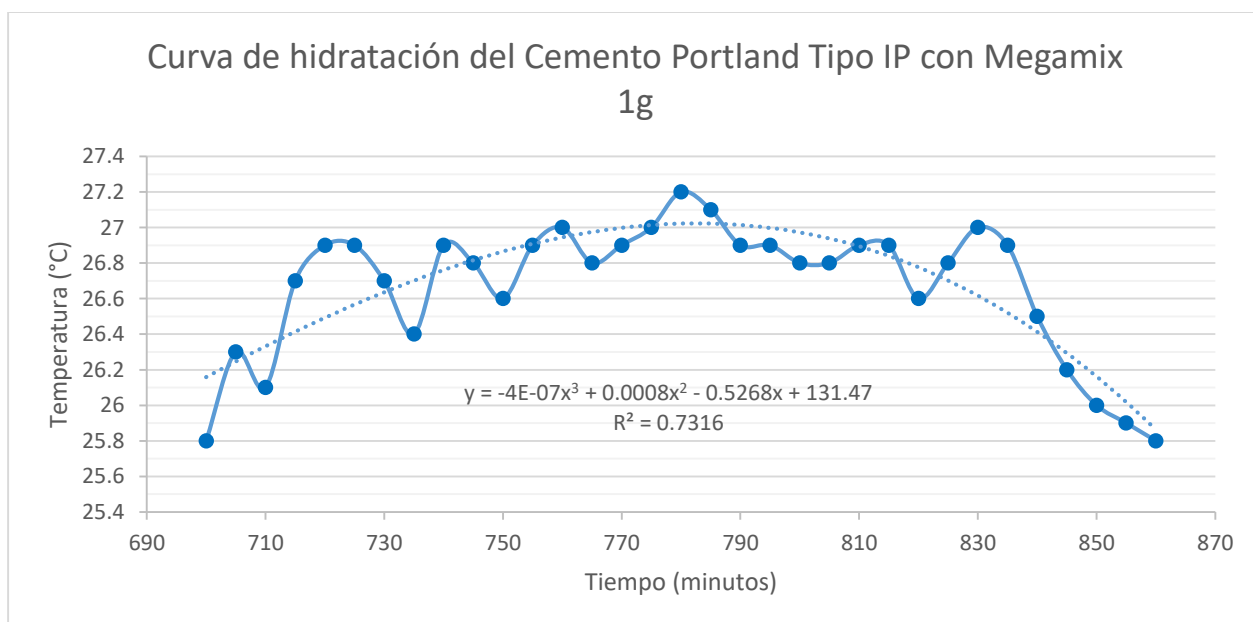


**Figura 39**

Curva de hidratación del cemento portland tipo IP con megamix 2g y palma

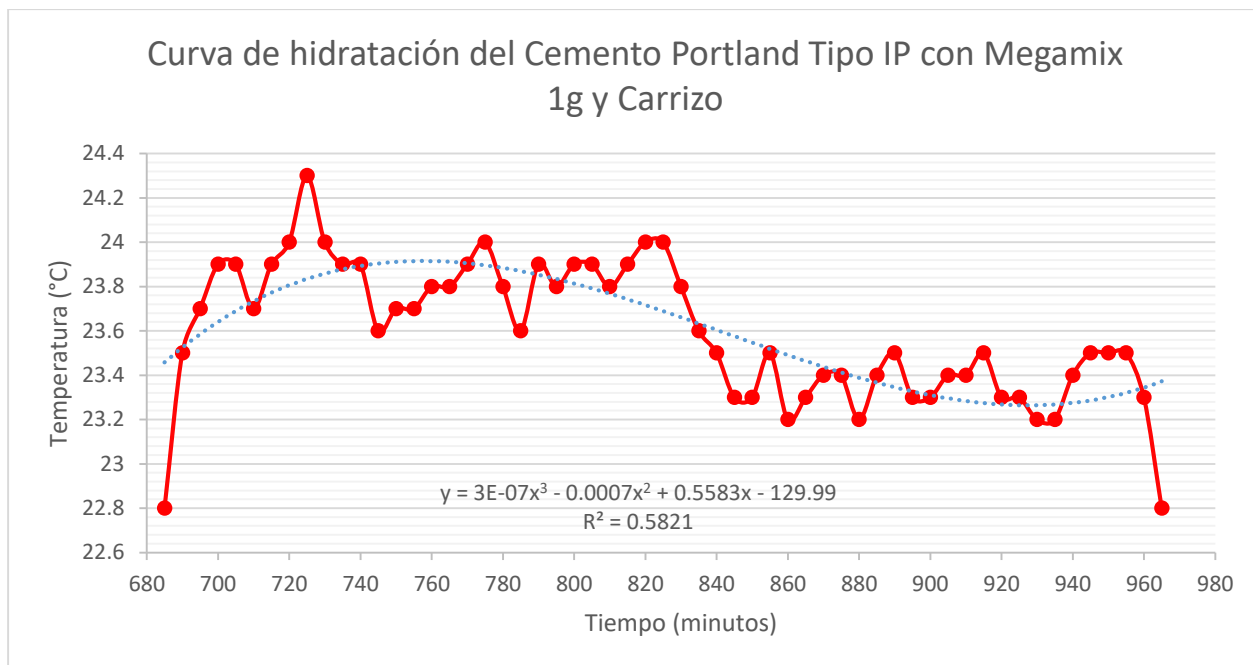
**Figura 40**

Curva de hidratación del cemento portland tipo IP con megamix 1g

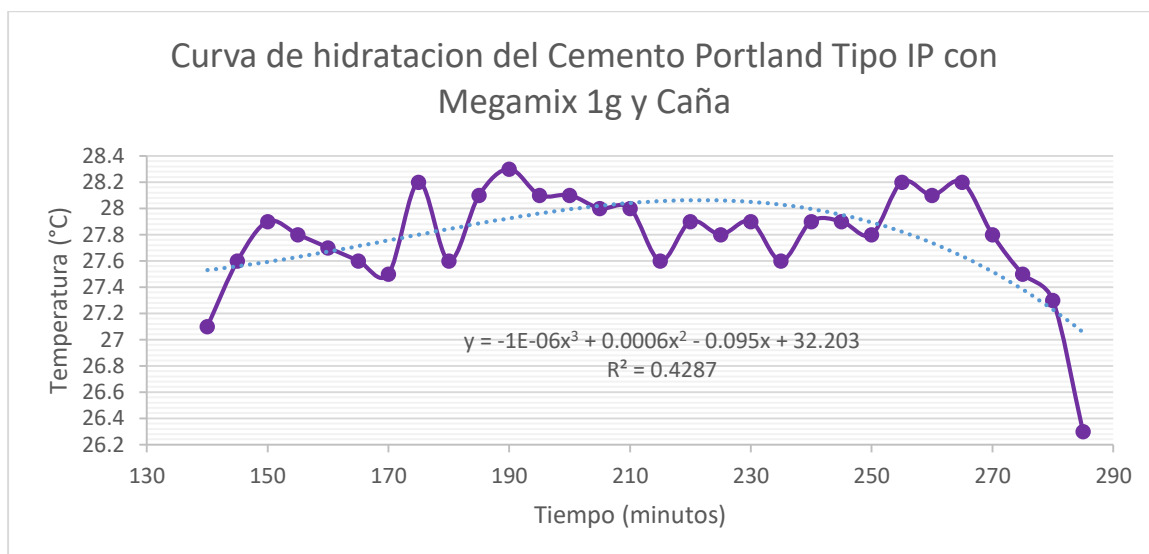


**Figura 41**

*Curva de hidratación del cemento portland tipo IP con megamix 1g y carrizo*

**Figura 42**

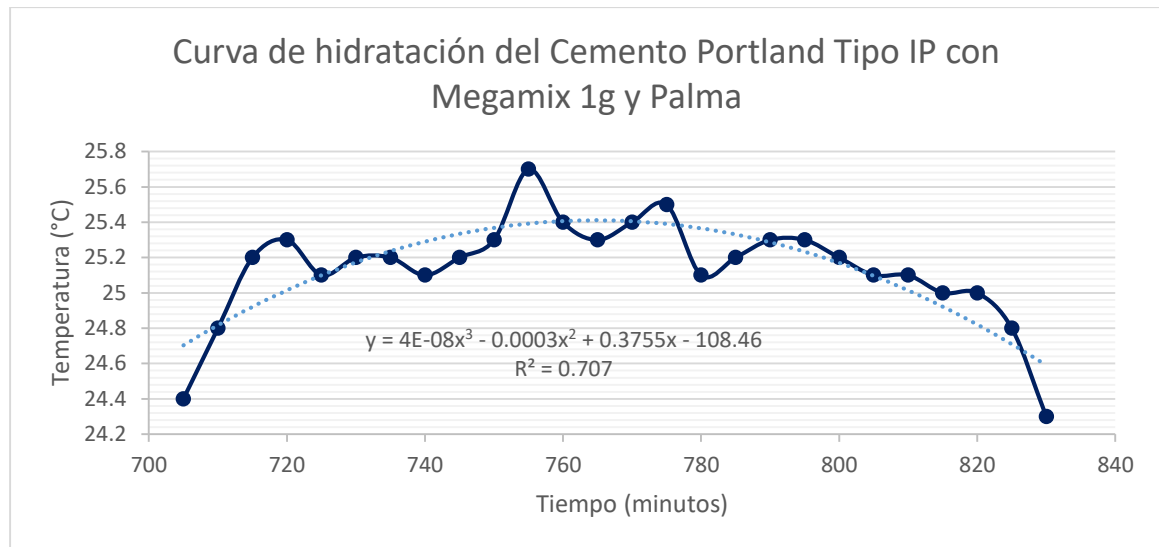
*Curva de hidratación del cemento portland tipo IP con megamix 1g y caña*





**Figura 43**

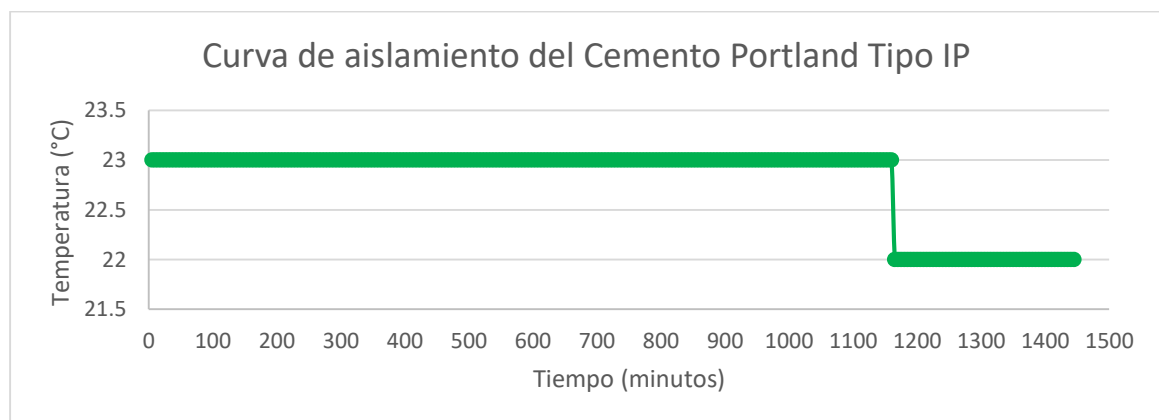
*Curva de hidratación del cemento portland tipo IP con megamix 1g y palma*



### Curvas de temperatura de aislamiento

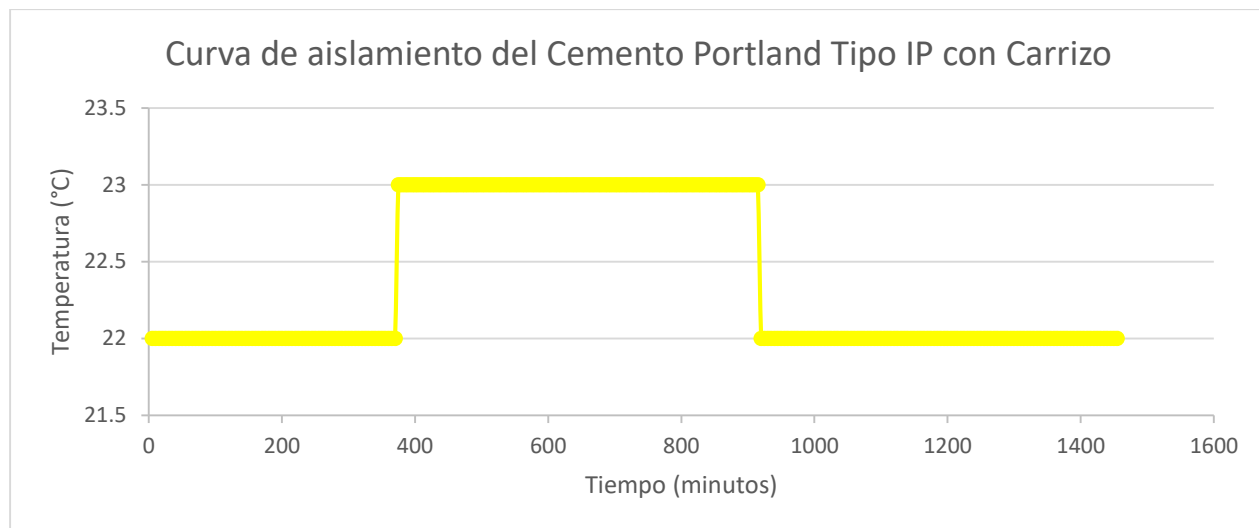
**Figura 44**

*Curva de aislamiento del cemento portland tipo IP*

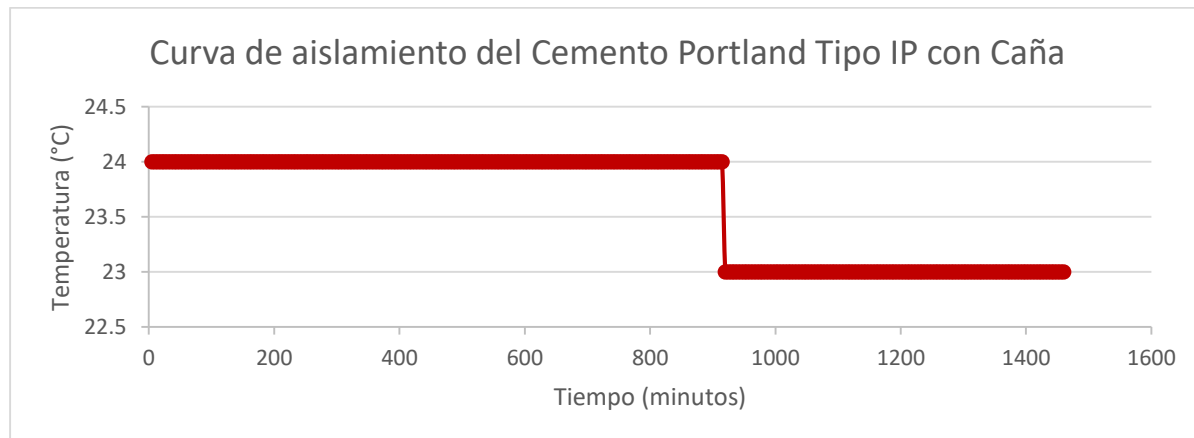


**Figura 45**

*Curva de aislamiento del cemento portland tipo IP con carrizo*

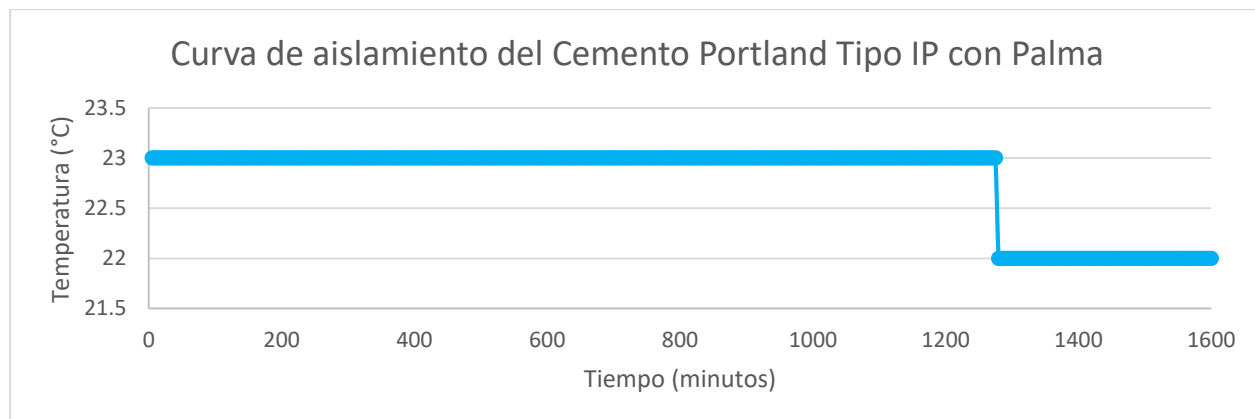
**Figura 46**

*Curva de aislamiento del cemento portland tipo IP con caña*

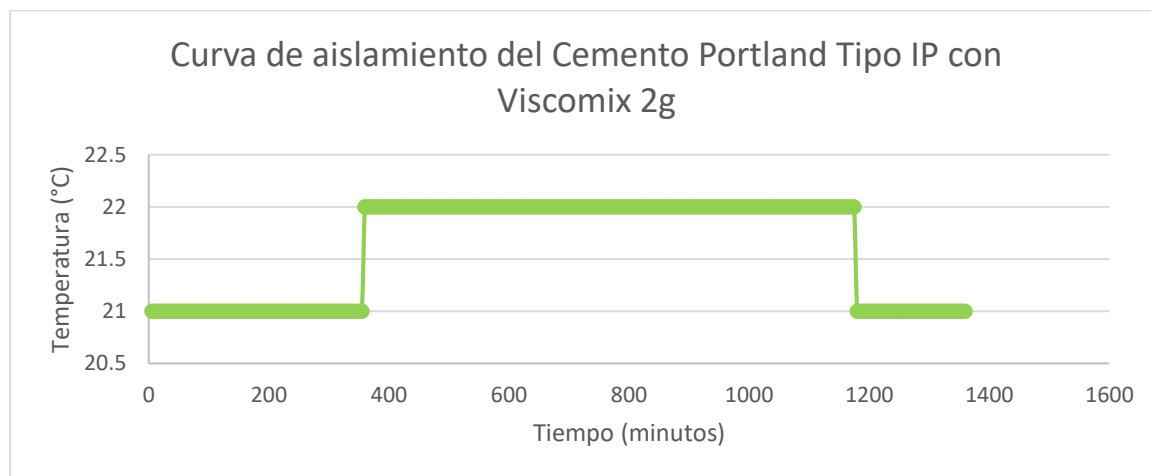


**Figura 47**

*Curva de aislamiento del cemento portland tipo IP con palma*

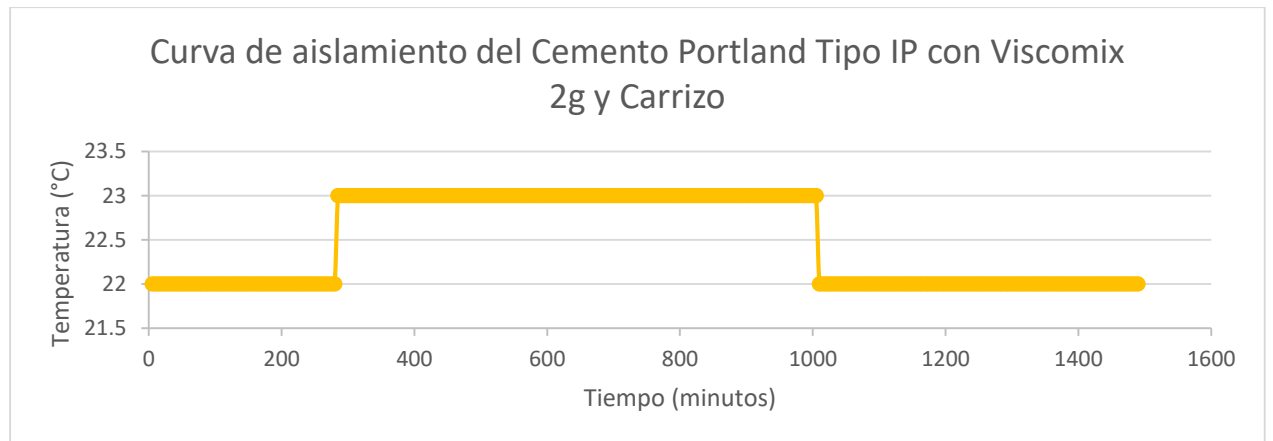
**Figura 48**

*Curva de aislamiento del cemento portland tipo IP con viscomix 2g*

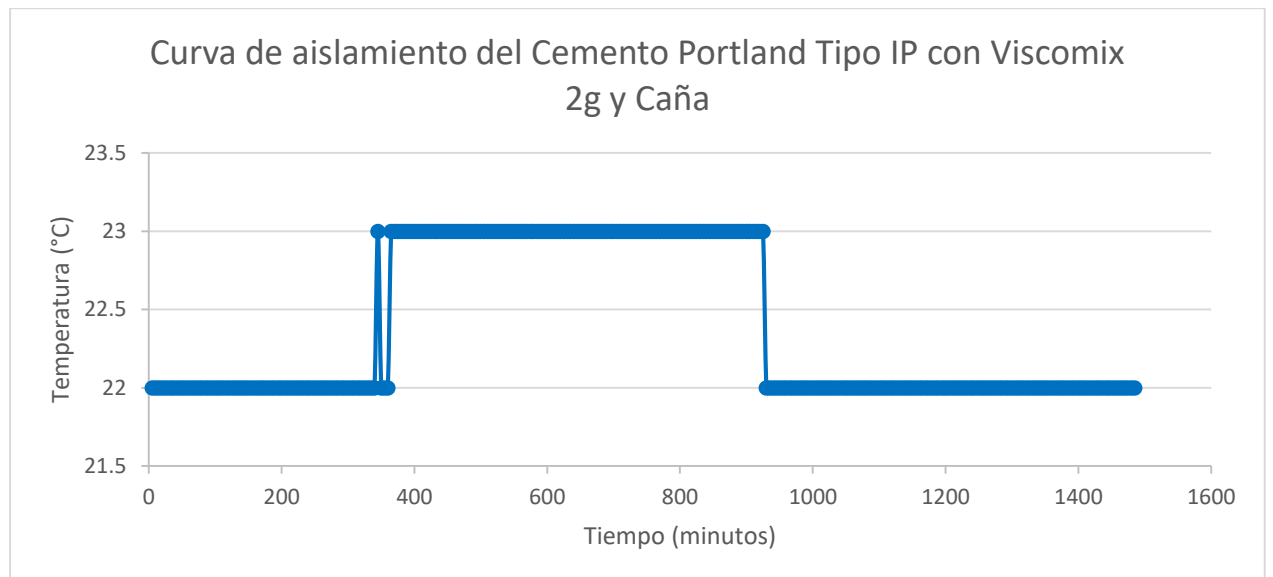


**Figura 49**

*Curva de aislamiento del cemento portland tipo IP con viscomix 2g y carrizo*

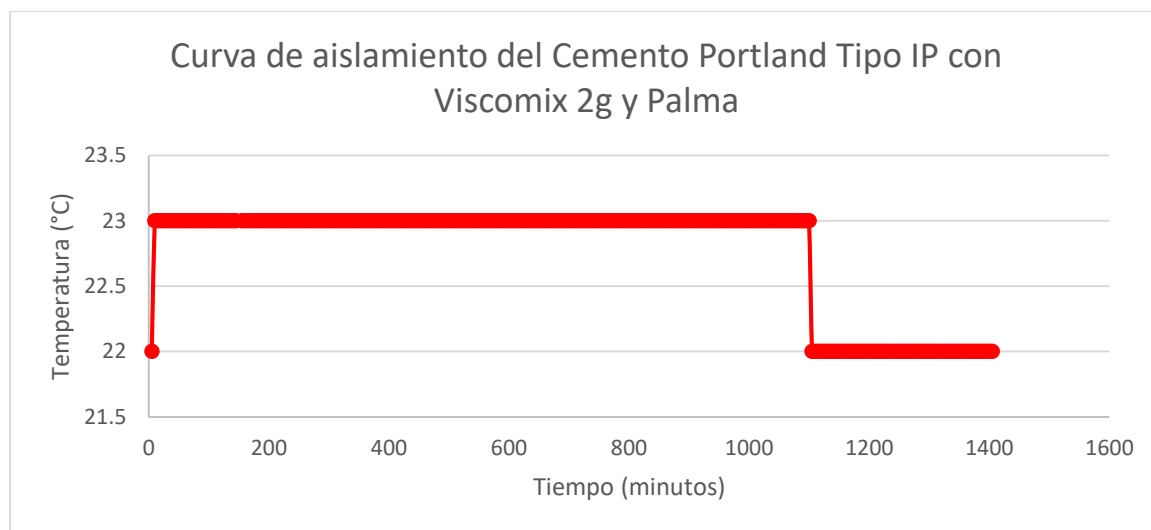
**Figura 50**

*Curva de aislamiento del cemento portland tipo IP con viscomix 2g y caña*

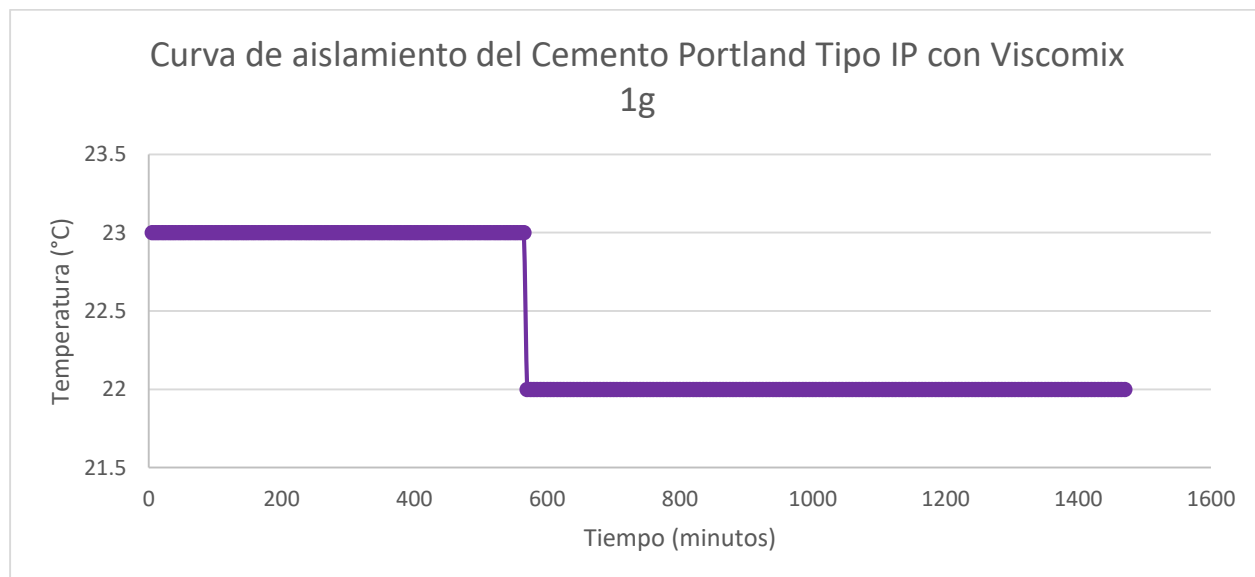


**Figura 51**

*Curva de aislamiento del cemento portland tipo IP con viscomix 2g y palma*

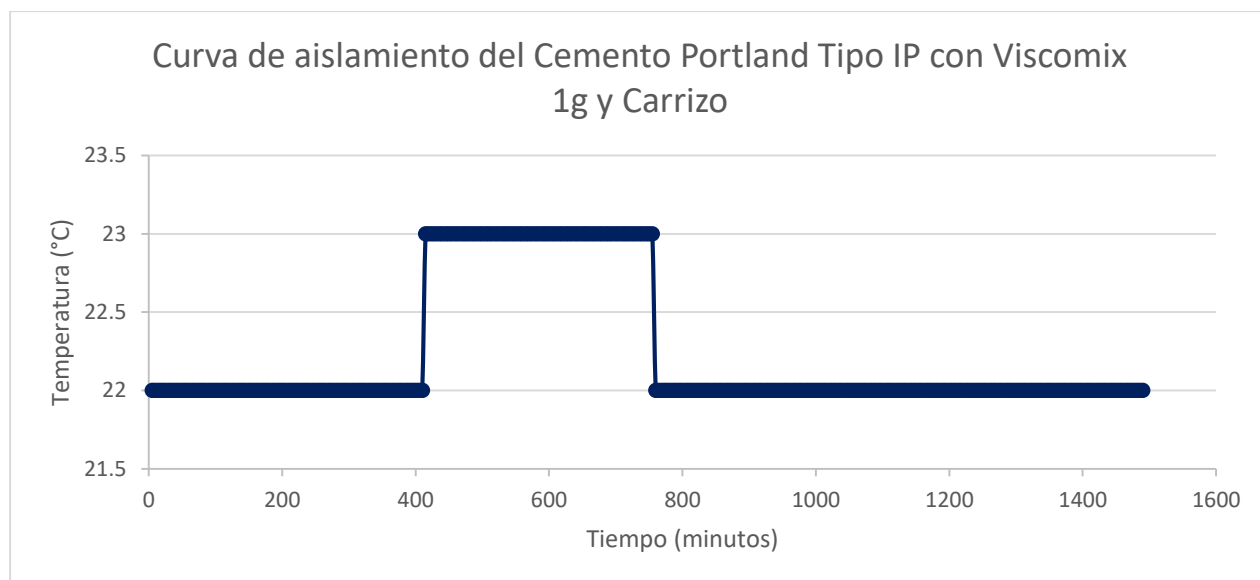
**Figura 52**

*Curva de aislamiento del cemento portland tipo IP con viscomix 1g*

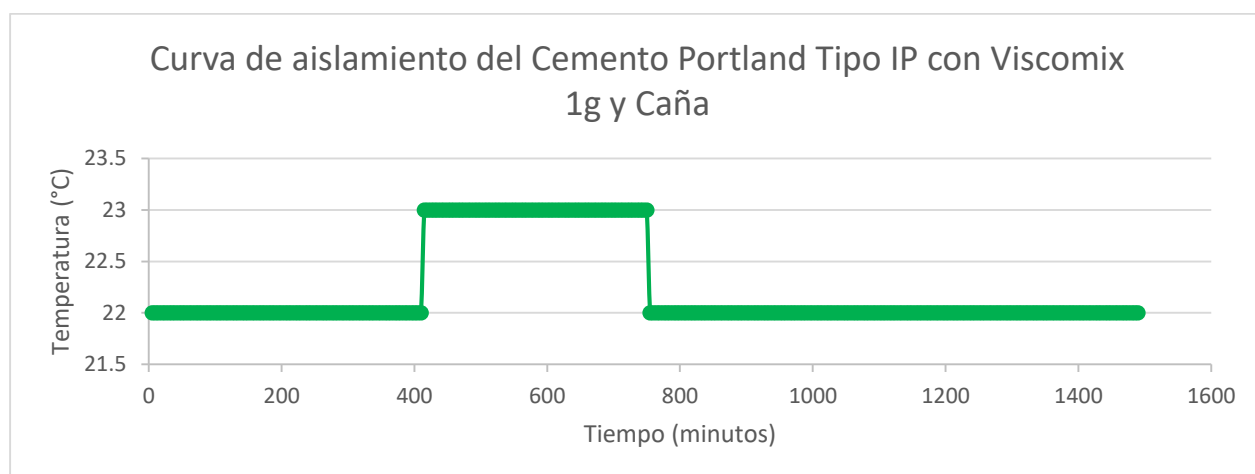


**Figura 53**

*Curva de aislamiento del cemento portland tipo IP con viscomix 1g y carrizo*

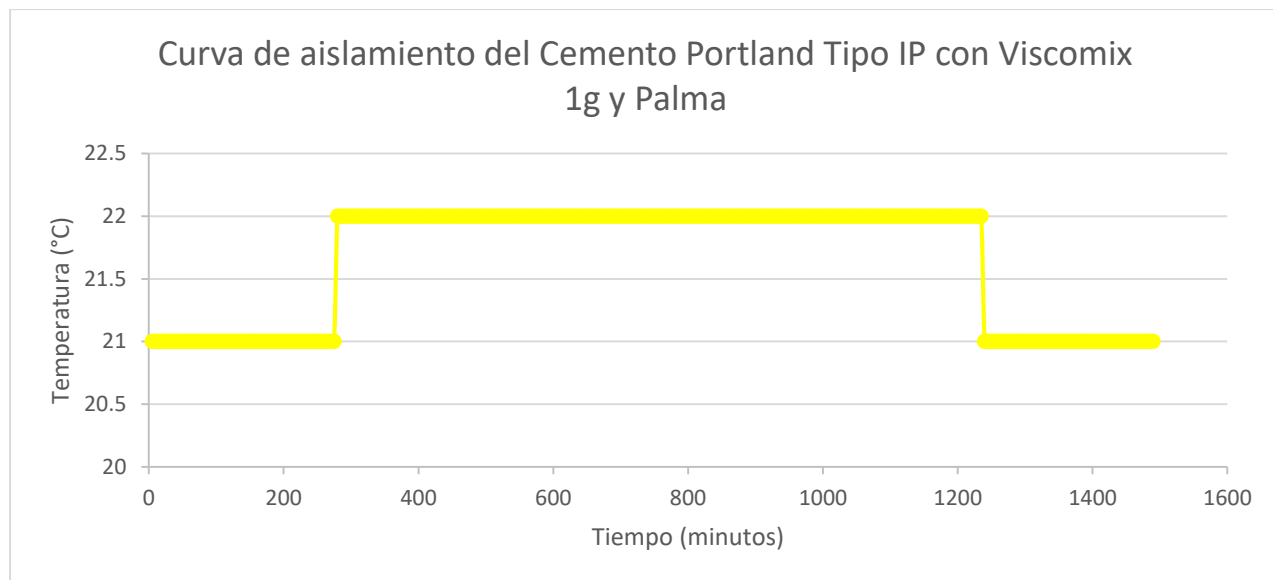
**Figura 54**

*Curva de aislamiento del cemento portland tipo IP con viscomix 1g y caña*

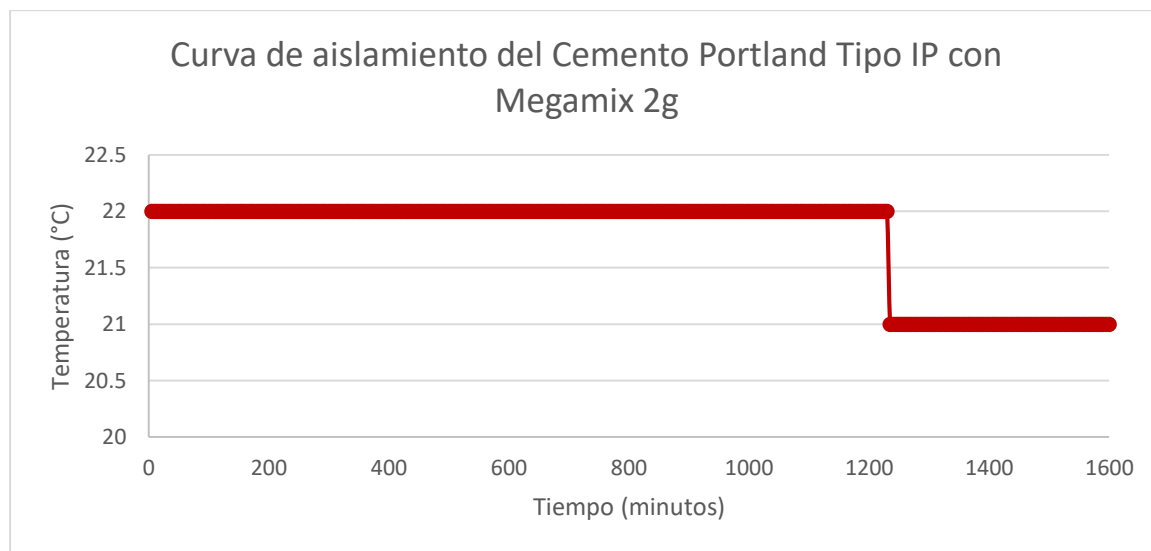


**Figura 55**

*Curva de aislamiento del cemento portland tipo IP con viscomix 1g y palma*

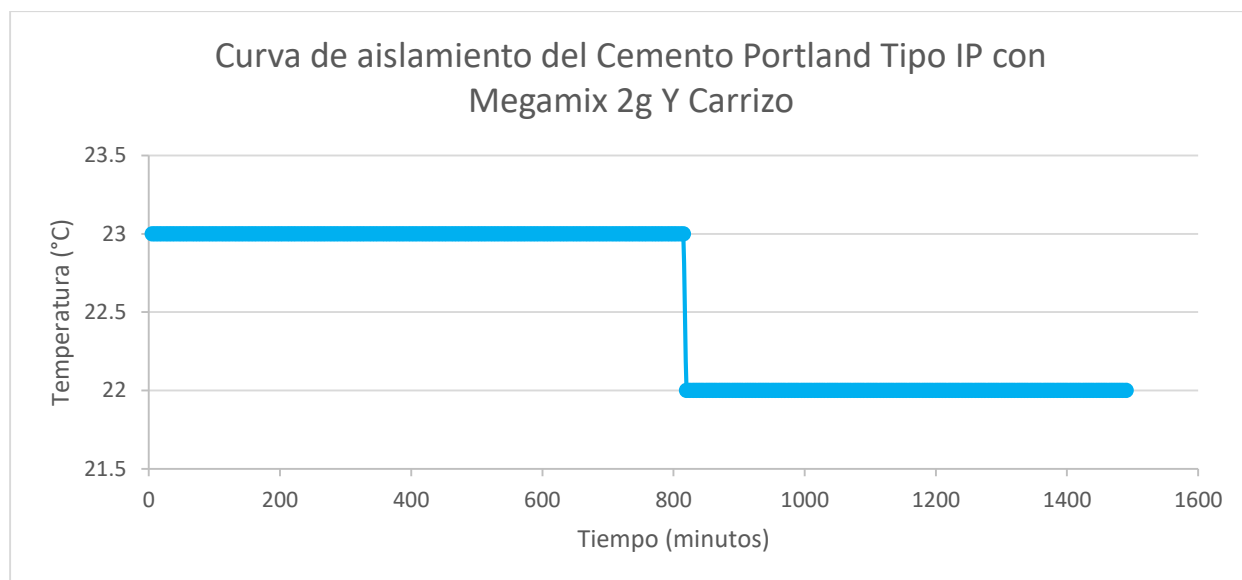
**Figura 56**

*Curva de aislamiento del cemento portland tipo IP con megamix 2g*

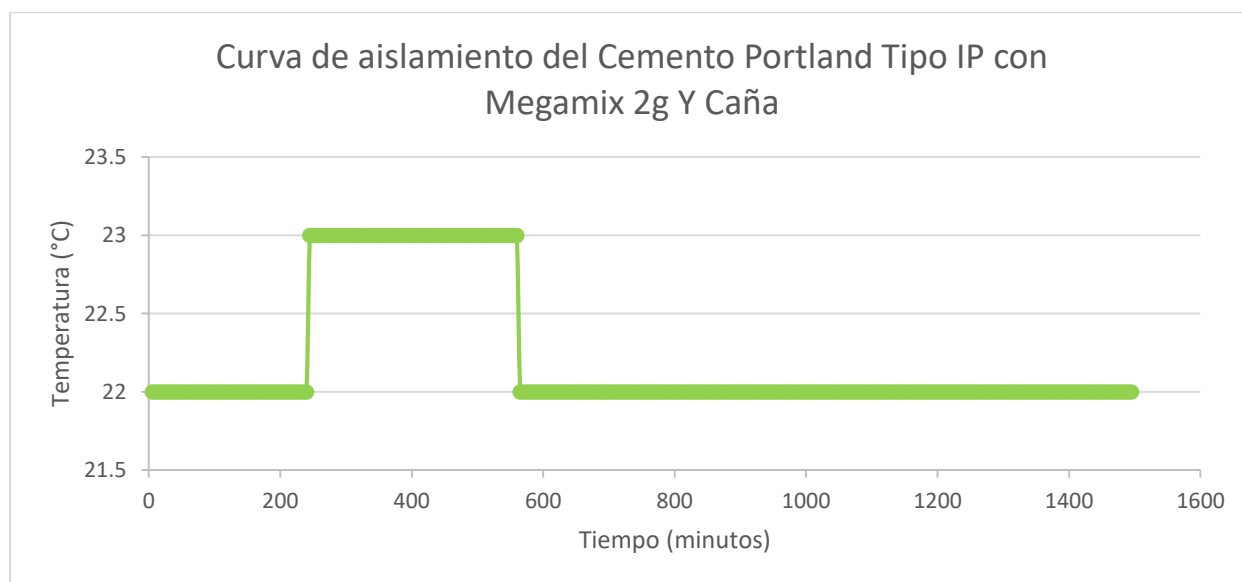


**Figura 57**

*Curva de aislamiento del cemento portland tipo IP con megamix 2g y carrizo*

**Figura 58**

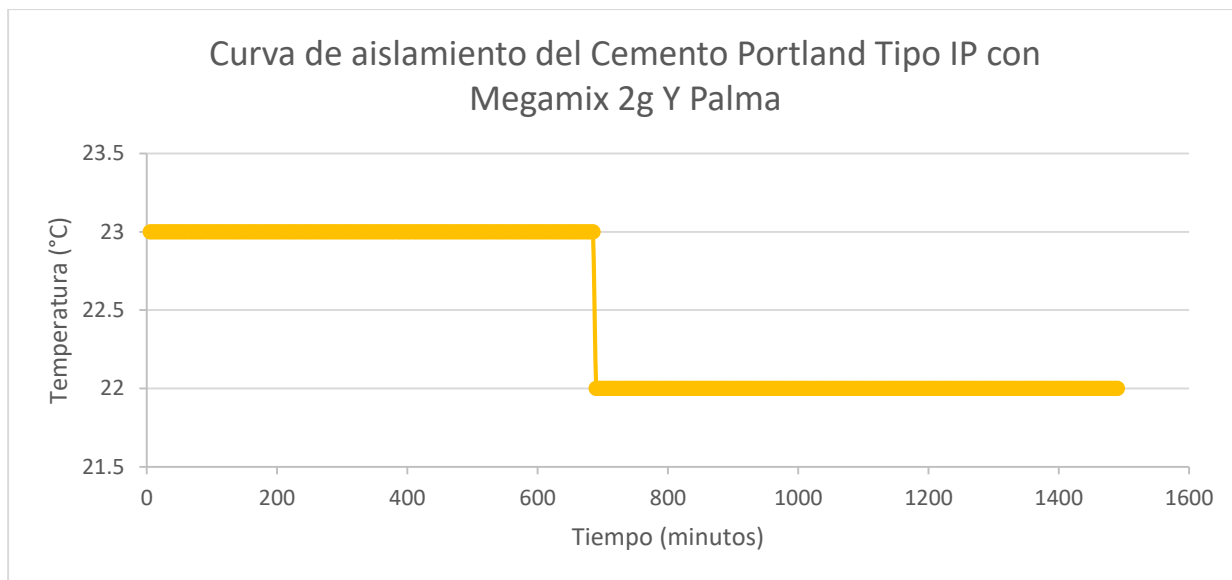
*Curva de aislamiento del cemento portland tipo IP con megamix 2g y caña*



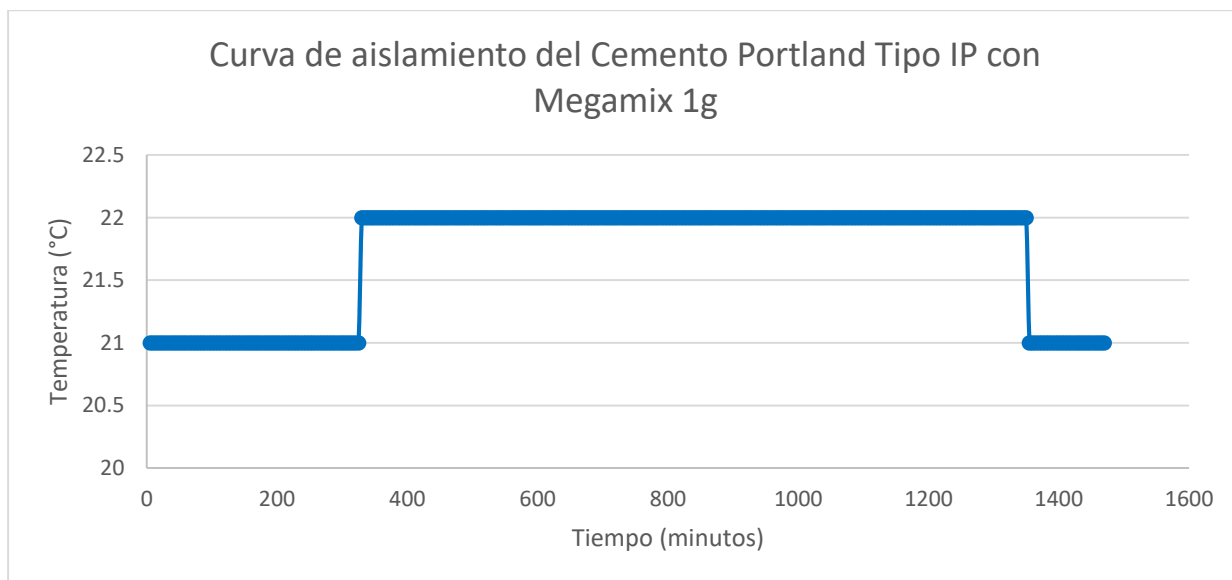


**Figura 59**

*Curva de aislamiento del cemento portland tipo IP con megamix 2g y palma*

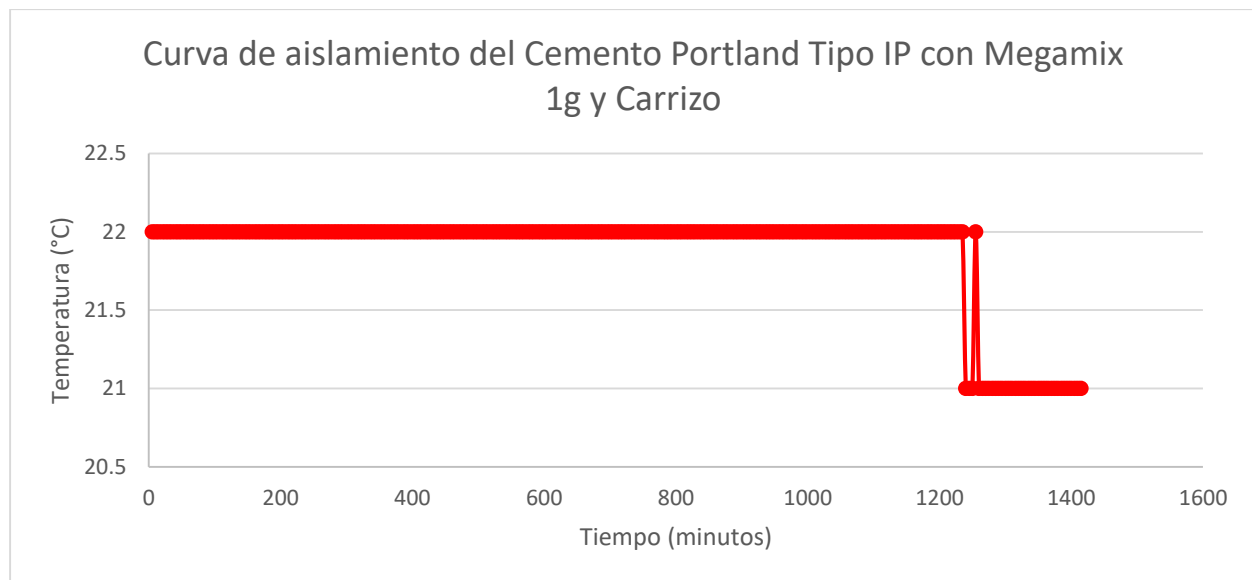
**Figura 60**

*Curva de aislamiento del cemento portland tipo IP con megamix 1g*

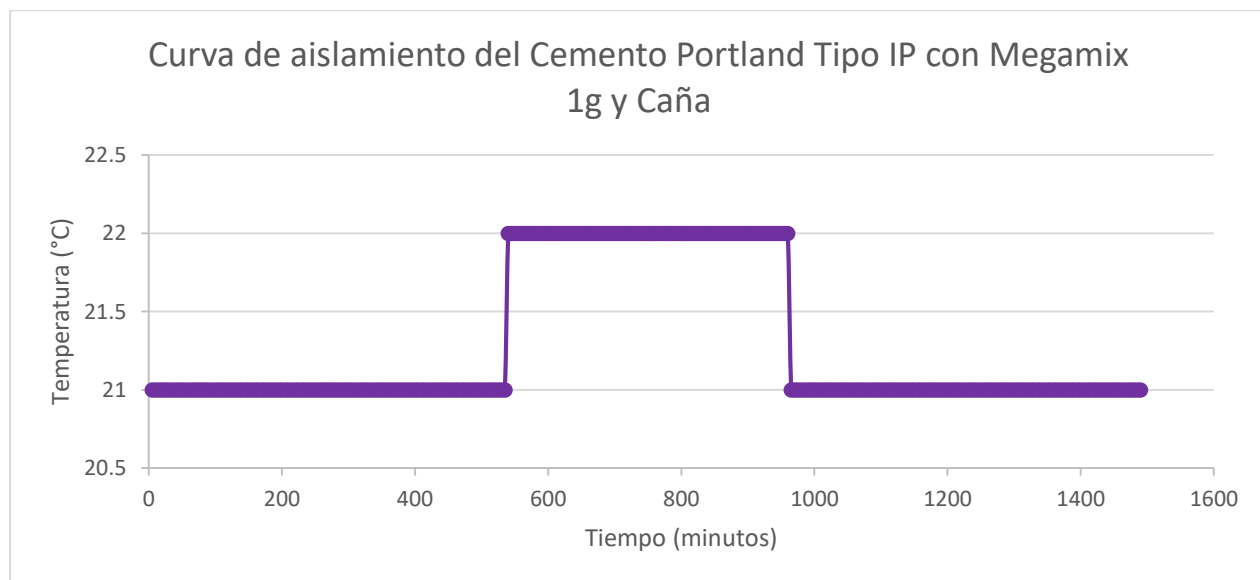


**Figura 61**

*Curva de aislamiento del cemento portland tipo IP con megamix 1g y carrizo*

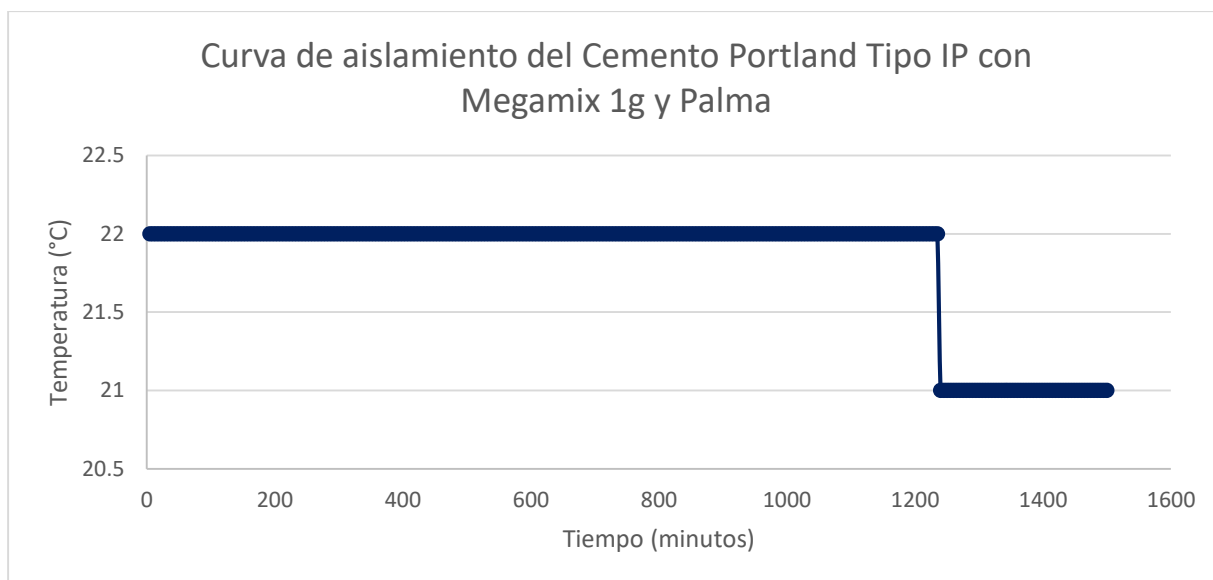
**Figura 62**

*Curva de aislamiento del cemento portland tipo IP con megamix 1g y caña*



### Figura 63

Curva de aislamiento del cemento portland tipo IP con megamix 1g y palma



### Análisis de resultados

Para el análisis de resultados se toman los datos correspondientes de temperatura y tiempo a la tercera y cuarta fase de la formación de la pasta de cemento de cada una de las mezclas realizadas con los aditivos superplastificantes y las diferentes biomasa.

En cada grafica se visualiza la temperatura máxima que alcanza la mezcla y a que tiempo ocurre la misma.

La unidad de temperatura es de grados Celsius, mientras que la unidad de tiempo es en minutos.

Cada una de las mezclas tiene un comportamiento diferente debido a que se varia el porcentaje en peso de los aditivos superplastificantes y su combinación con cada una de las biomasa.

En la **Figura 24** de la curva de temperatura del cemento portland puzolanico tipo IP se observa que la temperatura máxima es de 26.8 °C en un transcurso de 770 minutos

(12.8 horas), su hidratación llega a su punto máximo formando mono sulfatos y silicatos indispensables para el comienzo de la solidificación.

Por la presencia de puzolana se observa varios picos, los que representan las reacciones que existen al formarse los hidratos, al igual que el hidróxido de calcio, representándose de forma física en el cambio de estado plástico a rígido.

Para la **Figura 25** se mezcla el cemento Portland puzolanico tipo IP con hojas secas y fragmentadas en pedazos pequeños de carrizo, su temperatura alcanza los 23.6 °C en un tiempo de 205 minutos (3.4 horas), por lo tanto, el cambio de estados en el cemento ocurre rápidamente debido a que el carrizo absorbe el líquido de la mezcla.

Igualmente ocurre en la **Figura 26** con la mezcla de bagazo de caña previamente secado, el incremento máximo de temperatura es de 26.9 °C a 150 minutos (2.5 horas) de comenzada la prueba; la solidificación del cemento comienza en un transcurso corto de tiempo, porque la biomasa seca toma el agua de la mezcla y acelera la formación de sulfatos y silicatos.

Se muestra en la **Figura 27** la mezcla hojas secas de palma africana y alcanza una temperatura de 23.8 °C en un tiempo de 1045 minutos (17.4 horas), diferenciándose de las anteriores biomásas ya que la formación de hidratos comienza varias horas después de ingresada la mezcla al calorímetro.

A partir de la **Figura 28** se utiliza los aditivos superplastificantes, comenzando con Viscomix en una proporción de 2 gramos, la misma llega a una temperatura de 22.5 °C a 985 minutos (16.4 horas) formando una curva segregada a la izquierda con variaciones considerables de temperatura.

En la **Figura 29** se adiciona carrizo al aditivo Viscomix de 2gramos, su temperatura máxima es de 24 °C y su tiempo es de 860 minutos (14.3 horas).

Se adiciona bagazo de caña (**Figura 30**) el cual aumenta la temperatura en 26.5 °C y reduce el tiempo de solidificación a 125 minutos (2.1 horas). La biomasa acelera la

hidratación del cemento, dando a la curva una forma casi lineal con el pico de temperatura máxima al comienzo de la misma.

Para la **Figura 31** se agrega la palma africana y su temperatura máxima es de 24.3 °C a 720 minutos (12 horas).

Comparando con la mezcla inicial de Viscomix 2g, las diferentes biomásas aceleran el tiempo de hidratación de la mezcla, siendo el bagazo de caña el más rápido en llevar a la mezcla a su proceso de hidratación.

Se disminuye la concentración de Viscomix a 1 gramo comenzando en la **Figura 32** y su temperatura llega 23.9 °C en un tiempo de 890 minutos (14.8 horas), representando una curva casi simétrica.

En la **Figura 33** se combina las hojas de carrizo y su temperatura alcanza 22.9 °C en 730 minutos (12.2 horas), con varios picos irregulares al final de la hidratación, indicando el endurecimiento del cemento.

Se añadió bagazo de caña (**Figura 34**) y la temperatura es de 23 °C en un tiempo de 745 minutos (12.4 horas)

En la **Figura 35** se adiciona las hojas de palma africana y su temperatura máxima es de 22.5 °C a 845 minutos (14.1 horas)

Se distingue la disminución en la temperatura máxima al añadir las diferentes biomásas en la mezcla de cemento con Viscomix de 1 gramo, así mismo la reducción del tiempo en el que se llega a la hidratación, siendo la palma africana la que absorbe más rápido el agua de la combinación.

Para la **Figura 36** se inicia con el uso del aditivo Megamix de concentración de 2 gramos llegando hasta la temperatura de 25.8 °C a 940 minutos (15.7 horas)

Con la combinación de carrizo (**Figura 37**) y su temperatura máxima es de 23.7 °C en un tiempo de 625 minutos (10.4 horas)

Por otra parte, en la **Figura 38** se adiciona bagazo de caña y la temperatura disminuye a 23.5 °C a 200 minutos (3.3 horas).

En la **Figura 39** con palma africana sube la temperatura a 24.6 °C y su tiempo es de 225 minutos (3.8 horas)

Comparando las cuatro graficas anteriores, el tiempo descendió drásticamente utilizando bagazo de caña y hojas de palma africana, mientras que la temperatura bajo hasta más de 2 grados.

Para finalizar todas las combinaciones en la **Figura 40** se baja la concentración de Megamix a 1 gramo, su temperatura es de 27.2 °C y su tiempo es de 780 minutos (13 horas).

Se agrega hojas de carrizo (**Figura 41**), marcando la temperatura en 24.3 °C a 725 minutos (12.1 horas)

Juntando bagazo de caña (**Figura 42**) se alcanza 28.3 °C a un tiempo de 190 minutos (3.2 horas)

Posteriormente, en la **Figura 43** se agrega hojas de palma africana la temperatura máxima es de 25.7 °C a 755 minutos (12.6 horas).

Para las diversas mixturas de biomazas con el aditivo Megamix de 1 gramo se determinó que la mezcla con el bagazo de caña bajo su tiempo de hidratación hasta en 10 horas, mientras que su temperatura máxima se elevó significativamente.

### **Análisis de curvas de aislamiento**

Mediante el sensor DHT11 se midió la temperatura entre el segundo y tercer recipiente para determinar si existe transferencia de calor entre el exterior del calorímetro y la mezcla de cemento portland puzolanico tipo IP que se encuentra en su interior.

Las gráficas expresadas (de Figura 44 a Figura 63) para cada una de las combinaciones realizadas demuestran un comportamiento casi lineal de la temperatura

con respecto al tiempo transcurrido, concluyendo que el sistema posee un comportamiento adiabático, existiendo un cambio máximo de 1°C en cada una de las gráficas, que se debe al cambio de temperatura en la habitación en la que encuentra ubicado el calorímetro, tal como se basa en la norma NTE INEN 199, la misma puede variar en 23,0 °C ± 2, 0. Por ende, se determina que el sistema del calorímetro es cuasi adiabático. (Insituto Ecuatoriano de Normalización, 2009)

### **Índice de compatibilidad**

Para determinar la compatibilidad que existe entre las diferentes biomásas combinadas con los aditivos superplastificantes de la marca SETMIX, se utilizan varios índices para uniformizar los resultados, entre los cuales se requiere la temperatura máxima alcanzada por la mezcla, el tiempo en el que ocurre la misma, además de la pendiente máxima de la curva temperatura vs tiempo. Se puede descomponer cada índice por separado.

El índice de compatibilidad y sus parámetros se han utilizado a lo largo de los años para evaluar diversas mezclas que combinadas con el cemento se verifique cual es la más apto para su utilización, desde la combinación con madera (Weatherwax & Tarkow, 1964), (Hofstrand, Moslemi, & Garcia, 1984), aserrín de madera (Beraldo & Balzamo, 2009), residuos de caña de azúcar (Anjos, y otros, 2013), cenizas de biomasa (Kaminskas, 2014) y bambú (Cechin, Matoski, & Lima, 2018).

La fórmula final requiere de varios datos, tales como temperatura, tiempo y la pendiente de la gráfica obtenida por los primeros datos, los mismos que se han recolectado en el presente estudio.

#### *Índice de compatibilidad*

$$I = \left[ \left( \frac{t_m - t_c}{t_c} \right) * \left( \frac{T_c - T_m}{T_c} \right) * \left( \frac{P_c - P_m}{P_c} \right) \right] * 100 \quad (1)$$

Descomponiendo la ecuación, se separan tres índices los cuales se pueden analizar por separado, dependiendo el requerimiento del investigador, en nuestro caso se utilizan todos los datos solicitados.

*Índice de tiempo*

$$I_t = \left( \frac{t_m - t_c}{t_c} \right) \quad (2)$$

*Índice de temperatura*

$$I_T = \left( \frac{T_c - T_m}{T_c} \right) \quad (3)$$

*Índice de pendiente*

$$I_p = \left( \frac{P_c - P_m}{P_c} \right) \quad (4)$$

Donde:

$t_m$  = Tiempo para alcanzar la temperatura máxima (cemento-biomasa-aditivo-agua).

$t_c$  = Tiempo para alcanzar la temperatura máxima (pasta).

$T_m$  = Temperatura máxima de hidratación (cemento-biomasa-aditivo-agua).

$T_c$  = Temperatura máxima de hidratación (pasta).

$P_m$  = Pendiente máxima de variación de temperatura en el tiempo (cemento-biomasa-aditivo-agua).

$P_c$  = tasa máxima de cambio de temperatura en el tiempo (pasta).

Se clasifican la compatibilidad de cada mezcla con respecto al índice obtenido.



**Tabla 3***Índice de compatibilidad*

Índice de compatibilidad (%)		Clasificación
$I > -10$	$I < 10$	Compatibilidad extrema
$-10 < I < -50$	$10 > I < 50$	Compatibilidad alta
$-50 < I < -100$	$50 > I < 100$	Compatibilidad moderada
$I < -100$	$I > 100$	Compatibilidad baja

**Resultados agrupados por aditivos**

Los valores obtenidos por cada uno de los índices son tabulados y separados por el aditivo utilizado para su posterior análisis.

***Índice de tiempo****Ejemplo de calculo*

Para los siguientes ejemplos de cálculo se utiliza los datos obtenidos del cemento Portland Puzolanico tipo IP y la mezcla de cemento con la biomasa de carrizo, los cuales se sustituyen en la ecuación (2).

	$I_t = \left( \frac{205 - 770}{770} \right) = -0.7338$	(5)
--	--	-----

**Tabla 4***Resultados de índice de tiempo*

Combinaciones	Tiempo máximo (minutos)	Índice de tiempo
Cemento Portland Puzolánico tipo IP	770	-----
Carrizo	205	-0.7338
Caña	150	-0.8052

Combinaciones	Tiempo máximo (minutos)	Índice de tiempo
Palma	1045	0.35714
Viscomix 2g	985	0.27922
Viscomix 2g + Carrizo	860	0.11688
Viscomix 2g + Caña	125	-0.8377
Viscomix 2g + Palma	720	-0.0649
Viscomix 1g	890	0.15584
Viscomix 1g + Carrizo	730	-0.0519
Viscomix 1g + Caña	745	-0.0325
Viscomix 1g + Palma	155	0.0974
Megamix 2g	940	0.22078
Megamix 2g + Carrizo	625	-0.1883
Megamix 2g + Caña	200	-0.7403
Megamix 2g + Palma	225	-0.7078
Megamix 1g	780	0.01299
Megamix 1g + Carrizo	725	-0.0584
Megamix 1g + Caña	190	-0.7532
Megamix 1g + Palma	755	-0.0195

Los valores de índice de tiempo se visualizan en una gráfica de barras (

**Figura 64**), para ver de mejor manera cuales son los valores mínimos y máximos.

**Figura 64**

*Índice de tiempo para mezclas con aditivo viscomix*

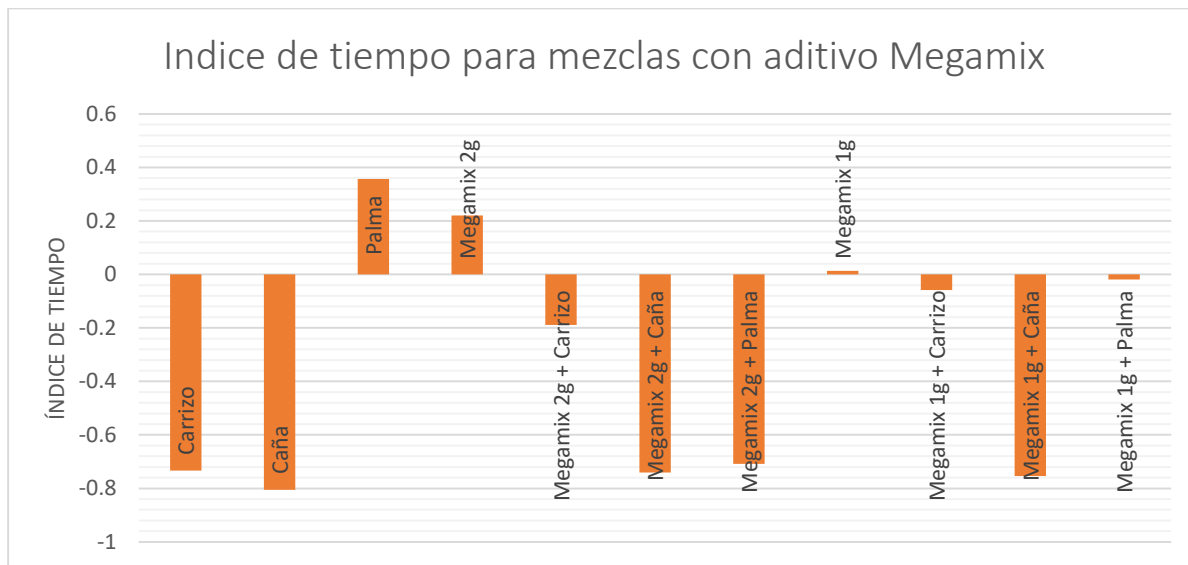


En la gráfica se visualiza que la mayoría de mezclas poseen un índice de tiempo negativo, lo quiere decir que su tiempo de máximo de hidratación es menor al tiempo de hidratación del cemento Portland puzolanico tipo IP sin ningún tipo de biomasa y/o aditivo.

Además, la mezcla de Viscomix 1g + Caña es la que posee el menor índice de temperatura y la mezcla de Viscomix 2g + Caña es la que más se aleja.

**Figura 65**

*Índice de tiempo para mezclas con aditivo megamix*



Con respecto a las mezclas con el aditivo Megamix (

**Figura 65)** la que posee un menor índice de tiempo es la mezcla de Megamix 1g + palma y las que más se alejan son las dos variaciones de Megamix con la biomasa de bagazo de caña, siendo la mezcla de cemento + caña la que posee el índice más alto de tiempo.

### ***Índice de temperatura***

*Ejemplo de calculo*

Los datos obtenidos del cemento Portland Puzolanico tipo IP y la mezcla de cemento con la biomasa de carrizo, se sustituyen en la ecuación (3).

$$I_T = \left( \frac{26.8 - 23.6}{23.6} \right) = 0.1194 \quad (6)$$

**Tabla 5**

*Resultados de índice de temperatura*

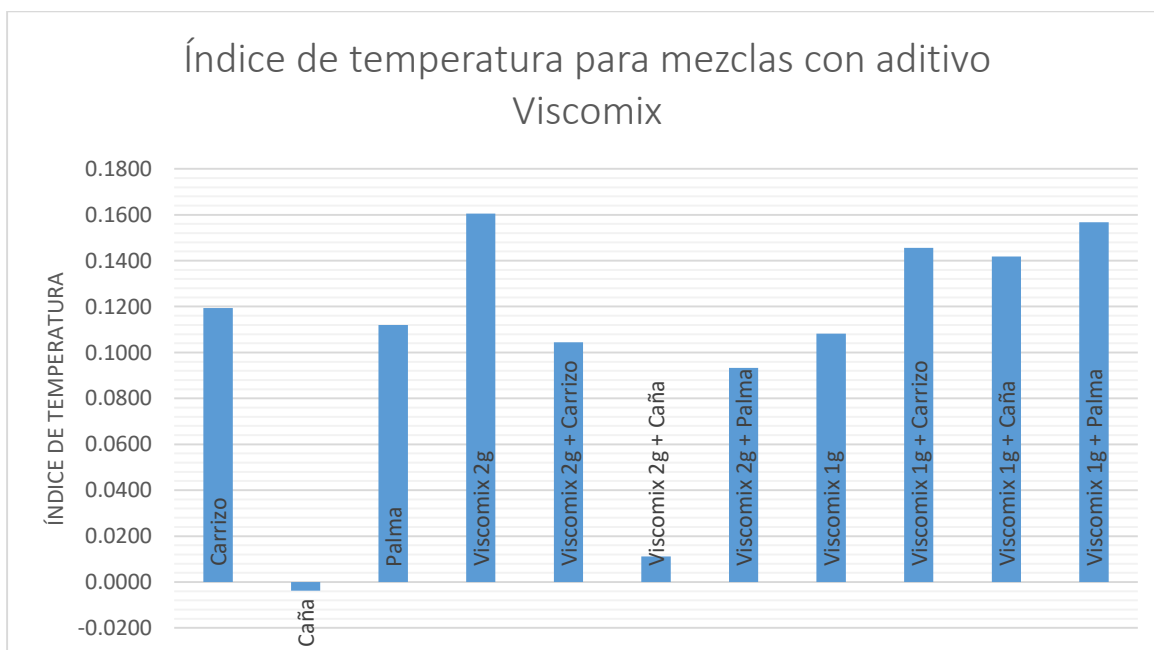
Combinaciones	Temperatura máxima (°C)	Índice de temperatura
Cemento Portland puzolánico tipo IP	26.8	-----
Carrizo	23.6	0.1194
Caña	26.9	-0.0037
Palma	23.8	0.1119
Viscomix 2g	22.5	0.1604
Viscomix 2g + Carrizo	24	0.1045
Viscomix 2g + Caña	26.5	0.0112
Viscomix 2g + Palma	24.3	0.0933
Viscomix 1g	23.9	0.1082
Viscomix 1g + Carrizo	22.9	0.1455
Viscomix 1g + Caña	23	0.1418
Viscomix 1g + Palma	22.6	0.1567
Megamix 2g	25.8	0.0373

Combinaciones	Temperatura máxima (°C)	Índice de temperatura
Megamix 2g + Carrizo	23.7	0.1157
Megamix 2g + Caña	23.5	0.1231
Megamix 2g + Palma	24.6	0.0821
Megamix 1g	27.2	-0.0149
Megamix 1g + Carrizo	24.3	0.0933
Megamix 1g + Caña	28.3	-0.0560
Megamix 1g + Palma	25.7	0.0410

Los valores de índice de temperatura se representan en una gráfica de barras.

**Figura 66**

*Índice de temperatura para mezclas con aditivo viscomix*

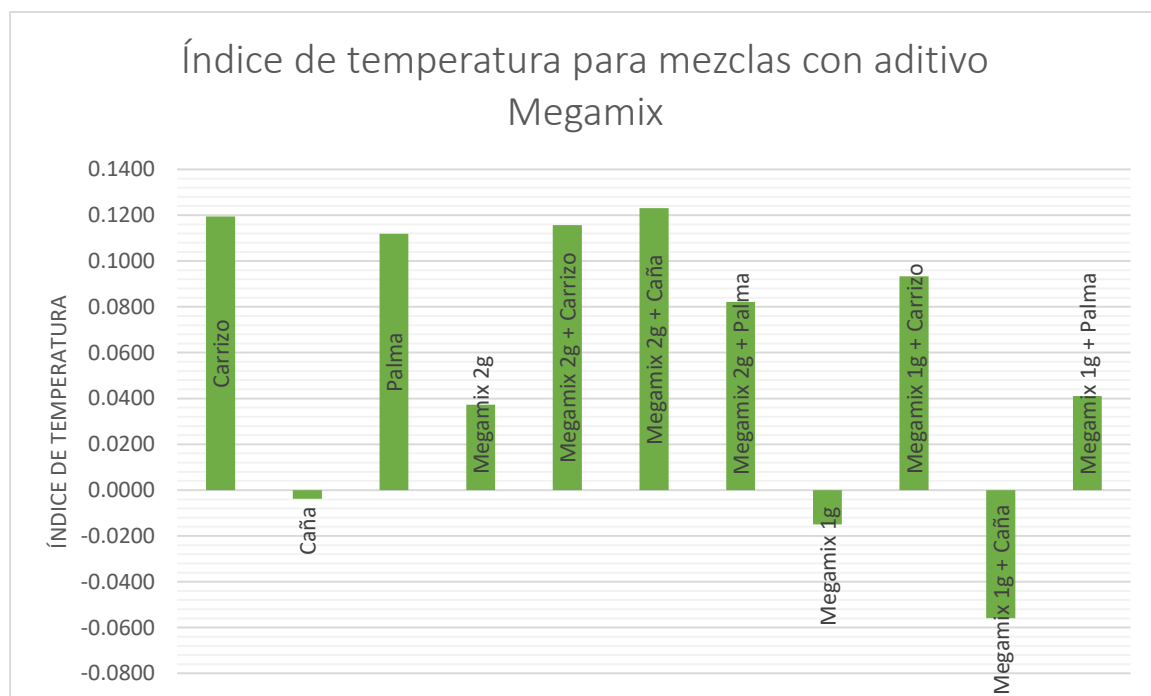


En relación a la temperatura máxima de hidratación observamos que la mezcla con bagazo de caña sin aditivos y la mezcla de Viscomix 2g + Caña son las que más se

acercan a la temperatura alcanzada por el cemento portland puzolánico tipo IP, mientras que la mezcla con Viscomix 2g sin biomasa incluida posee el mayor índice de temperatura.

**Figura 67**

*Índice de temperatura para mezclas con aditivo megamix*



Al graficar los resultados con el aditivo Megamix (

**Figura 67)**, se visualiza que las mezclas con Megamix 1g y Megamix 2g son las que poseen un menor índice temperatura y las mezclas con bagazo de caña (Megamix 1g + caña y Megamix 2g + caña) se encuentran en los opuestos del grafica con los valores más altos de índice de temperatura.

### ***Índice de pendiente***

#### *Ejemplo de calculo*

Para hallar la pendiente de cada curva se utiliza la ecuación de tendencia polinómica de tercer grado de cada grafica obtenida (tiempo vs temperatura).

Calculando la primera derivada de las ecuaciones y analizándolas en función del tiempo en el cual se alcanzó la temperatura máxima, da como resultado la pendiente.

El ejemplo de cálculo es con la ecuación del cemento portland puzolanico tipo IP.

$$y = 1E^{-8}x^3 - 9E^{-5}x^2 + 0.1087x - 12.078 \quad (7)$$

Calcula la primera derivada

$$y' = 3E^{-8}x^2 - 1.8E^{-4}x + 0.1087 \quad (8)$$

Si  $x=770$

$$y' = 3E^{-8}(770)^2 - 1.8E^{-4}(770) + 0.1087 \quad (9)$$

$$y' = -0.0121 \quad (10)$$

Mientras que para el ejemplo de cálculo del índice de pendiente se recurre nuevamente a los datos de la mezcla con hojas de carrizo y se sustituye en la ecuación (4).



$$I_p = \left( \frac{-0.0121 - 0.0277}{-0.0121} \right) = 3.2887 \quad (11)$$

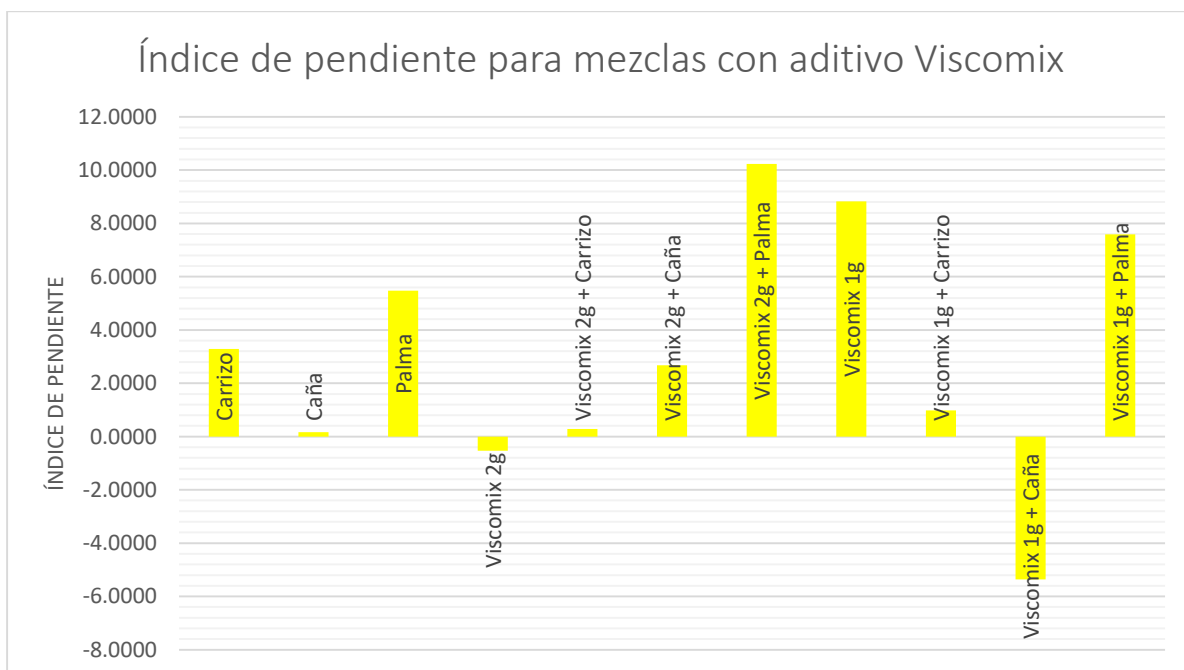
**Tabla 6***Resultados de índice de pendiente*

<b>Combinaciones</b>	<b>Pendiente</b>	<b>Índice de pendiente</b>
Cemento portland Puzolánico tipo IP	-0.0121	-----
Carrizo	0.0277	3.2887
Caña	-0.0101	0.1662
Palma	0.0543	5.4795
Viscomix 2g	-0.0186	-0.5367
Viscomix 2g + Carrizo	-0.0087	0.2818
Viscomix 2g + Caña	0.0203	2.6718
Viscomix 2g + Palma	0.1118	10.2265
Viscomix 1g	0.0948	8.823
Viscomix 1g + Carrizo	-0.0003	0.979
Viscomix 1g + Caña	-0.077	-5.3593
Viscomix 1g + Palma	0.0798	7.5842
Megamix 2g	-0.0516	-3.2576
Megamix 2g + Carrizo	-0.0387	-2.198
Megamix 2g + Caña	-0.0018	0.8514
Megamix 2g + Palma	0.003	1.2466
Megamix 1g	-0.0089	0.2669
Megamix 1g + Carrizo	0.0164	2.3508

Combinaciones	Pendiente	Índice de pendiente
Megamix 1g + Caña	0.0247	3.0391
Megamix 1g + Palma	-0.0091	0.249

**Figura 68**

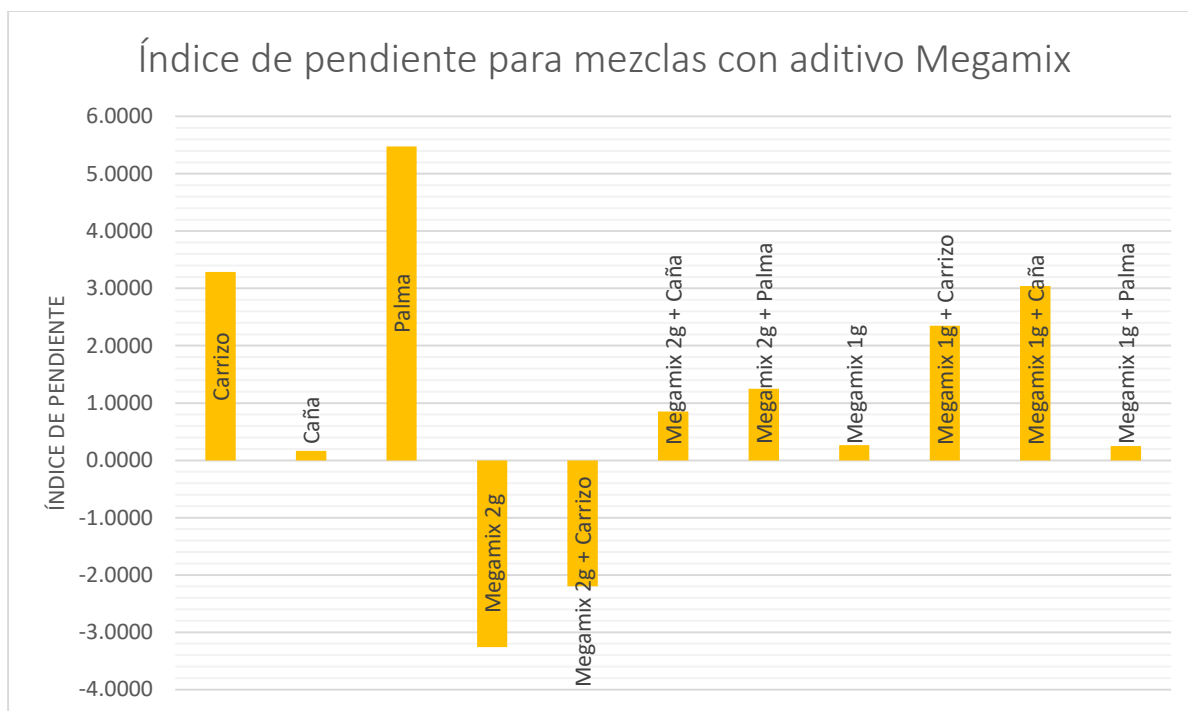
*Índice de pendiente para mezclas con aditivo viscomix*



En la **Figura 68** se observa que la mezcla con bagazo de caña, Viscomix 2g + carrizo y Viscomix 2g son las más compatibles a la pendiente calculada de la curva del cemento Portland puzolánico tipo IP, mientras la mezcla de Viscomix 2g + palma posee el mayor índice de todas las mezclas.

**Figura 69**

*Índice de pendiente para mezclas con aditivo megamix*



Para la **Figura 69** de aditivo Megamix, las mezclas Megamix 1g y Megamix 1g + palma tienen el menor índice de pendiente, mientras que la composición con Megamix 2g y hojas de palma son las que menor semejanza poseen en sus pendientes.

### ***Índice de compatibilidad***

#### *Ejemplo de calculo*

Todos los valores calculados por el índice de tiempo, temperatura y pendiente se sustituyen en la ecuación (1).

$$I = [(-0.7338) * (0.1194) * (3.2887)] * 100 \quad (12)$$

$$I = -28.8132 \quad (13)$$

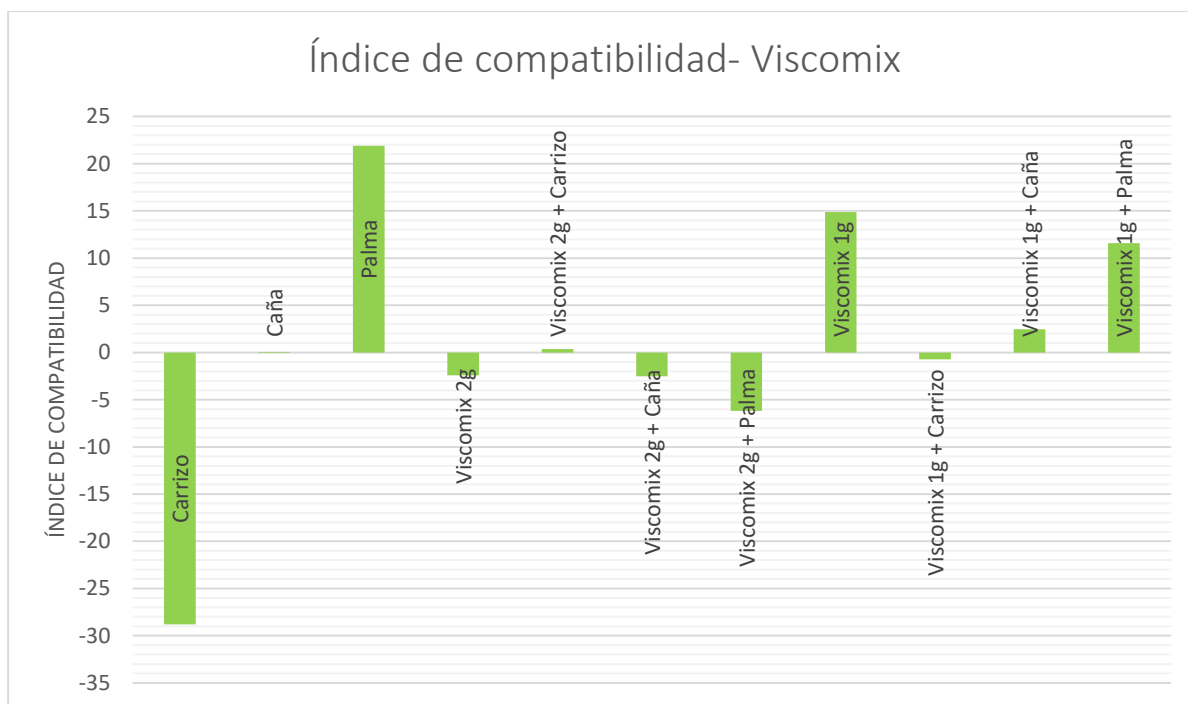
### **Tabla 7**

#### *Resultados de índice de compatibilidad*

Combinaciones	Índice de compatibilidad (%)
Cemento portland Puzolánico tipo IP	-----
Carrizo	-28.8132
Caña	0.0499
Palma	21.9065
Viscomix 2g	-2.4042
Viscomix 2g + Carrizo	0.3441
Viscomix 2g + Caña	-2.5053
Viscomix 2g + Palma	-6.1945
Viscomix 1g	14.8789
Viscomix 1g + Carrizo	-0.7401
Viscomix 1g + Caña	2.4672
Viscomix 1g + Palma	11.577
Megamix 2g	-2.6836
Megamix 2g + Carrizo	4.7878
Megamix 2g + Caña	-7.7606
Megamix 2g + Palma	-7.2432
Megamix 1g	-0.0052
Megamix 1g + Carrizo	-1.2816
Megamix 1g + Caña	12.8128
Megamix 1g + Palma	-0.0199

**Figura 70**

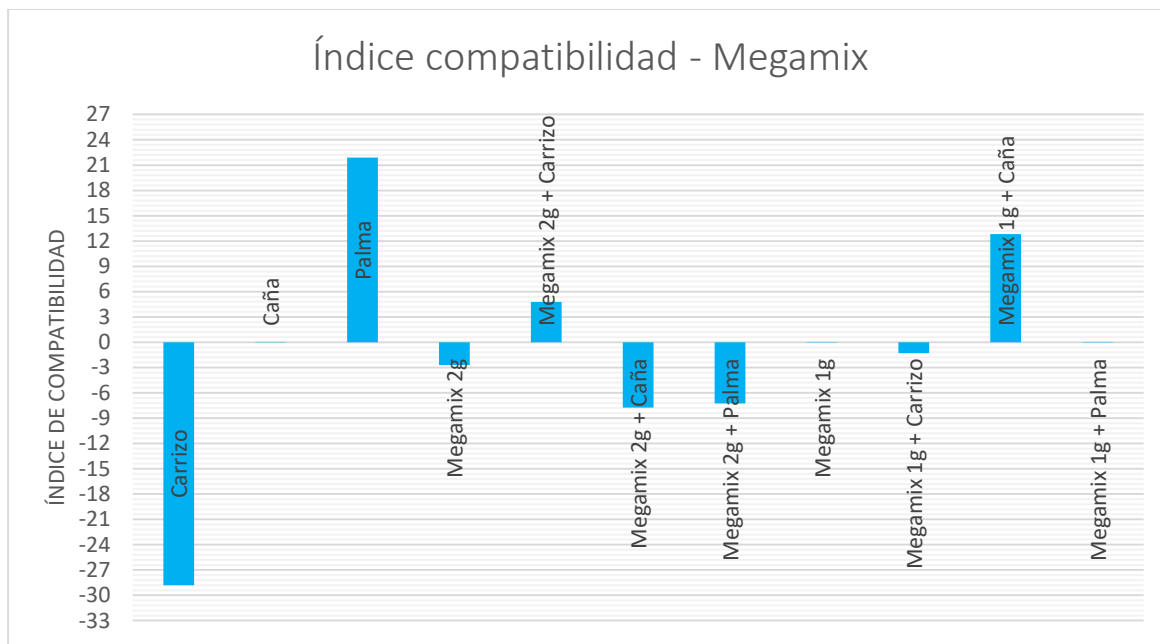
*Índice de compatibilidad viscomix*



Como resultado del índice de compatibilidad (**Figura 70**) la mezcla con la biomasa de caña es la que tiene el menor valor de índice, seguido por las mezclas de Viscomix y carrizo (Viscomix 2g+ Carrizo y Viscomix 1g + Carrizo), mientras que en las mezclas que no se utilizó el aditivo con las hojas de palma y las hojas de carrizo son las que tienen los mayores valores de índice de compatibilidad.

### Figura 71

*Índice de compatibilidad megamix*



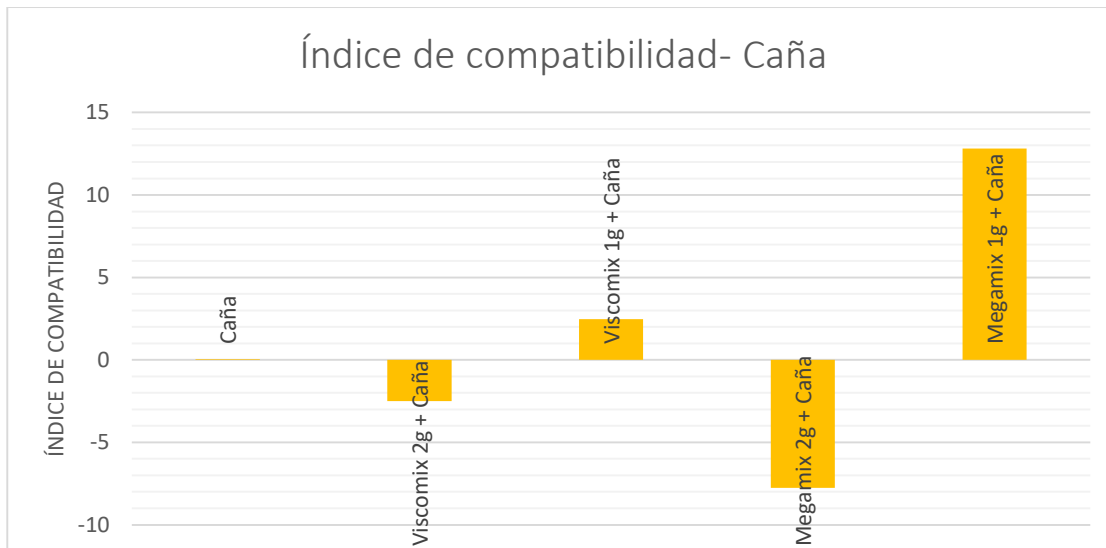
Finalmente, en las mezclas con el aditivo Megamix (**Figura 71**), las mezclas con Megamix de cantidad 1g (Megamix 1g, Megamix 1g + palma y Megamix 1g + carrizo) son las que tienen mayor compatibilidad con el cemento Portland puzolanico tipo IP, y las variaciones de Megamix 2g + caña y Megamix 1g + caña son las más alejadas en la gráfica con valores altos.

### Resultados agrupados por biomazas

Para brindar otra perspectiva, en este caso por la biomasa utilizada se muestran figuras de barras, y se visualiza cuál de las mezclas posee un mayor y menor índice de compatibilidad.

### Figura 72

*Índice de compatibilidad caña*

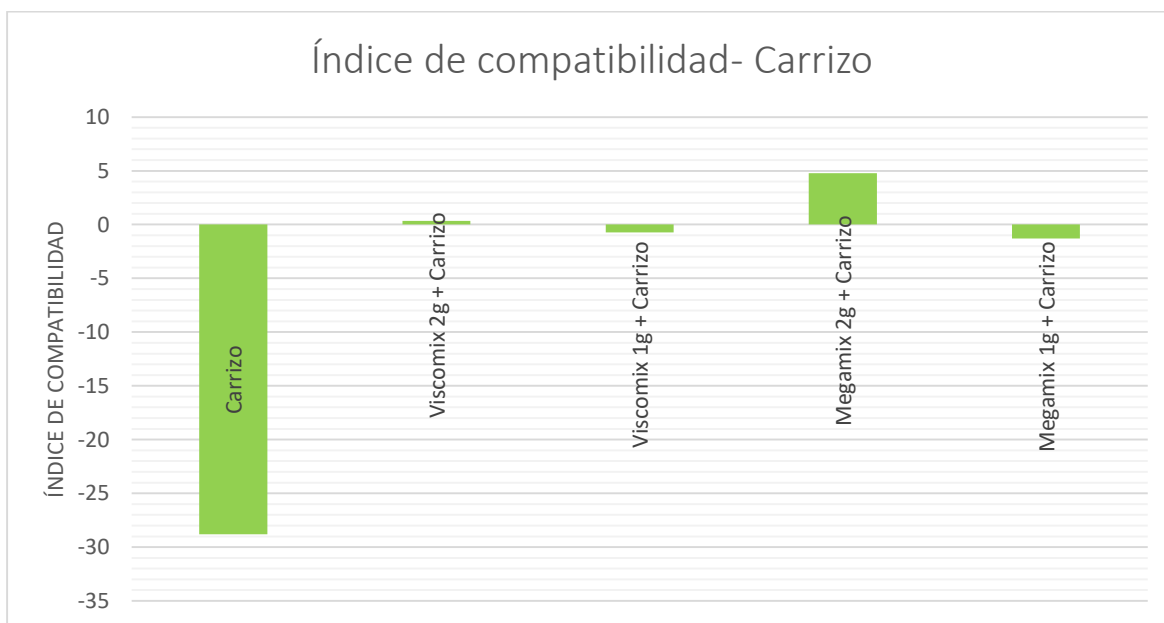


El bagazo de caña sin ningún aditivo (

**Figura 72)** es el que presenta mayor afinidad con el cemento portland puzolanico tipo IP, mientras que su mezcla con Megamix de 1 gramo aumenta su índice de compatibilidad.

### Figura 73

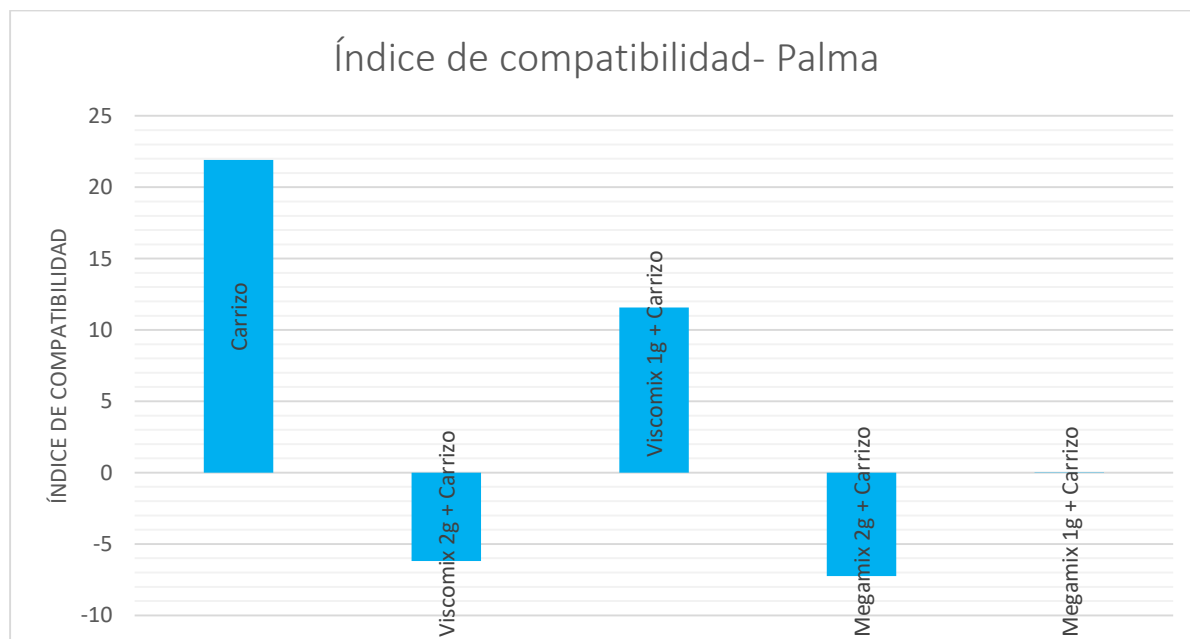
*Índice de compatibilidad carrizo*



Las hojas de carrizo necesitan la adición de aditivos superplastificantes para que su índice de compatibilidad sea menor y presente características más semejantes al cemento portland. (**Figura 73**)

**Figura 74**

*Índice de compatibilidad palma*



Las hojas de carrizo o poseen un elevado índice de compatibilidad y requieren la suma de aditivos, en el caso más amigable, de Megamix en cantidad de 1 gramo. (**Figura 74**)

Posteriormente se tabula todos los resultados obtenidos y se nombra a cada una de las mezclas según su compatibilidad. (**Tabla 3**)



## Resumen de resultados

**Tabla 8**

*Resumen de resultados*

Clasificación	Temperatura máxima (°C)	Tiempo máximo (minutos)	Pendiente	Índice de tiempo	Índice de temperatura	Índice de pendiente	Índice de compatibilidad (%)	Clasificación de compatibilidad
Cemento Portland Tipo IP	26.8	770	-0.0121	It	IT	Ip	Ic	-----
Carrizo	23.6	205	0.0277	-0.7338	0.1194	3.2887	-28.8132	Alta
Caña	26.9	150	-0.0101	-0.8052	-0.0037	0.1662	0.0499	Extrema
Palma	23.8	1045	0.0543	0.3571	0.1119	5.4795	21.9065	Alta
Viscomix 2g	22.5	985	-0.0186	0.2792	0.1604	-0.5367	-2.4042	Extrema
Viscomix 2g + Carrizo	24	860	-0.0087	0.1169	0.1045	0.2818	0.3441	Extrema
Viscomix 2g + Caña	26.5	125	0.0203	-0.8377	0.0112	2.6718	-2.5053	Extrema
Viscomix 2g + Palma	24.3	720	0.1118	-0.0649	0.0933	10.2265	-6.1945	Extrema
Viscomix 1g	23.9	890	0.0948	0.1558	0.1082	8.823	14.8789	Alta
Viscomix 1g + Carrizo	22.9	730	-0.0003	-0.0519	0.1455	0.979	-0.7401	Extrema
Viscomix 1g + Caña	23	745	-0.077	-0.0325	0.1418	-5.3593	2.4672	Extrema

Clasificación	Temperatura máxima (°C)	Tiempo máximo (minutos)	Pendiente	Índice de tiempo	Índice de temperatura	Índice de pendiente	Índice de compatibilidad (%)	Clasificación de compatibilidad
Viscomix 1g + Palma	22.6	845	0.0798	0.0974	0.1567	7.5842	11.577	Alta
Megamix 2g	25.8	940	-0.0516	0.2208	0.0373	-3.2576	-2.6836	Extrema
Megamix 2g + Carrizo	23.7	625	-0.0387	-0.1883	0.1157	-2.198	4.7878	Extrema
Megamix 2g + Caña	23.5	200	-0.0018	-0.7403	0.1231	0.8514	-7.7606	Extrema
Megamix 2g + Palma	24.6	225	0.003	-0.7078	0.0821	1.2466	-7.2432	Extrema
Megamix 1g	27.2	780	-0.0089	0.013	-0.0149	0.2669	-0.0052	Extrema
Megamix 1g + Carrizo	24.3	725	0.0164	-0.0584	0.0933	2.3508	-1.2816	Extrema
Megamix 1g + Caña	28.3	190	0.0247	-0.7532	-0.056	3.0391	12.8128	Alta
Megamix 1g + Palma	25.7	755	-0.0091	-0.0195	0.041	0.249	-0.0199	Extrema

## Capítulo V

### Análisis de costos

#### Costos de proyecto

En la **Tabla 9** se detallan los costos directos del trabajo de investigación.

**Tabla 9**

*Costos de proyecto*

Cantidad	Unidad	Ítems	Precio Unitario (\$)	Precio Final (\$)
1	unidad	Termómetro digital	3.50	3.50
1	galón	Agua destilada	3.00	3.00
1	unidad	Pistola porta silicón	8.20	8.20
1	botella	Silicón	3.90	3.90
1	unidad	Goma de caucho	2.00	2.00
1	unidad	Cinta doble faz	3.70	3.70
50	kg	Cemento puzolanico	0.15	7.50
2	kg	Aditivo Superplastificante	donado	0.00
7	unidad	Polipropileno expandido	0.20	1.40
3	unidad	Tornillos	0.05	0.15
1	unidad	Pasta soldar	1.40	1.40
1	unidad	Rollo estaño	10.00	10.00
1	unidad	Termocupla tipo K	10.00	10.00
1	unidad	Balanza digital	13.50	13.50
40	unidad	Vaso térmico	0.10	4.00
1	unidad	Spray pintura gris	2.50	2.50

Cantidad	Unidad	Ítems	Precio Unitario (\$)	Precio Final (\$)
1	unidad	Lamina cobre	2.00	2.00
1	unidad	Cautín 60W	7.50	7.50
1	unidad	Bagazo de caña	1.00	1.00
1	unidad	Palma africana	donado	0.00
1	unidad	Carrizo	donado	0.00
1	unidad	Vaso de vidrio	2.85	2.85
1	unidad	Agitador metálico	1.5	1.50
1	unidad	Movilización	30	30.00
1	unidad	Misceláneos	50	50.00
			<b>Total</b>	<b>169.60</b>

Los aditivos superplastificantes (Viscomix y Megamix) fueron donados por la empresa SETMIX, fabricantes y distribuidores de los mismos.

Las hojas de palma africana fueron donadas por los propietarios del complejo Kapari, ubicado en el cantón San Miguel de los Bancos, provincia de Pichincha.

Las hojas de carrizo fueron donadas por la familia Figueroa Carvajal, quienes poseen carrizos en su propiedad ubicada en la parroquia Sangolquí, cantón Quito, provincia de Pichincha.

Todos los gastos directos fueron asumidos por el estudiante.

## Capítulo VI

### Conclusiones y recomendaciones

#### Conclusiones

Tomando la temperatura máxima de hidratación del cemento portland puzolanico tipo IP como base, las composiciones que tienen el aditivo Viscomix disminuyen su valor, mientras que con la mezcla del aditivo Megamix la temperatura es más constante y no varía demasiado.

Con respecto al índice de compatibilidad la mezcla que posee mayor compatibilidad con el cemento portland puzolanico tipo IP es la mezcla de Viscomix 2g+ carrizo seguido por la composición de Viscomix 1g+ carrizo.

Por su parte utilizando el aditivo Megamix se concluye que la mezcla más compatible es la de Megamix 1g seguido por la mezcla de Megamix 1g+ palma.

En las pruebas realizadas solamente con la combinación cemento + biomasa se determina que la biomasa más compatible es el bagazo de caña, mientras que la menos compatible son las hojas de carrizo.

La combinación que posee mayor compatibilidad entre los veinte ensayos realizados con el cemento es la añadida con megamix 1g.

Las combinaciones que tienen 2g de viscomix son más compatibles que las que se añadió solamente 1g de viscomix.

Mientras que las mezclas que contienen 1g de megamix son más compatibles que las que poseen 2g del mismo aditivo.

El tiempo en el cual las mezclas que contienen caña alcanzan su hidratación se debe a que la caña obtenida es de un proceso no industrializado de extracción de jugo de caña para su venta informal, por lo cual en la cascara todavía existen residuos de azúcar que aceleran la hidratación del cemento.

La rehabilitación del calorímetro adiabático es completa, reemplazando todos los materiales deteriorados, adhiriendo nuevamente todas las partes sueltas o dañadas. Se realizaron nuevas reconexiones e identificaciones para todos los pines y cables sueltos entre la placa y los sensores de temperatura, igualmente se reemplazó la termocupla tipo k.

### **Recomendaciones**

Para nuevos ensayos se recomienda el uso de nuevas biomazas, y si es posible variar su porcentaje con respecto a la masa de cemento.

El uso de otro tipo de aditivos, debido a que se utilizó aditivos superplastificantes por su fácil acceso en el mercado nacional.

Para que el tiempo de hidratación no disminuya drásticamente se recomienda utilizar biomazas humedecidas previamente al añadir las en la mezcla.

El uso de otros tipos de cementos, tales como hidráulicos o sin puzolana de la misma o diferentes marcas, para determinar cambios en sus curvas de hidratación.

Realizar previo cada ensayo la calibración de los diversos sensores de temperatura, para que la toma de datos no sea equivocada.

Verificar que todos los cables y elementos externos a la placa de Arduino se encuentren conectadas, al igual que los diferentes recipientes estén seguros y estables.

### **Referencias**

Acosta Solís, M. (1960). *Los Bambúes y Pseudobambúes Económicos del Ecuador*.

Aguilar Sánchez, A. P. (2015). Caracterización de la influencia de biomazas ecuatorianas sobre la hidratación del cemento portland puzolánico. (*Tesis de ingeniería*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí. Obtenido de <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/11318/1/T-ESPE-049460.pdf>

- Altamirano, C., & Cueva, E. (Octubre de 2011). *Estudio y experimentación de paneles estructurales y de revestimiento en base de la caña de la sierra.*
- Anjos, M., Martinelli, A., Melo, D., Renovato, T., Souza, P., & Freitas, J. (2013). Hydration of oil well cement containing sugarcane biomass waste as a function of curing temperature and pressure. *Journal of Petroleum Science and Engineering.*
- Arduino . (s.f.). *What is Arduino?* Obtenido de <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>
- Argiz Lucio, C., Menéndez Mendez , E., & Moragues, A. (2013). Breve historia del cemento portland. *Cemento Hormigón.*
- Arribada, J. (1978). El fenómeno del falso fraguado en los cementos y su medición. *Revista del IDIEM.*
- Asociación Colombiana de Productores de Concreto. (s.f.). *360 en concreto.* Obtenido de 360 en concreto: <https://www.360enconcreto.com>
- Barriga, A., & Balseca, M. (s.f.). *Ecuador.*
- Beraldo, A., & Balzamo, H. (2009). Compuestos no- estructurales de cementos comerciales y aserrín de maderas Argentinas. *Maderas. Ciencia y tecnología.*
- Burón Maestro, M., Fernández Gómez, J., & Garrido Romero, L. (Abril de 2006). Hormigón Autocompactante. Criterios para su utilización. *IECA(887).*
- Cabrera, M. I. (2015). Utilización de los concretos de alta resistencia y concretos celulares en la industria de la construcción ecuatoriana, clasificados por sectores: vivienda, electricidad, gas/petróleo, salud y educación. *Ingenio.*
- Calleja, J. (1977). Cementos puzolánicos. *Materiales De Construcción.*
- Carrasco García, J. E. (2007). [https://es.scribd.com/document/247430435/Historia-de-Los-Aditivos.](https://es.scribd.com/document/247430435/Historia-de-Los-Aditivos)

- Cechin, L., Matoski, A., & Lima, A. (2018). Efecto de los tratamientos sobre la compatibilidad entre el bambú moso y el cemento Portland de alta resistencia inicial. *Revista Ingeniería de Construcción*.
- CEMEX. (s.f.). *CEMEX Nicaragua*. Obtenido de <https://www.cemexnicaragua.com/productos-y-servicios/cemento/como-hacemos-el-cemento>
- Cengel, Y., & Boles, M. (2011). *Termodinámica*. México: Mc Graw Hill.
- Cechin, L., Matoski, A., Miranda de Lima, A., Monique, A., & Basso, R. (Agosto de 2018). Efecto de los tratamientos sobre la compatibilidad entre el bambú moso y el cemento Portland de alta resistencia inicial. *Revista ingeniería de construcción*, 33(2).
- Corporación para la investigación energética. (2015). *Corporación para la investigación energética*. Obtenido de <http://energia.org.ec/cie/energia-biomasa/>
- Dancé Caballero, J., & Sáenz Yaya, D. (s.f.). La cosecha de caña de azúcar: Impacto económico, social y ambiental. 2012. Universidad de San Martín de Porres.
- De la Cruz Alta, H. P. (2018). *Efectos del curado en las propiedades mecánicas del hormigón con cemento Portland y por desempeño*. Universidad San Francisco de Quito, Quito.
- de Lucas Herguedas, A. I., & del Peso Taranco, C. (2012). *Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad*.
- Delgado Vallejo, A., & Negrete Martínez, C. (s.f.). Evaluación del uso de arcillas y puzolanas en la etapa de molienda de acabado para la fabricación de cemento portland puzolanico tipo IP. *Tesis*. Universidad de Cuenca, Cuenca.
- Díaz Ponce, O. A. (2012). La evolución de la industria del cemento con énfasis en latinoamérica. (*Tesis de ingeniería*). Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala.



Duda, W. H. (1977). *Manual tecnológico del cemento*.

El Universo. (14 de Setiembre de 2018). El hormigón es el más usado para construir viviendas en Ecuador. *El Universo*.

Gaspar Tebar, D. (1985). Aditivos para hormigones, morteros y pastas. *Materiales de construcción*.

Gonzales, J., Lira Cortés, L., & Sánchez Rodríguez, Á. (s.f.). *Calorimetría adiabática y sus aplicaciones*. Queretaro.

Hansen, W. C. (1962). Fraguado rapido y falso fraguado en los cementos portland. *Materiales de Construcción*, 12(107).

*Historia de aditivos*. (s.f.). Obtenido de Scribd:  
<https://es.scribd.com/document/247430435/Historia-de-Los-Aditivos>

Hofstrand, A. D., Moslemi, A. A., & Garcia, J. F. (1984). Curing characteristics of wood particles from nine northern Rocky Mountain species mixed with portland cement. *Forest Products Journal*.

HOLCIM Ecuador S.A. (s.f.). *DOCPLAYER*. Obtenido de Evolución de las Normas para la fabricación de cemento y características de sus aplicaciones. Holcim Ecuador S.A.:  
<https://docplayer.es/26075693-Evolucion-de-las-normas-para-la-fabricacion-de-cemento-y-caracteristicas-de-sus-aplicaciones-holcim-ecuador-s-a.html>

Holcim S.A. (s.f.). *Holcim*. Obtenido de Evolución de la normas:  
<https://docplayer.es/26075693-Evolucion-de-las-normas-para-la-fabricacion-de-cemento-y-caracteristicas-de-sus-aplicaciones-holcim-ecuador-s-a.html>

Iberoplast. (s.f.). *Conoce las características del polipropileno*. Obtenido de  
<https://www.iberoplast.pe/blog/conoce-caracteristicas-polipropileno/>

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2009). *Cemento hidráulico. Determinación del calor de hidratación*.

Institut de Promoció Cerámica. (s.f.). *ipc*. Obtenido de [http://www.ipc.org.es/guia\\_colocacion/info\\_tec\\_colocacion/mat\\_agarre/morteros.html](http://www.ipc.org.es/guia_colocacion/info_tec_colocacion/mat_agarre/morteros.html)

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011). *cementos hidráulicos. Requisitos de desempeño para cementos hidráulicos*.

Instrumentación Científico Técnica. (s.f.). *I.C.T,S.L.* Obtenido de <https://www.ictsl.net/productos/propiedadestecnicas/vidrioborosilicato/index.html>

Jahren, P., & Sui, T. (2018). *History of Concrete: A Very Old and Modern Material*.

Kaminskas, R. (2014). Influence of activated biomass fly ash on portland cement hydration. *Ceramics Silikaty*.

Labahm, O. (1985). *Prontuario del cemento*.

López Molina , M. (2013). Nanoresiduos.Incorporación en materiales de base cemento. (*Tesis de ingeniería*). Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Barcelona.

Maldonado, A., Morales, D., Lino, J., Polo, J., Fuertes, R., & Abaroa, T. (2015). *Calorímetro para medir temperatura en un sistema adiabático*. Sangolquí.

Maxim Integrated. (s.f.). *Cold-Junction-Compensated K-Thermocoupleto-Digital Converter (0°C to +1024°C)*. Obtenido de <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX6675.pdf>

Merritt, F., Kent Loftin, M., & Ricketts, J. T. (2001). *Manual del ingeniero civil*.

Ministerio del Ambiente y Agua. (20 de Junio de 2020). *Ministerio del Ambiente y Agua*. Obtenido de <https://www.ambiente.gob.ec/ecuador-promueve-la-generacion-de-bioenergia-a-traves-del-aprovechamiento-de-residuos-organicos-e-industriales/>

Moragues Terrades, A. (s.f.). Procesos de hidratación del cemento portland microestructura del hormigón.

- National Instruments . (s.f.). *Qué es LabVIEW*. Obtenido de <https://www.ni.com/es-cr/shop/labview.html>
- Paucar Verdejo, J. R., & Robalino Jácome, J. A. (2009). *Modelo estratégico para la industrialización de la caña de azúcar en el Ecuador*. Escuela Politécnica Nacional, Quito.
- Potter, L. (2011). *La industria del aceite de palma en Ecuador: ¿un buen negocio para los pequeños agricultores?*
- Rehau. (s.f.). *Qué es el PVC*. Obtenido de <https://www.rehau.com/es-es/que-es-el-pvc>
- Revista Lideres. (2014). En Ecuador, el consumo de cemento crece a ritmo sostenido. *Lideres*.
- Revista Lideres. (s.f.). El 50% del aceite de palma ecuatoriano se exporta. *Revista Lideres*.
- Rezola Izaguirre, J. (1976). *Características y correcta aplicación de los diversos tipos de cemento*.
- Rivera, G. A. (s.f.). Capítulo 1 Materiales conglomerantes. En G. A. Rivera, *Concreto simple*. Obtenido de <ftp://ftp.unicauca.edu.co/cuentas/harenas/docs/MATERIALES%20DE%20CONSTRUCCION/CEMENTO%20PORTLAND/Cap.%2001%20-%20Materiales%20conglomerantes.pdf>
- Rivera, G. L. (2013). *Tecnología del concreto y mortero*.
- Rodgers, L. (17 de Diciembre de 2018). La enorme fuente de emisiones de CO2 que está por todas partes y que quizás no conocías. *BBC News*.
- S.A, H. E. (2015). *Cemento hidráulico Tipo GU para la construcción*. Obtenido de <https://www.holcim.com.ec/>
- Saint - Gobain. (s.f.). *Propiedades del vidrio*. Obtenido de <https://www.saint-gobain-sekurit.com/es/glosario/propiedades-del-vidrio>

- San Juan Barbudo, M. A., & Chichón Yepes, S. (2014). *Introducción a la fabricación y normalización del cemento portland*.
- San Juan Barbudo, M. A., & Chinchón Yopez, S. (2004). *El cemento Portland. Fabricación y expedición*. Alicante.
- Sólis, C. (2005). *Características del Poliestireno Expandido*.
- Sosa, M. E., Villagrán Zaccardi, Y. A., Peralta, J. P., & Zega, C. J. (2017). Efficiency of cement-admixture systems in mortars with binary and ternary Portland cements. *DYNA*.
- Soto Izquierdo, & Ramalho, M. (2018). Propiedades físicas y mecánicas del hormigón usando polvo residual de desechos orgánicos como reemplazo parcial del cemento. *Revista Ingeniería de Construcción*.
- The Arduino Playground. (s.f.). *A DHT11 Class for Arduino*. Obtenido de <https://playground.arduino.cc/Main/DHT11Lib/>
- Triviño Vasquez, F. (1974). Hidratación del cemento portland: estudio por diversas técnicas. *Materiales de construcción*.
- UNACEM Ecuador. (s.f.). Obtenido de <https://unacem.com.ec/>
- Universidad de Alcalá. (s.f.). Obtenido de [https://portal.uah.es/portal/page/portal/epd2\\_profesores/prof121896/docencia/T3\\_CEMENTOS.pdf](https://portal.uah.es/portal/page/portal/epd2_profesores/prof121896/docencia/T3_CEMENTOS.pdf)
- Universidad de Alcalá. (s.f.). *Ciencia y Tecnología de la Edificación*.
- Universidad pedagógica y tecnológica de Colombia. (2013). *Ministerio de minas y energía*. Obtenido de <https://www.minenergia.gov.co/documents/10180/169095/EXPLORACION+DE+MATERIALES.pdf/fc129902-1523-4764-9a05-755e3bb7896e>
- Watts, J. (4 de Marzo de 2019). Cemento: el material más destructivo de la Tierra. *Eldiario*.

Weatherwax, R. C., & Tarkow, H. (1964). Effect of wood on the setting of portland cement.

Decay wood as an inhibitor. *Forest Products Journal*.

Zibell, M. (23 de Abril de 2016). El secreto de los edificios que no se cayeron durante el terremoto de Ecuador. *BBC News*.

## **Anexos**

### **Anexo A**

#### **Partes del calorímetro**

Para el desarrollo de los ensayos se debe realizar primero la recuperación del equipo, porque no ha sido manejado con cuidado y varios de sus elementos físicos se encuentran deteriorados ni se han realizado pruebas para revisar sus componentes electrónicos.

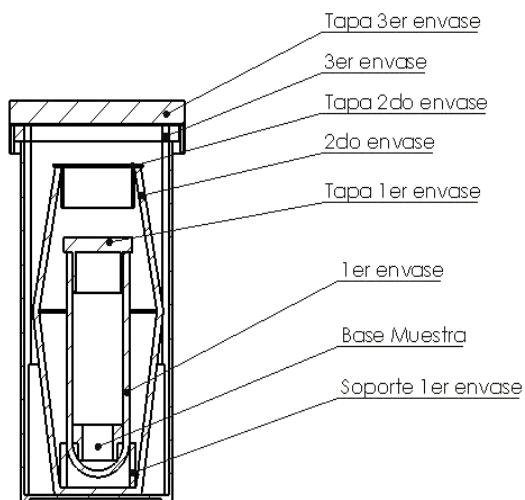
Por lo cual es necesario detallar las partes del calorímetro (**Figura 75**) y determinar sus fallas para su reparación, unión y montaje, que será detallado en bitácoras de rehabilitación.

Para la estructura del calorímetro se utilizó materiales con baja capacidad calorífica, convirtiéndola en un sistema adiabático. Es un conjunto compuesto por tres recipientes sellados por tapas de PVC, mientras que el material de aislamiento son granos de poliestireno. (Maldonado, y otros, 2015)

Para la toma de datos se utiliza una termocupla tipo k que mide la temperatura de la mezcla dentro del primer recipiente. El sensor DHT-11 se ubica entre el segundo y tercer recipiente y mide la temperatura del vacío que existe entre los dos recipientes y si existen variaciones del mismo, indicando si existe o no transferencia de calor entre el exterior e interior del calorímetro. (Maldonado, y otros, 2015)

## Figura 75

*Esquema principal del calorímetro*



*Nota:* Tomado de “Calorímetro para medir temperatura en un sistema adiabático” por (Maldonado, y otros, 2015)

*Primer recipiente:* Tubo de vidrio

Fabricado con vidrio de boro silicato (

**Figura 76**), ofrece una temperatura de uso alta, porque es el recipiente que más está en contacto con la mezcla de cemento y aditivos. (Instrumentación Científico Técnica, s.f.)

**Figura 76**

*Tubo de vidrio*



*Segundo recipiente: Jarro de vidrio*

Su baja capacidad calorífica con respecto a los metales (**Figura 77**), permite su uso en ciertas aplicaciones de transmisión de calor. (Saint - Gobain, s.f.)

**Figura 77**

*Jarro de vidrio*



*Tercer recipiente: Envase de Polipropileno*

Posee gran resistencia contra diversos solventes químicos como álcalis y ácidos. (**Figura 78**)

Evita el traspaso de humedad. (Iberoplast, s.f.)

### **Figura 78**

*Envase de polipropileno*



Elementos estructurales

*Bases y tapas de PVC*



El poli cloruro de vinilo (PVC) posee gran resistencia mecánica y al impacto (**Figura 79**), además de resistencia a la abrasión, por lo que no sufre quemaduras cuando está cerca de fuentes de calor altas y tiene baja capacidad calorífica. (Rehau, s.f.)

### **Figura 79**

*Tapas de PVC*



*Elemento aislante*

En el espacio vacío que existe entre el primer y segundo recipiente se llena hasta cubrir la mayor parte del mismo con granos de poliestireno expandido (**Figura 80**), debido a que una de sus características principales es aislar térmicamente. (Sólis, 2005)

### **Figura 80**

*Gránulos de poliestireno*



*Sensores*

*Termocupla tipo k*

El rango de utilización de los termopares tipo k (NI-Cr-Ni) está entre 0°C y 500 °C.

### Figura 81

*Termocupla tipo k*



*MAX6675*

Cumple la función de realizar la compensación de junta fría y digitalizar las señales de las termocupla. (Maxim Integrated, s.f.)

*DHT11*

Este sensor permite exportar una señal digital calibrada. (The Arduino Playground, s.f.)

*Método de adquisición de datos*

*Software*

Los softwares utilizados son Arduino y LabView

- Arduino

El programa puede tomar información del entorno a través de sus pines de entrada, para esto se puede utilizar toda una gama de sensores, luces y otros actuadores.

(Arduino , s.f.)

- LabView

Es un sistema de programación de propósito general para la adquisición de datos y control de instrumentos. Posee la ventaja de fácil integración, adquisición y procesamiento de datos. (National Instruments , s.f.)

#### *Interfaz*

El HMI (interfaz hombre maquina) se desarrolló en LabView, utilizando lenguaje de programación G, lo que permitió una fácil conexión de la tarjeta de adquisición para facilitar la comunicación entre los dispositivos. (Maldonado, y otros, 2015)

**Anexo B**

**Bitácora de rehabilitación de calorímetro**

De acuerdo con el manual de mantenimiento provisto (Maldonado, y otros, 2015), primero se realizó el mantenimiento preventivo con la verificación de la instalación. (*Tabla 10*)

***Bitácora de mantenimiento preventivo***

**Tabla 10**

*Bitácora de mantenimiento preventivo*

Verificación	Descripción	Materiales utilizados	Resultado final
Verificar que ningún componente se encuentre flojo, ya que ocasionara que la adquisición de datos arroje resultados erróneos.	El aislamiento de silicón de la tapa del tercer envase se encontró totalmente agrietado y permitía el paso de aire hacia el interior del mismo.  El recubrimiento de caucho de la tapa del segundo envase se encontraba rota y su función como aislante no era óptimo.	Cinta doble faz  Caucho	Se reemplazó todo el caucho y se adhirió con cinta doble faz.

Verificación	Descripción	Materiales utilizados	Resultado final
Verificar que los codos de poliestireno que estabilizan el 2do envase estén colocados en las 4 esquinas interiores del 3er recipiente.	Todos los codos de poliestireno se encontraban sueltos, debido a que el silicón utilizado para su unión estaba seco y agrietado.	Silicón Pistola porta silicón	Se despegó todo el silicón que estaba en el tercer recipiente y se pegó los codos de poliestireno con nuevo silicón.
Verificar que los tubos de poliestireno que estabilizan el 1er envase estén colocados correctamente en el interior del 2do recipiente.	Los tubos de poliestireno se encontraron estables y colocados correctamente.	Ninguno	No se requirió ningún cambio o modificación en la posición de los tubos de poliestireno.
Verificar que el soporte del DHT11 esté en su lugar dentro del 3er envase.	El soporte estaba sujeto al envase, pero al revisar el sensor se desprendió de su base debido a que la silicona estaba desgastada.	Silicón	Se removió todo el silicón del soporte y se colocó nuevo silicón para adherir el soporte del DHT11 al 3er envase.

Verificación	Descripción	Materiales utilizados	Resultado final
Verificar que el soporte del 1er envase este fijo mediante la epóxica usada dentro del 2do recipiente	El soporte está estable y la epóxica no tiene ningún desgaste.	Ninguno	No se necesitó ningún cambio en el soporte del 1er envase.

Al terminar con todas las verificaciones del mantenimiento preventivo, se analizan las correcciones pertinentes. (**Tabla 11**)

***Bitácora de mantenimiento correctivo***

**Tabla 11**

*Bitácora de mantenimiento correctivo*

Verificación	Descripción	Materiales utilizados	Resultado final
En caso de que algún elemento sea desprendido usar el pegamento epóxico solo para los siguientes elementos (soporte del 1er envase, codos	Los codos de poliestireno se encontraron desprendidos de su base. El soporte del sensor DHT11 está firme y sin ningún daño, al	Ninguno	No se requirió ningún refuerzo o sustitución del pegamento epóxico en los elementos que están unidos con el mismo, porque no se encontró desgaste o desprendimiento, que

Verificación	Descripción	Materiales utilizados	Resultado final
poliestireno, tubos de igual que los tubos de poliestireno, soporte DHT11)	poliestireno.		afecte al funcionamiento del calorímetro.
En caso de que suelte un cable volver a colocar con el pin correspondiente.	Todas las conexiones de cables que van desde la termocupla y DHT11 hacia el arduino no estaban acopladas, porque se recibió el calorímetro y los componentes del arduino por separado, sin ninguna identificación de los cables.	Alambre Cinta scotch transparente Papel bond Cautín Lámina de cobre Estaño para soldar Pasta para soldar	Se reconecto todos los pines de la placa hacia la termocupla y DHT11. Se reconecto todos los pines de la placa hacia la termocupla y DHT11. Se identificó cada uno de los cables con los nombres de su entrada y salida de la placa. En el extremo de la termocupla se soldó con asistencia de cautín y filamento de estaño una lámina de cobre de 0.1 mm de espesor para que el mismo tome contacto con la mezcla de cemento y no se afecte el funcionamiento de la termocupla.

Por último se realizan nuevas comprobaciones, que no se encuentran detalladas en el manual de mantenimiento (Maldonado, y otros, 2015), pero son necesarias para el buen funcionamiento del calorímetro y la toma de datos de los ensayos posteriores. (**Tabla 12**)

**Modificaciones adicionales**

**Tabla 12**

*Bitácora de modificaciones adicionales*

Verificación	Descripción	Materiales utilizados	Resultado final
Verificar que la termocupla tipo k registre datos correctos	A partir de las primeras pruebas con mezcla de cemento y biomasa se analizaban las gráficas obtenidas sin ninguna similitud a las gráficas conocidas como de hidratación del cemento	Termocupla tipo k	Se reemplazó por una nueva termocupla tipo k y se comprobó cada 20 minutos con asistencia del termómetro digital que los datos de temperatura sean los correctos.  Adicionalmente la nueva grafica de hidratación coincide con el patrón conocido.



Verificación	Descripción	Materiales utilizados	Resultado final
Verificar que los gránulos de polipropileno se encuentren en buen estado	El espacio entre el segundo y tercer recipiente no se encontraba completamente lleno con gránulos de polipropileno, además se revisó varios gránulos con deterioro y desgaste.	Gránulos de polipropileno	Se reemplazó todos los gránulos de polipropileno con nuevos de las mismas dimensiones.
Verificar que la placa de arduino se encuentra el buen estado	La placa de arduino se encuentra sujeta a una caja plástica pero separada del calorímetro, y sus cables de conexión con los diversos sensores están ubicados exteriormente sin ninguna protección.	Cinta doble faz Silicón Tornillos Cautín Cinta taipe	Con la ayuda de la cinta doble faz se adhirió la caja plástica a un lado del tercer recipiente del calorímetro. Adicionalmente se ajustó con dos tornillos autoajustables para mejor soporte. Los agujeros realizados se sellaron con silicón para que no exista transferencia de calor con el exterior. Las uniones de los cables de conexión se soldaron con ayuda de

Verificación	Descripción	Materiales utilizados	Resultado final
			un cautín y los cubrió con taípe para protección en el interior del tercer envase.

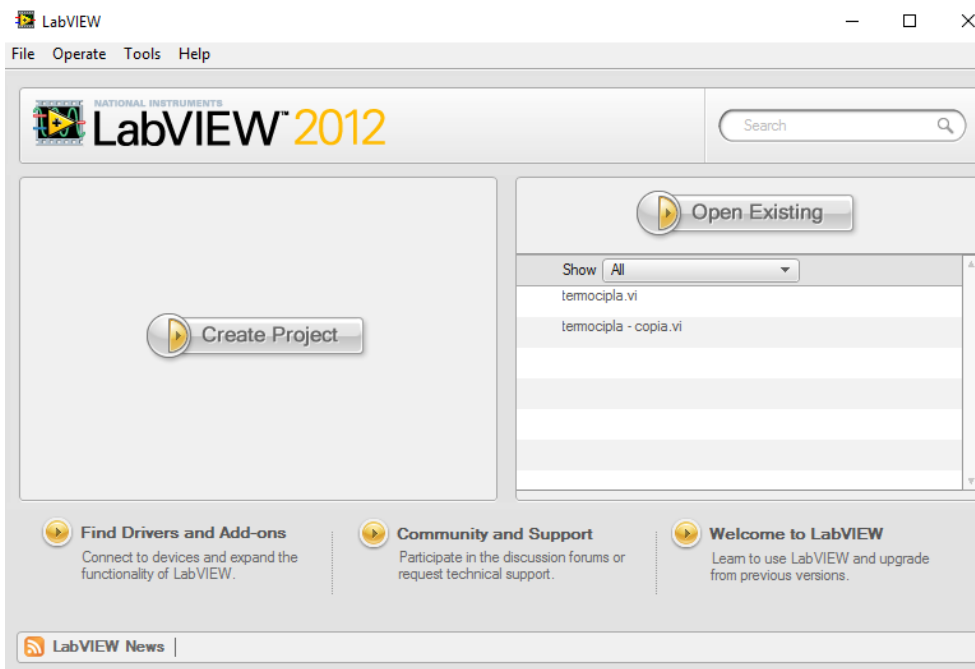
## Anexo C

### Manual de operación

- 1) Conectar el arduino al computado/laptop o equipo a utilizar.
- 2) Abrir el software LabView previamente instalado en el equipo. Es importante no abrir el software de programación de arduino porque la configuración del programa se puede ver afectada debido a que la placa no podrá comunicarse al mismo tiempo con ambos softwares.

### Figura 82

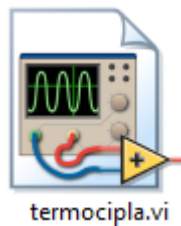
*Página principal de LabVIEW 2012*



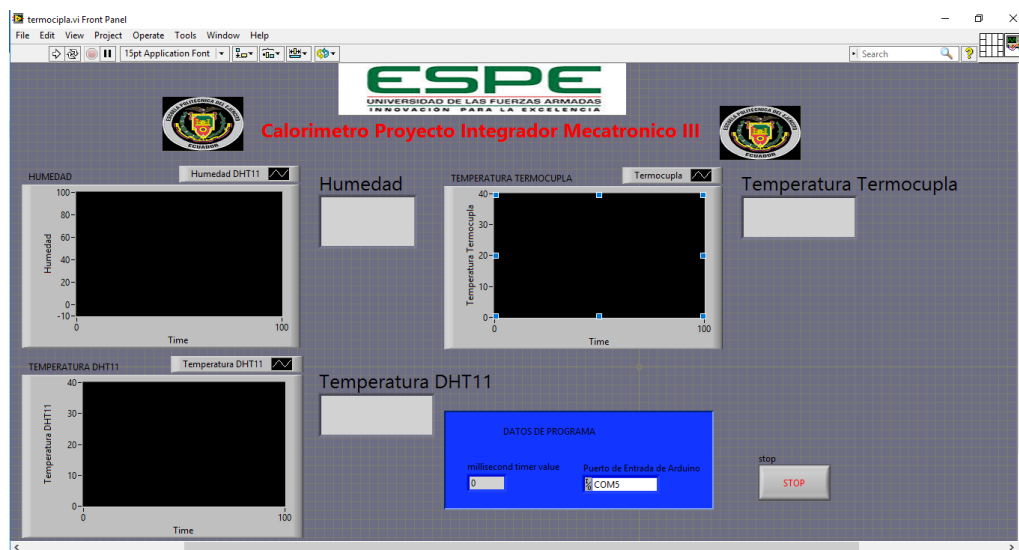
- 3) Abierto el software LabView y conectada la placa arduino se procederá a abrir el programa que controlará el proyecto y la toma de datos del mismo. El programa se llama termocipla el cual se abrirá al dar doble clic izquierdo.

**Figura 83**

*Icono del documento termocipla*

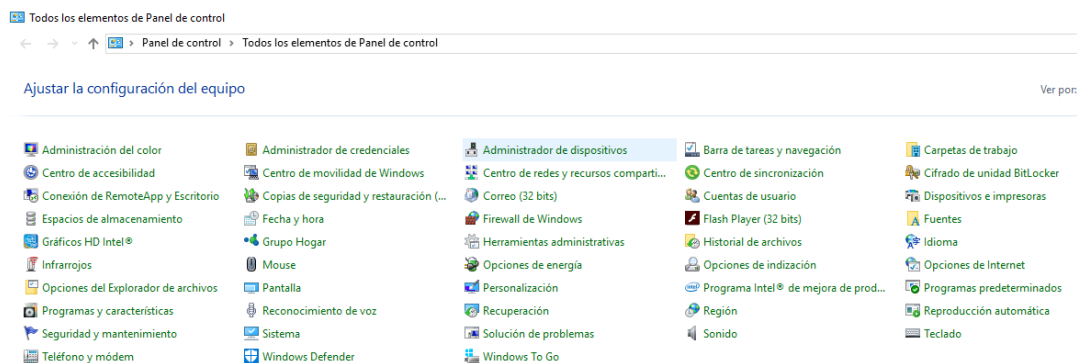
**Figura 84**

*Página principal del documento termocipla*

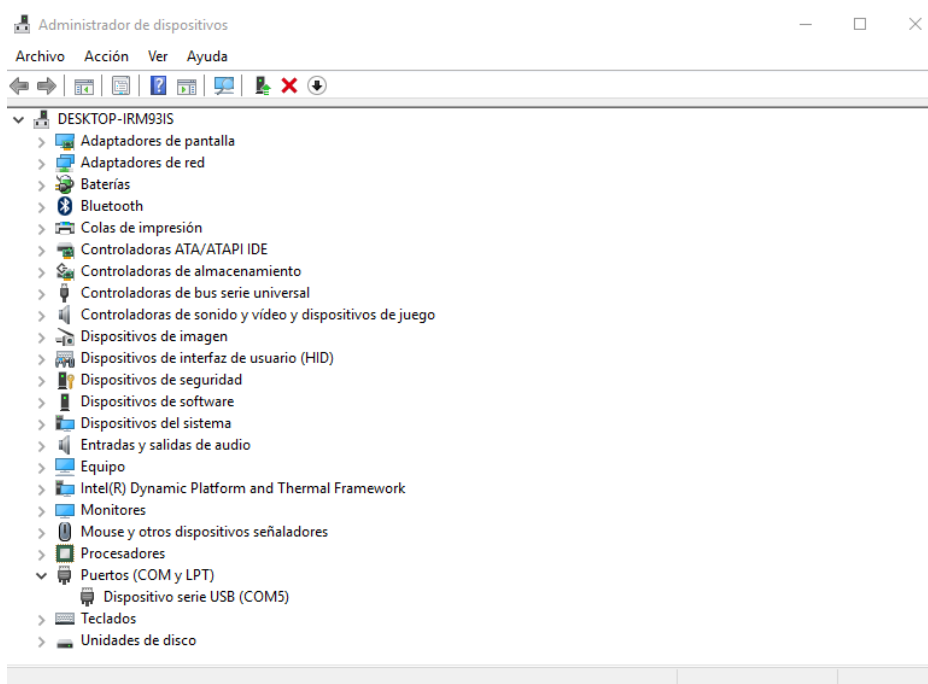


4) Se necesita verificar el puerto Com al cual está conectado la placa arduino, para esto se seguirán los siguientes pasos y posterior verificación.

4.1) Abrir el panel de control

**Figura 85***Ventana de panel de control*

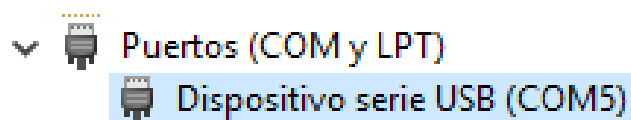
4.2) Abrir el administrador de dispositivos dando clic izquierdo

**Figura 86***Ventana de administrador de dispositivos*

4.3) Dando clic izquierdo en la opción puertos, se verifica el puerto en el que se encuentra la palca arduino.

**Figura 87**

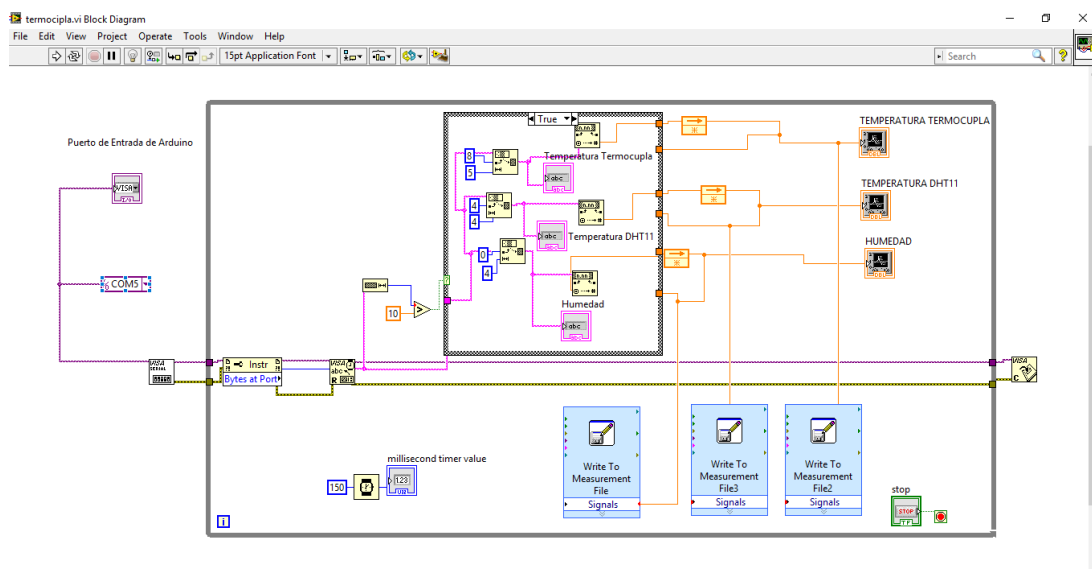
Icono de dispositivos USB



4.4) Verificado el número de puerto en el que se encuentra la placa nos dirigimos nuevamente a la interfaz de usuario y presionando ctrl+T o dando doble clic sobre cualquier objeto de grafico o botón se abrirá una nueva pantalla de programación, donde se verifica el número de puerto, y si no es el caso, se cambia el mismo.

**Figura 88**

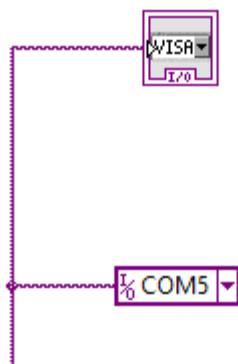
Pantalla de programación



4.5) Verificar de forma visual en la interfaz principal si el número del puerto es el correcto:

**Figura 89**

*Puerto de entrada de arduino*

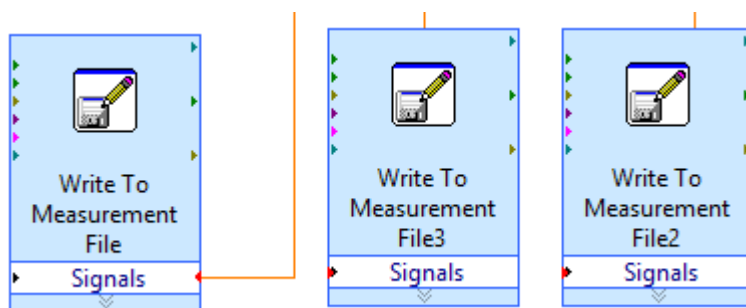


- 5) Modificar la ruta de la carpeta donde se va a guardar los archivos de tomas de datos de las temperaturas y húmedas. *Nota:* Cada vez que se reinicie el programa y desee correrlo, se debe guardar los archivos previos ya generados, porque se pueden perder por sobre escritura de datos.

- 5.1) Dar doble clic izquierdo sobre cada uno de los objetos que controlan la toma de datos

**Figura 90**

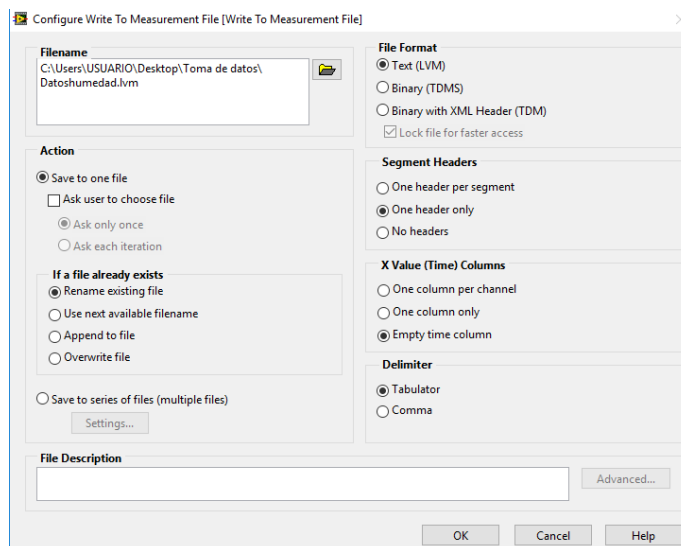
*Control de datos*



- 5.2) Aparece la pantalla de propiedades del objeto:

## Figura 91

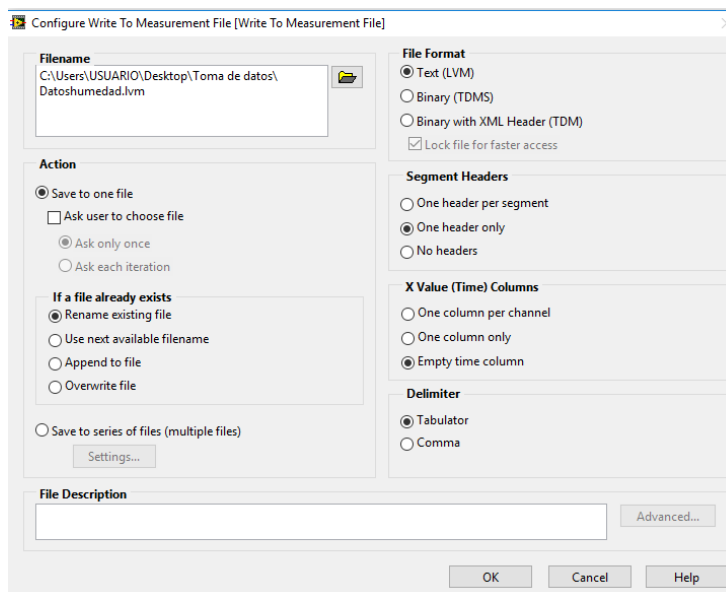
### Propiedades del objeto



5.3) En el recuadro blanco se escribe la ruta de la carpeta donde se va a guardar los archivos y al mismo tiempo le damos el nombre al archivo.

## Figura 92

### Ruta de la carpeta

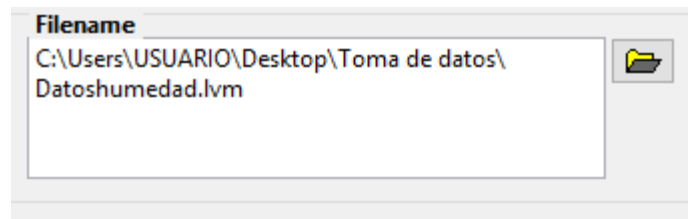


5.4) La segunda opción es escoger la carpeta donde se va a guardar es dar clic izquierdo sobre el icono de la carpeta y agregar el nombre del archivo.



**Figura 93**

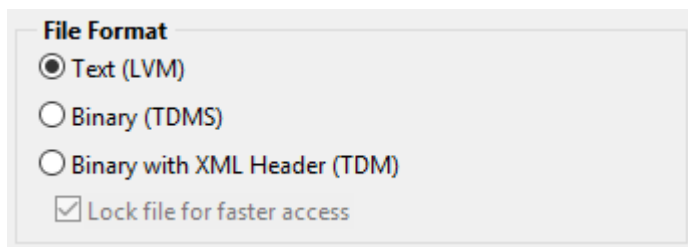
*Selección de carpeta*



- 6) Seleccionar el tipo de archivo como Text (LVM):

**Figura 94**

*Formato de archivo*



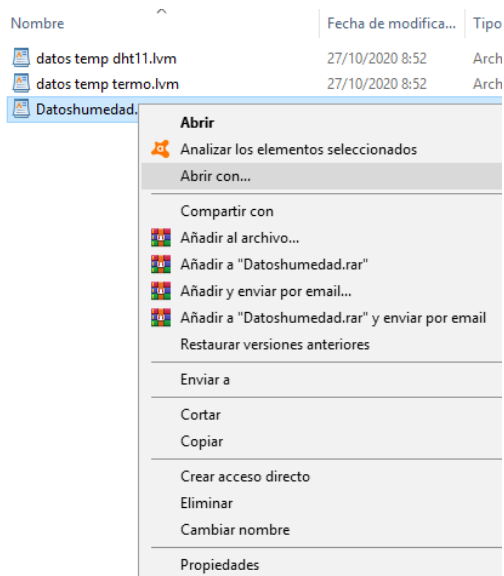
- 7) Para abrir los archivos generados se da primero un clic izquierdo sobre este y se selecciona la opción “abrir con”.

7.1) Seleccionar los programas wordpad o notepad.

- ◆ Clic derecho en aceptar.
- ◆ Volver a abrir el archivo

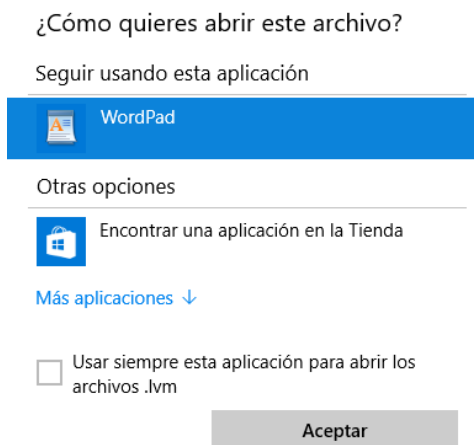
## Figura 95

*Opción abrir con*

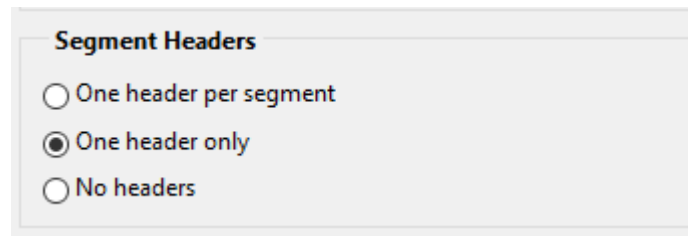


## Figura 96

*Aplicación WordPad*

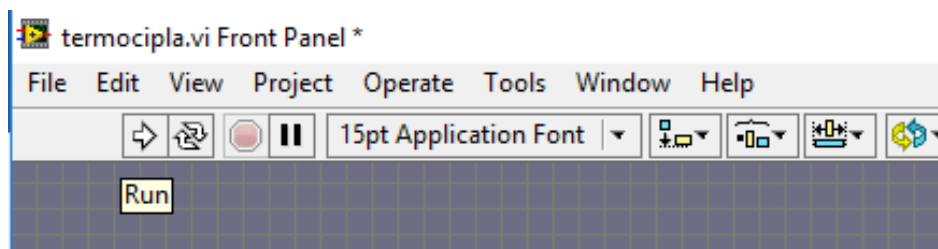


- 8) Seleccionar la siguiente opción “one header only”, la que permitirá identificar mejor los datos en el archivo ya que nos indicara a qué hora se empezó a tomar los datos.

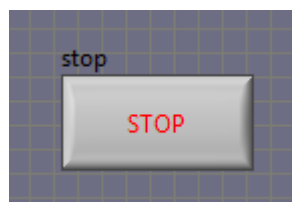
**Figura 97***Encabezados de segmento*

9) Las demás configuraciones se las deja por default.

10) Ya configurado todo, damos clic derecho en el botón correr que se encuentra en la esquina superior izquierda de la interfaz principal de usuario:

**Figura 98***Opción para correr el programa*

11) Cuando el tiempo de la toma de datos haya terminado se dará clic derecho en el botón stop, lo cual detendrá por completo el programa:

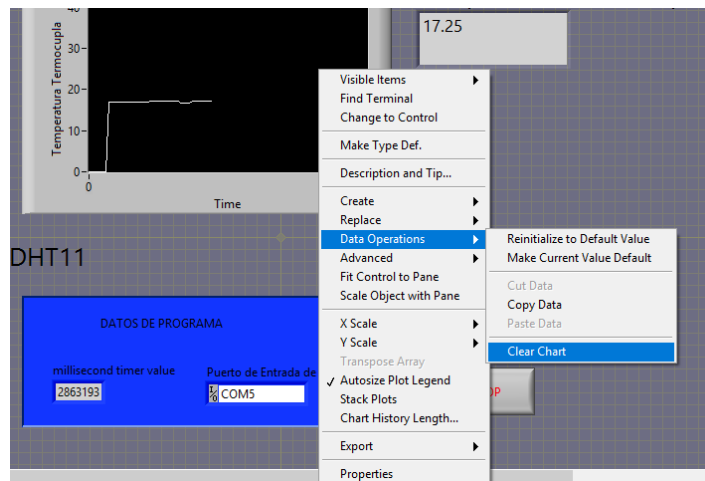
**Figura 99***Detener el programa*

12) Es importante saber que para realizar otra toma de datos se deberá resetearlos a los wave chart de gráficos y los indicadores de valores y para eso se seguirá los siguientes pasos:

- 12.1) Clic derecho sobre el WaveChart o la ventana del gráfico.
- 12.2) Clic izquierdo en “Data Operations”.
- 12.3) Clic izquierdo en “Clear Chart”.

### Figura 100

#### *Limpiar los gráficos*



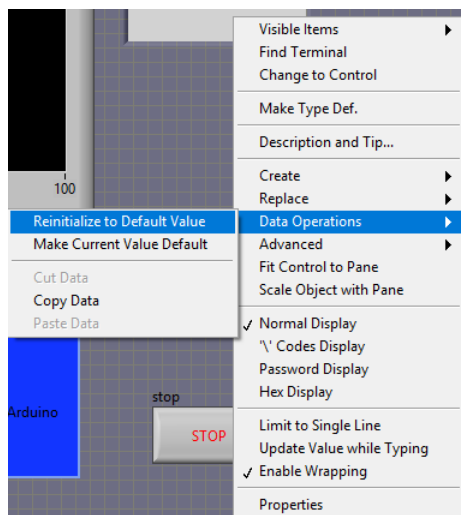
Esto permitirá generar nueva toma de datos y apreciarlos de mejor manera en el wave chart (graficas).

13) Para resetear los indicadores de valores se realizan los siguientes pasos:

- 13.1) Clic derecho sobre el indicador de valor.
- 13.2) Clic izquierdo en “Data Operations”.
- 13.3) Clic izquierdo en “Reinitialize to default Value”.

**Figura 101**

*Limpiar los indicadores de valor*



- 14) Después de esto procedemos a dar clic izquierdo en “RUN”, dando inicio a que se generen nuevos archivos con la configuración ya pre establecido.

## **Anexo D**

### **Balance de flujo del calorímetro adiabático**

El equipo también puede ser utilizado para determinar la capacidad calorífica de varios elementos sólidos y/o líquidos de los cuales no se conoce tal propiedad, por lo tanto, es necesario conocer esta característica del calorímetro adiabático.

Los siguientes cálculos determinan su valor, realizando un ensayo con agua destilada y conociendo varias propiedades de la misma.

El balance del flujo de calor se expresa de la siguiente ecuación: (Cengel & Boles, 2011)

Siendo

$q$  = energía

$$q_{total} = 0 \quad (14)$$

$$q_{absorbido} + q_{cedido} = 0 \quad (15)$$

$$q_{\text{absorbido}} = q_{\text{cedido}} \quad (16)$$

La capacidad calorífica es la cantidad de energía necesaria para elevar en 1 °C la temperatura de un sistema, y evidencia el calor absorbido o cedido durante el proceso.

Basándose en la fórmula del calor

$$q = m * c_e * \Delta T \quad (17)$$

Siendo

$$m = \text{masa}$$

$$c_a = \text{capacidad calorífica}$$

$$\Delta T = \text{Variación de temperatura}$$

A partir de la ecuación (16) se deduce la siguiente ecuación:

$$q_{\text{absorbido por agua fría}} + q_{\text{absorbido por calorímetro}} = q_{\text{cedido por agua caliente}} \quad (18)$$

Reemplazando la ecuación (17) en la ecuación (18), se obtiene la consecuente expresión:

$$m_1 * c_a * \Delta T + c_{\text{cal}} * \Delta T = m_2 * c_a * \Delta T \quad (19)$$

Ampliando la ecuación se obtiene:

$$m_1 * c_a * (T_f - T_1) + c_{\text{cal}} * (T_f - T_1) = m_2 * c_a * (T_2 - T_f) \quad (20)$$

Si  $T_f > T_1$ , entonces  $q > 0$ , es decir el sistema absorbe calor

Si  $T_f < T_2$ , entonces  $q > 0$ , es decir el sistema cede calor

Siendo

$$m_1 = \text{masa del agua fría}$$

$$m_2 = \text{masa del agua caliente}$$

$$c_a = \text{capacidad calorífica del agua } 1 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$$

$$T_1 = \text{temperatura inicial del agua fría}$$

$$T_2 = \text{temperatura inicial del agua caliente}$$

$$T_f = \text{temperatura de equilibrio}$$

Para determinar la capacidad calorífica del calorímetro se realiza una prueba experimental, introduciendo 50 gr de agua destilada en el calorímetro, al cerrar todas las tapas, y esperar por un minuto se toma la temperatura mediante el software.

Posteriormente se añade 50 gramos de agua destilada calentada previamente a 80°C a la cantidad anterior de agua en el calorímetro y se mezclan ambos líquidos; y después de un minuto se mide la temperatura.

Los datos adquiridos son:

$$m_1 = 50 \text{ g}$$

$$m_2 = 50 \text{ g}$$

$$c_a = 1 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$$

$$T_1 = 19.5^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 63^\circ\text{C}$$

$$T_f = 33^\circ\text{C}$$

Despejando la capacidad calorífica de la ecuación (20) se obtiene:

$$c_{cal} = \frac{m_2 * c_a * (T_2 - T_f) - m_1 * c_a * (T_f - T_1)}{(T_f - T_1)} \quad (21)$$

Reemplazando los valores en la ecuación (21) se obtiene:

$$c_{cal} = \frac{50 \text{ g} * 1 \text{ cal/g}^\circ\text{C} * (63 - 33) - 50 \text{ g} * 1 \text{ cal/g}^\circ\text{C} * (33 - 19.5)}{(33 - 19.5)} \quad (22)$$

$$c_{cal} = 61.11 \text{ cal/g}^\circ\text{C} \quad (23)$$