



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y
MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA: CARACTERIZACIÓN DE LA INFLUENCIA DE
BIOMASAS ECUATORIANAS SOBRE LA HIDRATACIÓN DEL
CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO.**

AUTOR: AGUILAR SÁNCHEZ, ANDREA PAOLA

DIRECTOR: ING. QUEZADA, PATRICIO

SANGOLQUÍ, NOVIEMBRE 2015



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 BIOMASAS ECUATORIANAS SOBRE LA HIDRATACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO**” fue realizado en su totalidad por la señorita **ANDREA PAOLA AGUILAR SÁNCHEZ**, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniero Mecánico.

Sangolquí, 19 de noviembre del 2015

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Patricio', is written over a horizontal line.

Ing. Patricio Quezada Morales

DIRECTOR



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **ANDREA PAOLA AGUILAR SÁNCHEZ**, con cédula de identidad N° 1719232298, declaro que este trabajo de titulación “**CARACTERIZACIÓN DE LA INFLUENCIA DE BIOMASAS ECUATORIANAS SOBRE LA HIDRATACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO**” ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es de mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Sangolquí, 19 de noviembre del 2015

ANDREA PAOLA AGUILAR SÁNCHEZ

C.C. 1719232298



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

AUTORIZACIÓN

Yo, **ANDREA PAOLA AGUILAR SÁNCHEZ**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca Virtual de la institución el presente trabajo de titulación “**CARACTERIZACIÓN DE LA INFLUENCIA DE BIOMASAS ECUATORIANAS SOBRE LA HIDRATACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO**” cuyo contenido, ideas y criterios son de mi autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 19 de noviembre del 2015



ANDREA PAOLA AGUILAR SÁNCHEZ

C.C. 1719232298

DEDICATORIA

El presente proyecto está dedicado a Dios, quien ha sabido guiarme por el camino del bien y brindándome siempre fortaleza para no desmayar.

A mis padres Edmundo y Angelita, quienes supieron apoyarme cuando más lo necesite y ser una guía para llegar a culminar mi carrera profesional.

A mis hermanas Cristina y Tamara, quienes con sus consejos y enseñanzas me han brindado apoyo y aliento para seguir adelante.

A mis sobrinos Diego y Luciana, que con sus locuras y travesuras han alegrado mis días.

A mis abuelitos Ercilia, Amable, Clemencia y Eduardo quienes desde el cielo me llenan de bendiciones y de los cuales llevo un dulce recuerdo de su gran ejemplo de vida.

A mis amigos, familiares y docentes porque me han brindado su apoyo incondicional.

ANDREA PAOLA AGUILAR SÁNCHEZ

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, quien me ha dado la vida y me ha permitido tener una de las mejores bendiciones que son mis padres, los cuales con su paciencia y amor me han formado con valores tanto éticos, como morales, dándome así fuerzas para alcanzar una meta soñada.

Mis más sinceros agradecimientos al Doctor Leonardo Goyos, Ingeniero Patricio Quezada, quienes con sus conocimientos y su total desinterés colaboraron para el desarrollo y ejecución de éste proyecto de grado.

A mi familia y amigos en general, por la presencia de su apoyo y amistad incondicional. Gracias por cada uno de los momentos compartidos durante mi etapa universitaria.

ANDREA PAOLA AGUILAR SÁNCHEZ

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABLAS	xv
ÍNDICE DE CUADROS	xvi
RESUMEN	xvii
ABSTRACT	xviii

CAPÍTULO I

GENERALIDADES	1
1.1. ANTECEDENTES.....	1
1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.3. OBJETIVOS.....	4
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	4
1.3.2. OBJETIVO ESPECÍFICO.....	4
1.4. JUSTIFICACIÓN.....	5
1.5. ALCANCE.....	6

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO	7
2.1. PRELIMINARES HISTÓRICOS DEL CEMENTO PORTLAND.....	7
2.2. DEFINICIÓN DEL CEMENTO.....	9
2.3. FABRICACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND.....	10

2.4.	CARACTERÍSTICAS ESENCIALES DEL CEMENTO	14
2.4.1.	COMPOSICIÓN QUÍMICA	14
2.4.2.	FINURA.....	15
2.5.	PROPIEDADES DEL CEMENTO HIDRATADO	18
2.5.1.	HIDRATACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND	18
2.5.1.1.	ETAPAS DE LA HIDRATACIÓN	20
2.5.1.2.	REPRESENTACIÓN DE LAS ETAPAS DE HIDRATACIÓN	21
2.5.1.3.	AGUA EN LA HIDRATACIÓN DE LOS CEMENTOS.....	22
2.5.2.	FRAGUADO.....	23
2.5.3.	CONSISTENCIA	25
2.5.4.	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	25
2.6.	TIPOS DE CEMENTOS	25
2.6.1.	CEMENTOS PORTLAND	25
2.6.2.	CEMENTOS HIDRÁULICOS COMPUESTOS	27
2.6.3.	CEMENTOS HIDRÁULICOS POR DESEMPEÑO.....	28
2.7.	CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO	29
2.7.1.	DEFINICIÓN DE PUZOLANA	30
2.7.2.	PRELIMINARES HISTÓRICOS DEL CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO.....	31
2.7.3.	FABRICACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO	32
2.7.4.	TIPOS DE PUZOLANAS.....	36
2.7.4.1.	PUZOLANAS NATURALES.....	36
2.7.4.2.	PUZOLANAS ARTIFICIALES	36
2.7.5.	VENTAJAS DEL USO DE PUZOLANA.....	37
2.8.	USO DE LA BIOMASA EN ECUADOR.....	38
2.8.1.	RAQUIS DE PALMA AFRICANA	42
2.8.2.	RAQUIS DE PLÁTANO.....	43
2.8.3.	CASCARILLA DE CACAO	45
2.8.4.	CASCARILLA DE CAFÉ	46
2.8.5.	BAGAZO DE CAÑA	48
2.8.6.	GUADÚA.....	49

CAPÍTULO III

MÉTODO DE ENSAYO	51	
3.1.	APARATO CALORIMÉTRICO	51
3.1.1.	CALORÍMETRO	51
3.1.2.	PRIMER RECIPIENTE DE AISLAMIENTO.....	52

3.1.3.	SEGUNDO RECIPIENTE DE AISLAMIENTO.....	52
3.1.4.	TERCER RECIPIENTE DE AISLAMIENTO.....	53
3.1.5.	ELEMENTOS ESTRUCTURALES.....	54
3.1.6.	ELEMENTOS AISLANTES	54
3.1.7.	SENSORES	55
3.2.	DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD CALORÍFICA DEL CALORÍMETRO.....	56
3.3.	MATERIALES	58
3.4.	PROCEDIMIENTO.....	62
3.4.1.	PREPARACIÓN DE LA PASTA DE CEMENTO.....	62
3.4.2.	PREPARACIÓN DE LA BIOMASA	63
3.4.3.	PREPARACIÓN DE LA PASTA DE CEMENTO CON BIOMASA .	64
3.5.	CALIBRACIÓN DEL EQUIPO.....	67
3.5.1.	PRUEBA PILOTO CON AGUA DESTILADA	67
3.5.2.	PRUEBA PILOTO CON PASTA AGLUTINANTE.....	69
3.6.	ENSAYOS REALIZADOS	71
3.6.1.	CEMENTO PORTLAND.....	71
3.6.2.	CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO TIPO IP.....	73
3.6.3.	RAQUIS DE PALMA AFRICANA	75
3.6.4.	RAQUIS DE PLÁTANO.....	77
3.6.5.	CASCARILLA DE CACAO	79
3.6.6.	CASCARILLA DE CAFÉ	81
3.6.7.	BAGAZO DE CAÑA	83
3.6.8.	GUADÚA.....	85
3.7.	ENSAYOS REALIZADOS ADICIONALES	87
3.7.1.	GUADÚA.....	87
3.7.2.	BAGAZO DE CAÑA	89

CAPÍTULO IV

	PROCESAMIENTO DE DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	90
4.1.	PROCESAMIENTO DE DATOS	90
4.1.1.	CURVAS DE HIDRATACIÓN.....	90
4.1.1.1.	CEMENTO PORTLAND.....	90
4.1.1.2.	CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO TIPO IP.....	92
4.1.1.3.	RAQUIS DE PALMA AFRICANA	93
4.1.1.4.	RAQUIS DE PLÁTANO.....	96
4.1.1.5.	CASCARILLA DE CACAO	99

4.1.1.6.	CASCARILLA DE CAFÉ	102
4.1.1.7.	BAGAZO DE CAÑA	105
4.1.1.8.	GUADÚA.....	108
4.1.2.	CURVAS DE TEMPERATURA DE AISLAMIENTO	111
4.1.2.1.	CEMENTO PORTLAND.....	111
4.1.2.2.	CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO TIPO IP.....	112
4.1.2.3.	RAQUIS DE PALMA AFRICANA	113
4.1.2.4.	RAQUIS DE PLÁTANO.....	116
4.1.2.5.	CASCARILLA DE CACAO	119
4.1.2.6.	CASCARILLA DE CAFÉ	122
4.1.2.7.	BAGAZO DE CAÑA	125
4.1.2.8.	GUADÚA.....	128
4.2.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	131
4.2.1.	CURVAS DE HIDRATACIÓN.....	131
4.2.2.	CURVAS DE TEMPERATURA DE AISLAMIENTO	134
4.2.3.	ÍNDICE DEL RETARDO RELATIVO DEL TIEMPO	134
4.2.4.	ÍNDICE DE LA DISMINUCIÓN RELATIVA DE TEMPERATURA	137
4.2.5.	ÍNDICE DE LA PENDIENTE MÁXIMA RELATIVA.....	140
4.2.6.	ÍNDICE DE COMPATIBILIDAD.....	144
4.3.	RESUMEN DE RESULTADOS	147

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE COSTOS	150
---------------------------------	------------

5.1.	COSTOS DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	150
------	--	-----

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	152
--	------------

6.1.	CONCLUSIONES	152
------	--------------------	-----

6.2.	RECOMENDACIONES	154
------	-----------------------	-----

BIBLIOGRAFÍA.....	156
--------------------------	------------

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Casas ancestrales hechas de carrizo y adobe – Cantón de Píllaro.....	1
Figura 2.	Porcentaje del total de familias que poseen viviendas en América Latina y el Caribe	3
Figura 3.	Faro de Eddystone en el puerto de Plymouth – Inglaterra	7
Figura 4.	Esquema de integración del concreto	9
Figura 5.	Cintas transportadoras de la empresa Lafarge de Villaluenga de la Sagra en Madrid – España	10
Figura 6.	Molido de crudo de la empresa Lafarge de Villaluenga de la Sagra en Madrid – España	11
Figura 7.	Producción del cemento por regiones años 2008 – 2012	12
Figura 8.	Comercialización mensual en Ecuador años 2006 – 2014	13
Figura 9.	Comercialización por regiones en Ecuador año 2012.....	13
Figura 10.	Finura por turbidímetro.....	17
Figura 11.	Finura por permeabilidad al aire.....	17
Figura 12.	Etapas en el fraguado y endurecimiento del Cemento Portland	21
Figura 13.	Representación de las etapas de hidratación	22
Figura 14.	Aparato de Vicat para medida del tiempo de fraguado	24
Figura 15.	Agujas de Gillmore para medida del tiempo de fraguado	24
Figura 16.	Coliseo y Panteón en Roma – Italia	31
Figura 17.	Minas de Selva Alegre en el Valle de Intag – Provincia de Imbabura.....	32
Figura 18.	Chimenea vertical en las Minas de Selva Alegre - Provincia de Imbabura.....	33
Figura 19.	Planta Lafarge Selva Alegre en Otavalo – Provincia de Imbabura.....	34
Figura 20.	Clasificación de las fuentes de biomasa	39
Figura 21.	Mapa de la distribución geográfica de biomasa de desechos agropecuarios	41
Figura 22.	Racimos de Palma Africana (<i>Elaeis guineensis</i>).....	42
Figura 23.	Raquis de Palma Africana seca	43
Figura 24.	Partes de Planta de Plátano (<i>Musa Balbisiana</i>).....	44
Figura 25.	Raquis de plátano seco.....	44
Figura 26.	Partes del Cacao (<i>Theobroma cacao</i> L.)	45
Figura 27.	Cascarilla de cacao seca	46
Figura 28.	Composición del fruto del café (<i>Coffea arabica</i>)	47
Figura 29.	Cascarilla de café seca	47
Figura 30.	Partes de la Caña de Azúcar (<i>Saccharum officinarum</i>)	48
Figura 31.	Bagazo de caña de azúcar con cáscara seco.....	49

Figura 32.	Partes del Bambú (<i>Saccharum officinarum</i>).....	50
Figura 33.	Fibras de Guadúa seca.....	50
Figura 34.	Calorímetro para medir temperatura en un sistema cuasi adiabático	51
Figura 35.	Primer recipiente de aislamiento	52
Figura 36.	Segundo recipiente de aislamiento	53
Figura 37.	Tercer recipiente de aislamiento	53
Figura 38.	Elementos estructurales del calorímetro	54
Figura 39.	Esquema Arduino – Interfaz HMI	56
Figura 40.	Cemento portland puzolánico tipo IP Lafarge – Selva Alegre .	59
Figura 41.	Vaso de precipitación y varilla de agitación de vidrio	60
Figura 42.	Agua destilada	60
Figura 43.	Materiales necesarios para la toma de datos.....	61
Figura 44.	Balanza marca CAMRY	62
Figura 45.	Interfaz HMI, para la observación de parámetros e interacción con el usuario	63
Figura 46.	Esquema a seguir para la preparación de mezclas	66
Figura 47.	Medición del agua destilada con termómetro de mercurio	67
Figura 48.	Resultados en la interfaz HMI con el agua destilada	69
Figura 49.	Medición de la pasta de cemento con el termómetro de mercurio.....	70
Figura 50.	Resultados en la interfaz HMI con la pasta de cemento	71
Figura 51.	Pasta de cemento portland	72
Figura 52.	Tapa del primer recipiente de aislamiento con gotas de vapor saturado.....	73
Figura 53.	Pasta de cemento portland puzolánico tipo IP	74
Figura 54.	Calorímetro con vapor saturado.....	74
Figura 55.	Pasta con raquis de palma africana seca y cemento portland puzolánico tipo IP.....	75
Figura 56.	Pasta con raquis de palma africana húmeda y cemento portland puzolánico tipo IP.....	76
Figura 57.	Pasta con raquis de palma africana húmeda y cemento portland.....	77
Figura 58.	Pasta con raquis de plátano seco y cemento portland puzolánico tipo IP	78
Figura 59.	Pasta con raquis de plátano húmedo y cemento portland puzolánico tipo IP	78
Figura 60.	Pasta con raquis de plátano húmedo y cemento portland	79
Figura 61.	Pasta con cascarilla de cacao seca y cemento portland puzolánico tipo IP	80
Figura 62.	Pasta con cascarilla de cacao húmeda y cemento portland puzolánico tipo IP	80

Figura 63.	Pasta con cascarilla de cacao húmeda y cemento portland ...	81
Figura 64.	Pasta con cascarilla de café seca y cemento portland puzolánico tipo IP	82
Figura 65.	Pasta con cascarilla de café húmeda y cemento portland puzolánico tipo IP	82
Figura 66.	Pasta con cascarilla de café húmeda y cemento portland	83
Figura 67.	Pasta con bagazo de caña seco y cemento portland puzolánico tipo IP	84
Figura 68.	Pasta con bagazo de caña húmedo y cemento portland puzolánico tipo IP	84
Figura 69.	Pasta con bagazo de caña húmedo y cemento portland	85
Figura 70.	Pasta con guadúa seca y cemento portland puzolánico tipo IP.....	86
Figura 71.	Pasta con guadúa húmeda y cemento portland puzolánico tipo IP.....	86
Figura 72.	Pasta con guadúa húmeda y cemento portland	87
Figura 73.	Pasta con guadúa húmeda y cemento portland puzolánico tipo IP con adición de más agua a la mezcla.....	87
Figura 74.	Pasta con guadúa húmeda y adición de más cemento portland puzolánico tipo IP a la mezcla.....	88
Figura 75.	Pasta con cemento portland puzolánico tipo IP y disminución de guadúa seca en la mezcla	89
Figura 76.	Pasta con cemento portland y adición de más bagazo de caña seco en la mezcla	89
Figura 77.	Curva de hidratación del Cemento Portland	91
Figura 78.	Curva de hidratación del Cemento Portland Puzolánico tipo IP.....	92
Figura 79.	Curva de hidratación del Cemento Portland con raquis de palma húmeda	93
Figura 80.	Curva de hidratación del Cemento Portland Puzolánico tipo IP con raquis de palma seca.....	94
Figura 81.	Curva de hidratación del Cemento Portland Puzolánico tipo IP con raquis de palma húmeda	95
Figura 82.	Curva de hidratación del Cemento Portland con raquis de plátano húmedo	96
Figura 83.	Curva de hidratación del Cemento Portland Puzolánico tipo IP con raquis de plátano seco.....	97
Figura 84.	Curva de hidratación del Cemento Portland Puzolánico tipo IP con raquis de plátano húmedo.....	98
Figura 85.	Curva de hidratación del Cemento Portland con cascarilla de cacao húmeda	99

Figura 86.	Curva de hidratación del Cemento Portland Puzolánico tipo IP con cascarilla de cacao seca	100
Figura 87.	Curva de hidratación del Cemento Portland Puzolánico tipo IP con cascarilla de cacao húmeda.....	101
Figura 88.	Curva de hidratación del Cemento Portland con cascarilla de café húmeda	102
Figura 89.	Curva de hidratación del Cemento Portland Puzolánico tipo IP con cascarilla de café seca.....	103
Figura 90.	Curva de hidratación del Cemento Portland Puzolánico tipo IP con cascarilla de café húmeda	104
Figura 91.	Curva de hidratación del Cemento Portland con bagazo de caña húmedo	105
Figura 92.	Curva de hidratación del Cemento Portland Puzolánico tipo IP con bagazo de caña seco.....	106
Figura 93.	Curva de hidratación del Cemento Portland Puzolánico tipo IP con bagazo de caña húmedo	107
Figura 94.	Curva de hidratación del Cemento Portland con guadúa húmeda.....	108
Figura 95.	Curva de hidratación del Cemento Portland Puzolánico tipo IP con guadúa seca	109
Figura 96.	Curva de hidratación del Cemento Portland Puzolánico tipo IP con guadúa húmeda	110
Figura 97.	Curva de Temperatura de Aislamiento del Cemento Portland	111
Figura 98.	Curva de Temperatura de Aislamiento del Cemento Portland Puzolánico tipo IP.....	112
Figura 99.	Curva de Temperatura de Aislamiento del Cemento Portland con raquis de palma húmeda	113
Figura 100.	Curva de Temperatura de Aislamiento del Cemento Portland Puzolánico tipo IP con raquis de palma seca	114
Figura 101.	Curva de Temperatura de Aislamiento del Cemento Portland Puzolánico tipo IP con raquis de palma húmeda....	115
Figura 102.	Curva de Temperatura de Aislamiento del Cemento Portland con raquis de plátano húmedo	116
Figura 103.	Curva de Temperatura de Aislamiento del Cemento Portland Puzolánico tipo IP con raquis de plátano seco	117
Figura 104.	Curva de Temperatura de Aislamiento del Cemento Portland Puzolánico tipo IP con raquis de plátano húmedo..	118
Figura 105.	Curva de Temperatura de Aislamiento del Cemento Portland con cascarilla de cacao húmeda	119
Figura 106.	Curva de Temperatura de Aislamiento del Cemento Portland Puzolánico tipo IP con cascarilla de cacao seca	120

Figura 107. Curva de Temperatura de Aislamiento del Cemento Portland Puzolánico tipo IP con cascarilla de cacao húmeda.....	121
Figura 108. Curva de Temperatura de Aislamiento del Cemento Portland con cascarilla de café húmeda	122
Figura 109. Curva de Temperatura de Aislamiento del Cemento Portland Puzolánico tipo IP con cascarilla de café seca.....	123
Figura 110. Curva de Temperatura de Aislamiento del Cemento Portland Puzolánico tipo IP con cascarilla de café húmeda..	124
Figura 111. Curva de Temperatura de Aislamiento del Cemento Portland con bagazo de caña húmedo	125
Figura 112. Curva de Temperatura de Aislamiento del Cemento Portland Puzolánico tipo IP con bagazo de caña seco	126
Figura 113. Curva de Temperatura de Aislamiento del Cemento Portland Puzolánico tipo IP con bagazo de caña húmedo....	127
Figura 114. Curva de Temperatura de Aislamiento del Cemento Portland con guadúa húmeda.....	128
Figura 115. Curva de Temperatura de Aislamiento del Cemento Portland Puzolánico tipo IP con guadúa seca.....	129
Figura 116. Curva de Temperatura de Aislamiento del Cemento Portland Puzolánico tipo IP con guadúa húmeda	130
Figura 117. Resultados del Índice del retardo relativo del tiempo para el cemento portland	135
Figura 118. Resultados del Índice del retardo relativo del tiempo para el cemento portland puzolánico tipo IP	136
Figura 119. Resultados del Índice de la disminución relativa de temperatura del cemento portland	138
Figura 120. Resultados del Índice de la disminución relativa de temperatura para el cemento portland puzolánico tipo IP.....	140
Figura 121. Resultados del Índice de la pendiente máxima relativa para el cemento portland	142
Figura 122. Resultados del Índice de la pendiente máxima relativa para el cemento portland puzolánico tipo IP	143
Figura 123. Resultados del Índice de compatibilidad para el cemento portland.....	145
Figura 124. Resultados del Índice de compatibilidad para el cemento portland puzolánico tipo IP.....	147

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Normas de Cementos.....	8
Tabla 2.	Compuestos principales del cemento portland	14
Tabla 3.	Reacciones químicas principales durante la hidratación del cemento	19
Tabla 4.	Composiciones típicas de compuestos de cemento portland .	27
Tabla 5.	Comercialización del cemento gris anual por empresa años 2000 – 2012.....	35
Tabla 6.	Potencial de Biomasa en Ecuador.....	40
Tabla 7.	Resultados del Índice del retardo relativo del tiempo para el cemento portland	135
Tabla 8.	Resultados del Índice del retardo relativo del tiempo para el cemento portland puzolánico tipo IP	136
Tabla 9.	Resultados del Índice de la disminución relativa de temperatura para el cemento portland.....	138
Tabla 10.	Resultados del Índice de la disminución relativa de temperatura para el cemento portland puzolánico tipo IP.....	139
Tabla 11.	Resultados del Índice de la pendiente máxima relativa para el cemento portland	142
Tabla 12.	Resultados del Índice de la pendiente máxima relativa para el cemento portland puzolánico tipo IP	143
Tabla 13.	Resultados del Índice de compatibilidad para el cemento portland.....	145
Tabla 14.	Resultados del Índice de compatibilidad para el cemento portland puzolánico tipo IP.....	146
Tabla 15.	Resumen de resultados para el cemento portland	147
Tabla 16.	Resumen de resultados para el cemento portland puzolánico tipo IP	148
Tabla 17.	Costos totales del proyecto de investigación.....	150
Tabla 18.	Financiamiento del proyecto de investigación	151

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.	Equivalencias de los diferentes tipos de cementos	29
Cuadro 2.	Empresas Cementeras en Ecuador.....	35

RESUMEN

Los residuos industriales agrícolas son uno de los mayores problemas que enfrenta el país, las biomásas de mayor presencia en el Ecuador y con las que se generan los ensayos respectivos son el raquis de palma africana, raquis de plátano, cascarilla de cacao, cascarilla de café, bagazo de caña y guadúa. El campo de los materiales es una solución para el aprovechamiento de los mismos, con la combinación de cemento y biomasa con propiedades físicas, químicas y térmicas diferentes. El solo hecho de mezclarlos se producen cambios significativos en la cinética de la hidratación del aglomerante, lo que hace que se generen reacciones químicas exotérmicas y por ende un desprendimiento de calor. Para que la combinación de cemento y biomasa genere propiedades aceptables, es necesario analizar la compatibilidad entre los mismos, donde se determina en base a las curvas de hidratación, si el proceso químico de endurecimiento del cemento con biomasa es o no interferido, si es interferido mínimamente se dice entonces que existe compatibilidad entre la biomasa y el cemento. Para la determinación de las curvas de hidratación se determina el comportamiento de la biomasa tanto seca, como húmeda con el cemento portland y puzolánico, mediante un calorímetro cuasi adiabático. La masa del cemento a utilizar es de 150 gr., masa de biomasa 11 gr., masa de H₂O 60 gr. (Relación de 1:0,073:0,4). Las biomásas más compatibles con el cemento portland y el puzolánico son la cascarilla de cacao y el bagazo de caña, respectivamente.

PALABRAS CLAVES:

- **CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO**
- **CURVAS DE HIDRATACIÓN**
- **BIOMASAS ECUATORIANAS**
- **ÍNDICE DE COMPATIBILIDAD**

ABSTRACT

The industrial agricultural waste is one of the bigger problems that face the country. The biomasses of major presence in the Ecuador (which the respective tests are generating) are African palm rachis, banana rachis, cocoa husk, coffee husk, cane bagasse and bamboo. The field of material science is a solution to take advantage of thereof, with the combination of cement and biomass with physical properties, chemical and different thermics. The only fact of mixing them produces significant changes in the hydration kinetics of the binder, which generates chemical exothermic reactions and thus giving off heat. To generate acceptable properties with the combination of cement and biomass, it is necessary to analyze the compatibility between them which is determined based on the hydration curves. If the chemical process of hardening of the cement with biomass is not interfered, the compatibility doesn't exist. But if it is interfered minimally, it does exist. To determine the hydration curves, the behavior of both dry biomass and wet biomass with Portland cement and pozzolan, is determined by a quasi-adiabatic calorimeter. The mass of the cement to use is 150 gr., mass of biomass 11 gr., and mass of H₂O 60 gr. (Relation of 1:0,073:0,4). The most compatible biomasses with the pozzolan cement and portland cement are respectively the cocoa husk and the cane bagasse.

KEYWORDS:

- **PUZZOLAN CEMENT**
- **HYDRATION CURVES**
- **ECUADORIAN BIOMASS**
- **COMPATIBILITY INDEX**

CAPÍTULO I

GENERALIDADES

1.1. ANTECEDENTES

En construcciones de bajo costo, tanto ancestrales como actuales es muy común el uso de adobes reforzados con diferentes biomasas, se debe recalcar que ésta práctica ha continuado tomando existencia en diferentes partes del Ecuador. Con el terremoto que sufrió Ecuador el 31 de Enero de 1906, se vieron afectadas seriamente varias viviendas, muchas de ellas constituidas por bloques de barro, a raíz de dicho antecedente se procedieron a dar lugar a investigaciones más profundas acerca de los materiales conformados en las construcciones de viviendas.



Figura 1. Casas ancestrales hechas de carrizo y adobe – Cantón de Píllaro

Fuente: (Barriga, 2012)

De otra manera, las consecuencias del sismo del 15 de agosto de 2007 en Perú, provocó la realización de estudios pertinentes para mejorar el reforzamiento de las construcciones de adobe empleando materiales

naturales, uno de los cuales es el refuerzo con Malla de Junco (J. Bufonius L.), planta que crece en las zonas húmedas de dicho país, y cuya resistencia ha sido comprobada mediante ensayos cíclicos. (Méndez, 2014)

Por otra parte en el continente Europeo se ha venido usando desde ya algún tiempo atrás gran cantidad de cemento portland con adiciones puzolánicas o cementantes, gracias a la misma que se encuentra en Puzol, Italia. Es así que en Italia se desarrolló las primeras construcciones con cementos hidráulicos, como el Coliseo y el Panteón en Roma. Ferrari, por otra parte, desde un punto de vista teórico, ha experimentado el método de dosificación, el cual comprende un valor de corrección referido al porcentaje de cal que el cemento puede perder eventualmente durante la primera época de curado en agua. (Cotera, 2014)

En América Latina la industria del cemento se da a conocer a principios del siglo XX, y principalmente en Ecuador la primera fábrica que inicio su producción fue en el año de 1923, con 3.000 toneladas/año, en Guayaquil, por el Ingeniero José Rodríguez Bonín, con la marca Cóndor.

Hoy por hoy, en Ecuador se encuentra vigente la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 490, equivalente a la Norma Internacional ASTM C595, donde se especifica los requisitos a cumplir para los cementos hidráulicos compuestos.

1.2. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El uso de biomásas como aditivos en los morteros influye sobre la dinámica de endurecimiento del mismo y no existen datos acerca del efecto de muchas biomásas ecuatorianas, como es el caso de raquis de palma

africana, raquis de plátano, cascarilla de cacao, cascarilla de café, bagazo de caña, guadúa, sobre el cemento portland puzolánico, el cual es característico propio del país, esto permitiría producir bloques de construcción con menor costo, mayor capacidad aislante y menor daño sobre el medio ambiente.

Por otro lado, en cuanto a la vivienda, América Latina y el Caribe enfrentan un considerable y creciente déficit habitacional, por lo que en Ecuador, tan solo el 50% del total de familias posee vivienda. El mejoramiento de las condiciones de vivienda es parte de la lucha contra la pobreza, debido a que si se mejoran las condiciones de habitabilidad se satisface una de las necesidades básicas de los pobladores de menores recursos.

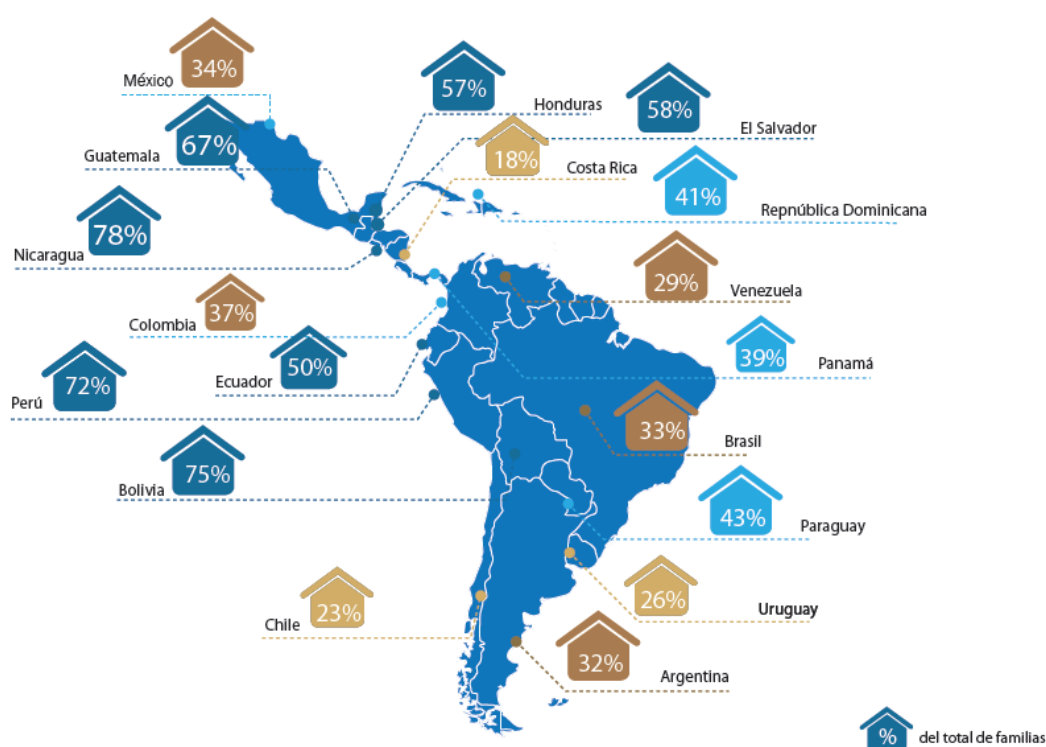


Figura 2. Porcentaje del total de familias que poseen viviendas en América Latina y el Caribe

Fuente: (INECYC, 2006)

Además cabe recalcar que el crecimiento de la demanda de residuos industriales de biomasa vegetal es cada vez mayor, por lo que se ha ido incrementado cada año, y esto hace que se genere un importante problema ambiental. Así mismo, algunos residuos son quemados, para ser usados como fertilizantes, pero esto a su vez crea un grave problema de contaminación atmosférica.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

- Determinar la influencia que poseen las diferentes biomásas provenientes de raquis de palma africana, raquis de plátano, cascarilla de cacao, cascarilla de café, bagazo de caña y guadúa en presencia del cemento portland puzolánico.

1.3.2. OBJETIVO ESPECÍFICO

- Determinar las curvas de hidratación del cemento portland puzolánico en combinación con biomásas ecuatorianas provenientes de raquis de palma africana, raquis de plátano, cascarilla de cacao, cascarilla de café, bagazo de caña, guadúa, que son de amplia presencia en el país.
- Determinar los índices del retardo relativo del tiempo, índices de la disminución relativa de la temperatura, índices de la pendiente máxima relativa y los índices de compatibilidad tanto del cemento portland como del cemento portland puzolánico.
- Establecer el método de ensayo para la determinación de las curvas de hidratación en el calorímetro para medir temperatura en un sistema cuasi

adiabático, el mismo que se encuentra en el laboratorio de termodinámica del DECEM.

- Calibrar un calorímetro para la determinación de la evolución del calor de reacción del cemento durante su hidratación.

1.4. JUSTIFICACIÓN

El cemento continuará siendo el material básico para la construcción de las viviendas de amplios sectores de la población, por ser una materia pulverulenta, que amasada con agua se endurece y permite unir cuerpos sólidos, por ésta razón es necesario conocer el efecto que provocan las diferentes biomásas sobre el curado del mismo, esto permitiría producir bloques de construcción con menor costo y menor daño sobre el medio ambiente.

Se cabe recalcar que el cemento portland puzolánico posee un menor costo que el correspondiente portland normal, por cuanto se ha reemplazado un elevado porcentaje de cemento por puzolana que tiene un costo de fabricación muy inferior, y el realizar análisis previos sobre la influencia de biomásas ecuatorianas, los costos pueden reducirse aún más.

Adicional a ello, la durabilidad es la clave del éxito en cualquier tipo de obra civil. Las estructuras que se fabrican no solo deben ser resistentes a las sollicitaciones inmediatas, sino que deben permanecer estables y resistentes durante algún tiempo, combatiendo a los agentes agresivos, ya sea la intemperie, los cambios climáticos, desechos industriales, etc. Además los hormigones locales deben enfrentar la reactividad de ciertos agregados con los álcalis del cemento que, en nuestro medio, lastimosamente, es muy

frecuente y puede provocar grandes deterioros inclusive hasta la total destrucción de las estructuras de hormigón.

La Constitución de la República del Ecuador señala que la vivienda es uno de los derechos fundamentales de los seres humanos. Así, en el Título II.- Derechos.- Capítulo II.- Derechos del Buen Vivir.- Sección Sexta.- Hábitat y Vivienda, el artículo 30 indica que: “Las personas tienen derecho a un hábitat seguro y saludable, y a una vivienda adecuada y digna, con independencia de su situación social y económica.” (OMPI, 2015)

1.5. ALCANCE

Desarrollar la caracterización de la influencia de biomásas ecuatorianas provenientes de raquis de palma africana, raquis de plátano, cascarilla de cacao, cascarilla de café, bagazo de caña y guadúa, sobre la hidratación del cemento portland puzolánico, el cual es característico del país, mediante la calibración y utilización de un calorímetro para medir temperatura en un sistema adiabático, estableciendo así protocolos de ensayos y determinando la influencia de cada biomasa en el proceso.

El presente proyecto será desarrollado en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, en el Laboratorio de Termodinámica del DECEM, como parte del Sistema de Educación Superior, la cual es una institución con personería jurídica, autonomía administrativa y patrimonio propio, de derecho público, en la cual se realizarán actividades de investigación para el respectivo análisis de la determinación de la evolución del calor de reacción del cemento durante su hidratación. A partir de los resultados obtenidos en este análisis, se evaluará la influencia de diferentes biomásas sobre dicho proceso.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. PRELIMINARES HISTÓRICOS DEL CEMENTO PORTLAND

La cal fue el único aglomerante utilizado en construcciones desde los tiempos de Grecia y Roma y hasta mediados del siglo XVIII, pero éste no posee la cualidad de endurecer bajo el agua, es decir no es hidráulico.

Con la edificación del histórico faro de Eddystone se estableció la necesidad de construir en zonas marinas y por otra parte crear la inquietud de buscar aglomerantes que posean la característica de endurecer bajo el agua, es así que 1756 se establece como la fecha histórica que representa el descubrimiento y empleo del primer aglomerante hidráulico. La sílice y la alúmina, que son elementos que proceden de la arcilla, daban estas propiedades hidráulicas. (Gomá, 1979)

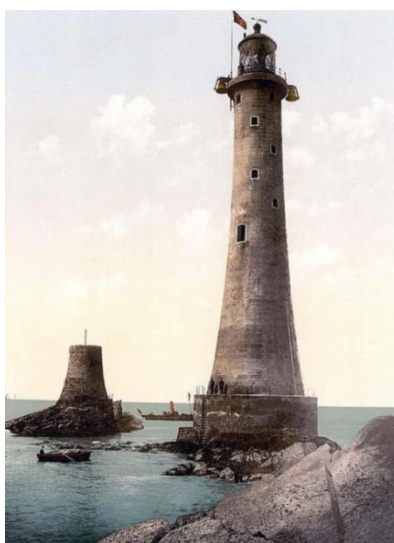


Figura 3. Faro de Eddystone en el puerto de Plymouth – Inglaterra

Fuente: (Cotera, 2014)

Posteriormente, en 1824 el cemento portland fue patentado por Joseph Aspdin y debe su nombre a los acantilados de piedra caliza de la isla de Portland, en Inglaterra. (Michael S. Mamlouk, 2009)

En los últimos años, las normas para fabricación del cemento han sufrido ciertos cambios con la finalidad de mejorar el desempeño del cemento y disminuir los gases con efecto invernadero, en especial el dióxido de carbono CO₂. A continuación se listan las normas vigentes y sus criterios en la historia:

Tabla 1.

Normas de Cementos

Título de la Norma	Norma Nacional	Norma Internacional	1era. Publicación	Edad
Cementos Portland. Requisitos	NTE INEN 152	ASTM C150	1940	75 años
Cementos Hidráulicos Compuestos. Requisitos	NTE INEN 490	ASTM C595	1967	48 años
Cementos Hidráulicos. Requisitos de Desempeño	NTE INEN 2380	ASTM C1157	1992	23 años

Fuente: (Holcim, 2012)

2.2. DEFINICIÓN DEL CEMENTO

Cualquier sustancia que aglutine materiales puede considerarse como cemento. El término “cemento” en construcción, se refiere a agentes que se mezclan con agua u otro líquido, o con ambos, para obtener una pasta aglutinante. (Frederick S. Merritt, 2002)

Debido a las reacciones químicas que ocurren durante el proceso, y bajo un tiempo determinado, la pasta fragua y la masa se endurece. Cuando las partículas son agregados finos (arena), se obtiene mortero; cuando son agregados finos mezclados con gruesos, se obtiene concreto.

El concreto de uso convencional, se produce mediante la mezcla de tres componentes esenciales los cuales son cemento, agua y agregados, usualmente se añade un cuarto componente que genéricamente se designa como aditivo. (Comisión Federal de Electricidad, 2001)

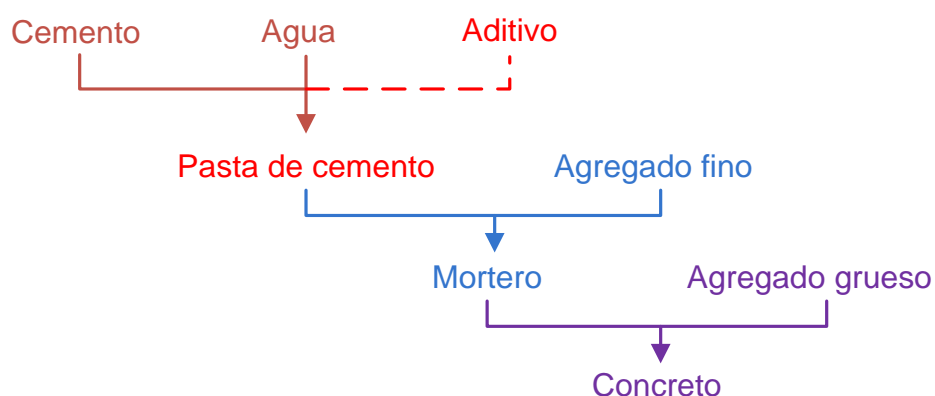


Figura 4. Esquema de integración del concreto

Fuente: (Comisión Federal de Electricidad, 2001)

2.3. FABRICACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND

La producción del cemento portland se da con dos ingredientes brutos básicos y fundamentales: el material arcilloso y el calcáreo. El material arcilloso se compone de sílice y alúmina, que son materiales los cuales poseen propiedades hidráulicas y pueden obtenerse a partir de la arcilla. Por otra parte el material calcáreo es un óxido de calcio, como piedra caliza, éste material no se endurece bajo el agua. Ésta combinación de materiales hace que reaccionen químicamente unos con otros y creen una pasta aglutinante.

En la fábrica Lafarge de Villaluenga de la Sagra en Madrid – España, el proceso empieza con las canteras tanto de caliza como de arcilla, dichas piedras van a la machacadora, donde un rodillo golpea las piedras y las rompe, obteniendo un menor tamaño de la piedra. Las piedras listas para formar parte del cemento viajan hacia la planta en cintas transportadoras a una distancia de 6 kilómetros adaptándose a las condiciones de terrenos disponibles.



Figura 5. Cintas transportadoras de la empresa Lafarge de Villaluenga de la Sagra en Madrid – España

Fuente: (García, 2013)

Una vez que se encuentran en la planta, éstas nuevamente se trituran, y viajan en cintas transportadoras, hasta llegar a un recinto, aquí se mezcla un 92% de caliza con un 8% aproximadamente de arcilla, éstas son llevadas al molino de crudo. A continuación, en el molino de crudo, éstas se mezclan con arena que posee un aporte de sílice y limonita que aporta hierro. El molido de crudo consta de 4 rodillos para la trituración de las mismas. Un rodillo superior finalmente absorbe el polvo fino conocido como harina de crudo y lo almacena.



Figura 6. Molido de crudo de la empresa Lafarge de Villaluenga de la Sagra en Madrid – España

Fuente: (García, 2013)

Posteriormente, éste polvo fino va al horno, el cual tiene 50 metros de longitud, donde se calcina hasta llegar aproximadamente a los 1600°C para dar paso al clínker, una piedra artificial, que ésta a su vez se le añade yeso para regular el fraguado. Finalmente se machaca el material y se refina, para luego ser almacenado. En la planta existe un almacenamiento de cemento portland de más de 3000 toneladas.

En cuanto a la evolución de la producción del cemento por regiones a nivel mundial, informes estadísticos del Instituto Ecuatoriano del Cemento y Hormigón (inecyc) dan a conocer los siguientes datos:

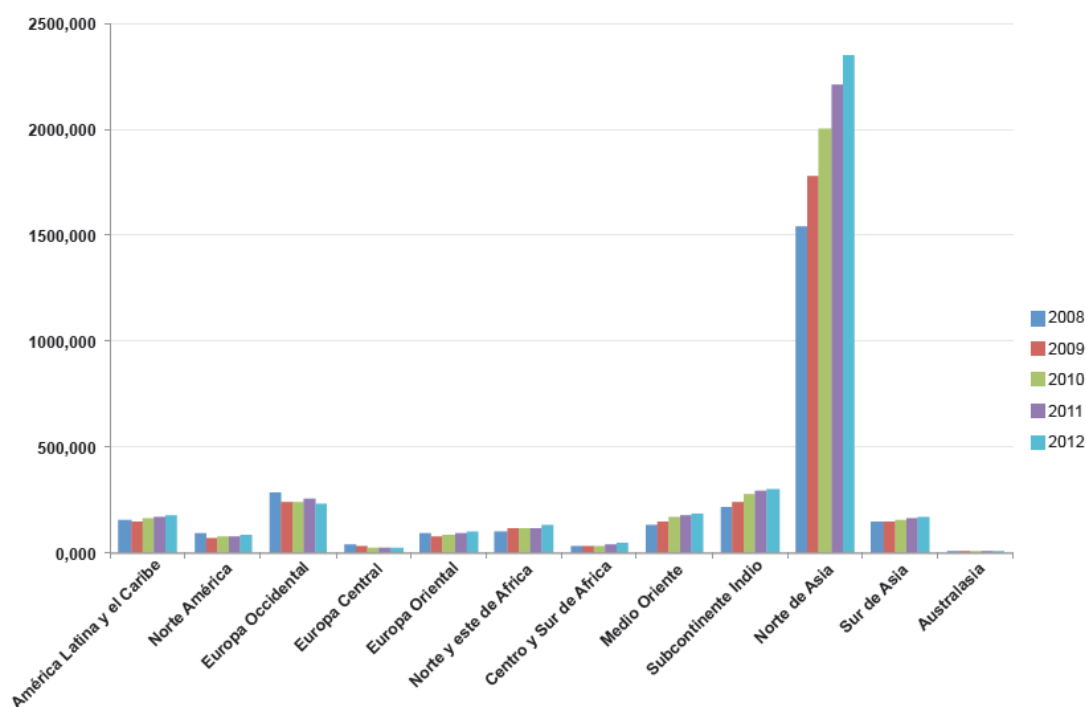


Figura 7. Producción del cemento por regiones años 2008 – 2012

Fuente: (INECYC, 2006)

En el Norte de Asia la producción de cemento es mayor. Por otra parte la comercialización mensual del cemento gris en el Ecuador a partir de los años 2006 al 2014, ha ido creciendo consecuentemente con los años, como se observa a continuación:

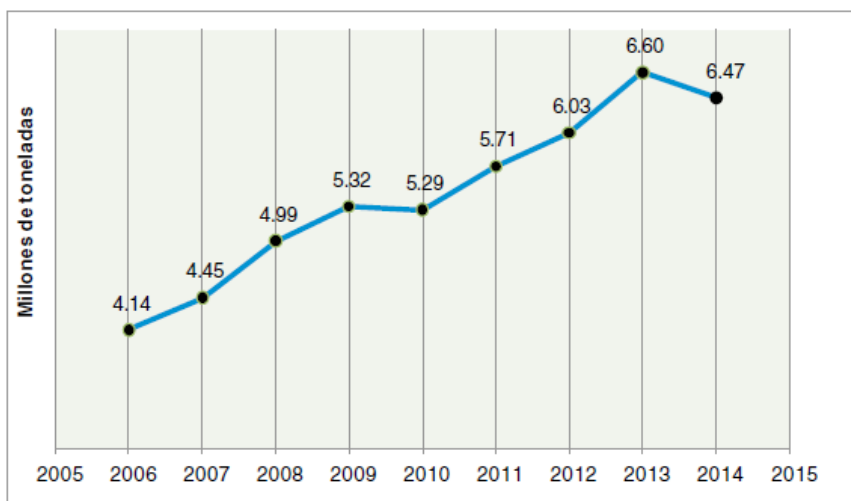


Figura 8. Comercialización mensual en Ecuador años 2006 – 2014

Fuente: (INECYC, 2006)

También cabe recalcar que la comercialización del cemento gris de la Industria Ecuatoriana en el año 2012 obtuvo mayor acogida en la Región Sierra, como se indica a continuación:

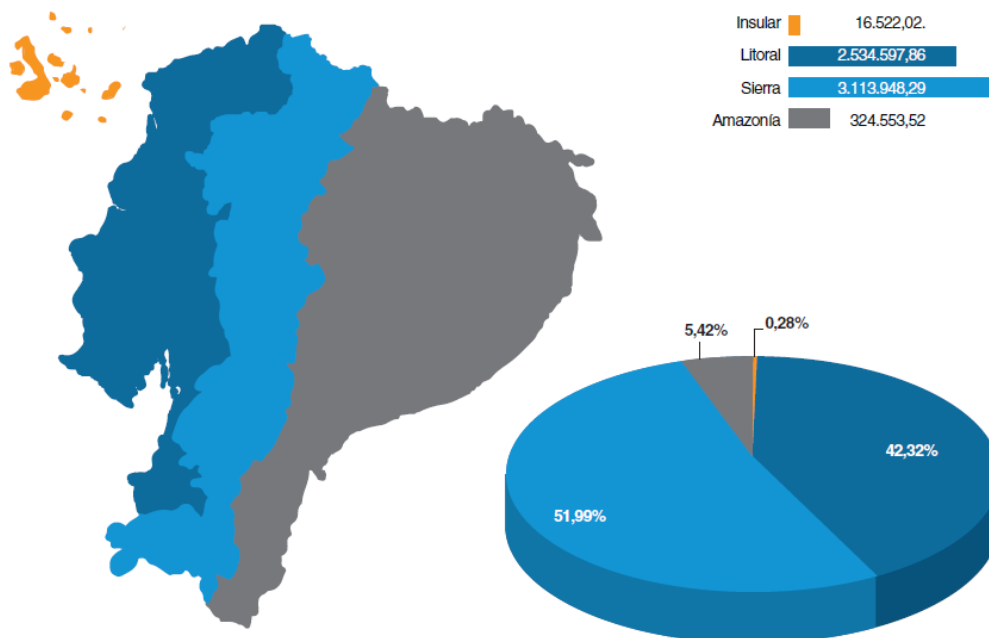


Figura 9. Comercialización por regiones en Ecuador año 2012

Fuente: (INECYC, 2006)

2.4. CARACTERÍSTICAS ESENCIALES DEL CEMENTO

El comportamiento y las propiedades de la pasta cementante influyen básicamente en la composición química del clínker y de su finura de molienda.

2.4.1. COMPOSICIÓN QUÍMICA

Son cuatro los compuestos principales que se han simplificado en las reacciones químicas y que interactúan en el horno principal para formar el clínker. Cada uno de estos compuestos pueden identificarse vistos a microscopio y cada uno de ellos contribuyen al comportamiento del cemento, dando propiedades únicas y características que determinan la mezcla final.

Tabla 2.

Compuestos principales del cemento portland

Compuesto	Fórmula química	Fórmula común	Rango usual en peso (%)
Silicato tricálcico	$3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	45 – 60
Silicato dicálcico	$2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	15 – 30
Aluminato tricálcico	$3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	6 – 12
Aluminoferrita tetracálcica	$4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	6 – 8

Fuente: (Michael S. Mamlouk, 2009)

Los componentes más deseables en la aparición del cemento portland son los silicatos de calcio cuyas fórmulas comunes son C_3S y C_2S , porque al hidratarse producen las altas resistencias mecánicas. Adicional a ello, la

reacción del silicato tricálcico con agua desprende una gran cantidad de calor, por lo que la rapidez de endurecimiento de la pasta de aglutinante está en relación directa con el calor de hidratación. (Frederick S. Merritt, 2002)

El silicato dicálcico con fórmula común C_2S , es el causante principal de la resistencia posterior adquirida en la pasta del aglutinante, puesto que requiere de algunos días para fraguar.

La presencia del aluminato tricálcico con fórmula común C_3A , hace que el compuesto fragüe rápidamente al ser hidratado, por esta razón es que durante la trituración al clínker se lo combina con aportaciones de yeso, para controlar el tiempo de fraguado. Éste compuesto es el más susceptible al ataque por sulfatos.

Finalmente la aluminoferrita tetracálcica con fórmula común C_4AF , a diferencia del aluminato tricálcico, no muestra un fraguado instantáneo y no contribuye en mayor valor a la resistencia del concreto, más bien su presencia es de gran ayuda para la calcinación del clínker como fundente y en la hidratación de otros compuestos presentes.

2.4.2. FINURA

El grado de finura o la superficie que presenta el cemento portland puzolánico tiene fundamental importancia en el desarrollo y manifestación de sus características, por lo que se trata de un producto químico en forma de polvo obtenido industrialmente. (Izaguirre, 1976)

En la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 957 define la finura como la medida del tamaño de las partículas de cemento después de haber sido sometido por un tamizado, en ésta norma se establece el método de ensayo para la determinación de la finura mediante el tamiz de 45 micrómetros (μm).

La utilización de un material más fino, tiene como resultado un calor inicial de hidratación mayor y por ende un desarrollo más rápido en cuanto a su resistencia. Por otro lado, el incremento de finura más allá de lo necesario, puede perjudicar en la calidad del hormigón y para ciertos tipos de cementos incrementaría los costos de producción. (Michael S. Mamlouk, 2009)

El tamaño máximo de las partículas de cemento es de 0.09 mm. (0.0035 pulg.); entre el 85% y el 95% de las partículas son menores de 0.045 mm. (0.0018 pulg.), y el diámetro medio es de 0.01 mm. (0.0004 pulg.). (Michael S. Mamlouk, 2009)

Normalmente, la finura del cemento se mide de forma indirecta, midiendo el área superficial con el turbidímetro de Wagner o con el aparato de medición de la permeabilidad al aire de Blaine presididos por las Normas INEN 197 (ASTM C115) e INEN 196 (ASTM C204), respectivamente.

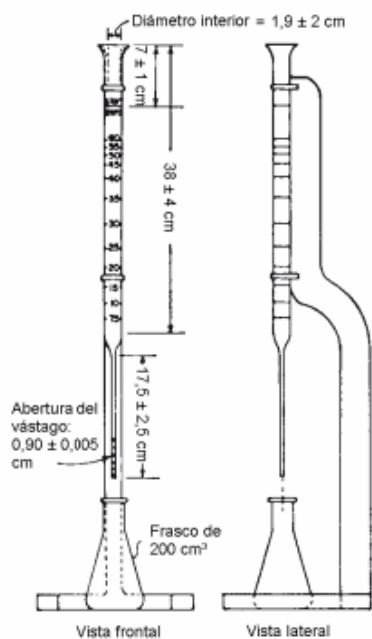


Figura 10. Finura por turbidímetro

Fuente: (NTE INEN 197, 2010)

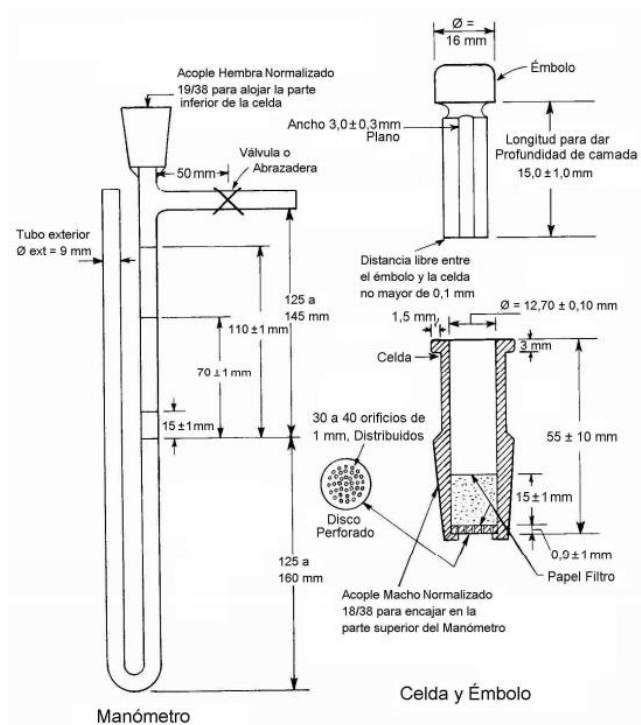


Figura 11. Finura por permeabilidad al aire

Fuente: (NTE INEN 196, 2009)

2.5. PROPIEDADES DEL CEMENTO HIDRATADO

2.5.1. HIDRATACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND

Ya que el agua y el cemento se hayan unido para formar la pasta aglutinante, se da inicio a varias reacciones químicas, que en forma general se designan como hidratación del cemento, que inicia con la rigidización gradual de la mezcla y culmina con el fraguado, para dar paso al endurecimiento y adquisición de la resistencia mecánica al producto terminado. (Comisión Federal de Electricidad, 2001)

En la tabla 2.3., se muestran las principales reacciones químicas entre las partículas del cemento y el agua. Por una parte los aluminatos se hidratan mucho más rápido que los silicatos. La reacción del aluminato tricálcico con el agua es inmediata y libera grandes cantidades de calor. Se utiliza el yeso para controlar la velocidad de hidratación del aluminato. El yeso se disuelve rápidamente, generando iones sulfato que bloquean la solubilidad de los aluminatos. La relación entre aluminatos y sulfatos determina la velocidad de fraguado. (Michael S. Mamlouk, 2009)

El principal compuesto aglomerante en la pasta de cemento es el silicato de calcio hidratado, conocido como gel de tobermorita, su nombre se debe a que tiene su composición y estructura semejante a la de un mineral natural conocido como tobermorita. Éste gel forma la base de la pasta de cemento endurecida y del concreto, por lo que liga o aglutina entre sí a todos los componentes.

Tabla 3.

Reacciones químicas principales durante la hidratación del cemento

$2 (3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2)$	+	$6 \text{ H}_2\text{O}$	=	$3 \text{ CaO} \cdot 2 \text{ SiO}_2 \cdot 3 \text{ H}_2\text{O}$	+	$3 \text{ Ca} (\text{OH})_2$
Silicato tricálcico		Agua		Silicato de calcio hidratado		Hidróxido de calcio
$2 (2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2)$	+	$4 \text{ H}_2\text{O}$	=	$3 \text{ CaO} \cdot 2 \text{ SiO}_2 \cdot 3 \text{ H}_2\text{O}$	+	$\text{Ca} (\text{OH})_2$
Silicato dicálcico		Agua		Silicato de calcio hidratado		Hidróxido de calcio
$3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	+	$12 \text{ H}_2\text{O}$	+	$\text{Ca} (\text{OH})_2$	=	$3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Ca} (\text{OH})_2 \cdot 12 \text{ H}_2\text{O}$
Aluminato tricálcico		Agua		Hidróxido de calcio		Aluminato de calcio hidratado
$4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	+	$10 \text{ H}_2\text{O}$	+	$2 \text{ Ca} (\text{OH})_2$	=	$6 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 12 \text{ H}_2\text{O}$
Aluminoferrita tetracálcica		Agua		Hidróxido de calcio		Aluminoferrita cálcica hidratada
$3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	+	$10 \text{ H}_2\text{O}$	+	$\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{ H}_2\text{O}$	=	$3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12 \text{ H}_2\text{O}$
Aluminato tricálcico		Agua		Yeso		Monosulfoaluminato cálcico hidratado

Fuente: (Michael S. Mamlouk, 2009)

La función básica de una puzolana en la hidratación del cemento portland puzolánico es el reaccionar con el hidróxido de calcio, que éste se va liberando en el curso de la hidratación del cemento, para así formar compuestos con propiedades cementantes. La principal característica de la adición de puzolana al concreto es la buena resistencia existente a los sulfatos. La Norma Técnica Ecuatoriana INEN 490 establece las diferentes propiedades tanto químicas, como físicas del Cemento IP. (Comisión Federal de Electricidad, 2001)

2.5.1.1. ETAPAS DE LA HIDRATACIÓN

Cada componente del cemento libera una cierta cantidad de calor, el calor total liberado está ligado principalmente con las características esenciales del cemento, las cuales son la finura y la presencia mayor o menor productos químicos que conforman el clínker.

Las etapas a considerarse son cuatro como se muestran en la figura 2.10. En la primera etapa (I) se observa simplemente una dispersión de los granos de clínker, los mismos que se encuentran sin ninguna reacción con el agua. Después de unos minutos en la segunda etapa (II) los productos de hidratación crecen hacia dentro y fuera de la superficie de cada grano. Más tarde en ciertas horas, se forma un gel continuo (fraguado) que se forma en la tercera etapa (III) interaccionando así las capas que recubren los diferentes granos de clínker. Finalmente en la cuarta etapa (IV) y después de unos días se da lugar al endurecimiento, con la masificación del gel. A medida que se hidratan las partículas de cemento, el volumen de estas partículas se reduce, incrementando el espacio entre las mismas.

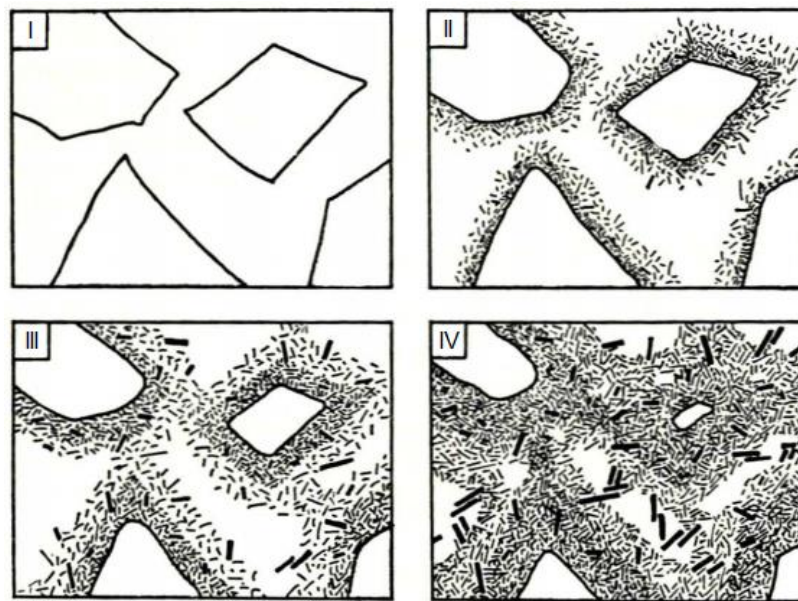


Figura 12. Etapas en el fraguado y endurecimiento del Cemento Portland

Fuente: (Gabalec, 2008)

Cabe recalcar que el calor total de hidratación del cemento es producido por la aportación de los calores parciales de cada uno de los componentes del clínker.

2.5.1.2. REPRESENTACIÓN DE LAS ETAPAS DE HIDRATACIÓN

A continuación en la figura 2.11., se observa la evolución de la velocidad de desprendimiento de calor medida en el proceso de hidratación. En la primera etapa existe una disolución de los componentes y formación de la estringita.

La segunda etapa se denomina el “período durmiente”, por lo que no existe contacto con el agua por la formación de la membrana alrededor de las partículas en hidratación, éste período termina cuando la membrana se rompe, formando así un gel que fluye a través de la rotura de la membrana.

En la tercera etapa y cuarta etapa de hidratación del cemento o inicio de fraguado, aumenta la resistencia de la mezcla al continuar la hidratación del silicato tricálcico y del aluminato tricálcico, formando el primer y segundo pico de calor correspondientemente. Finalmente desciende para finalizar su etapa de fraguado.

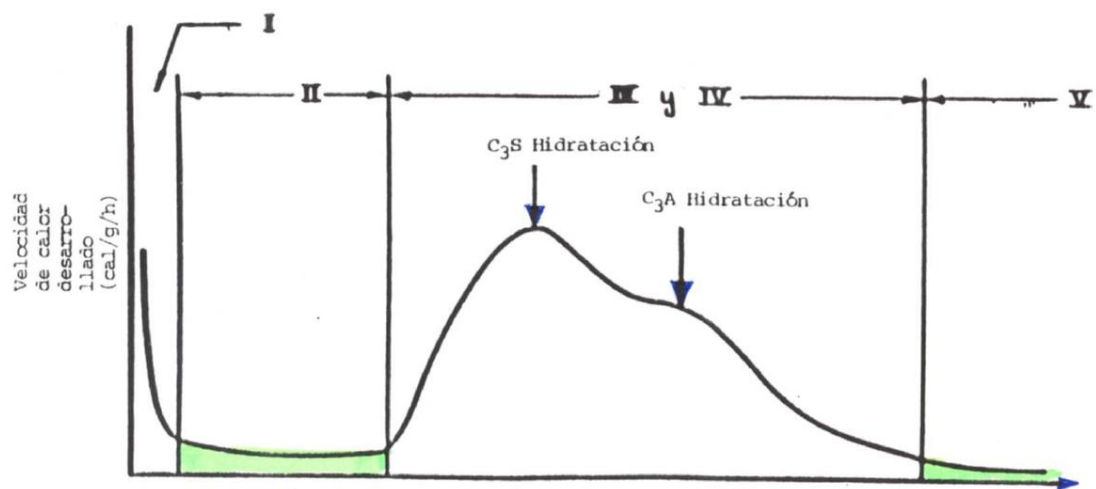


Figura 13. Representación de las etapas de hidratación

Fuente: (Hidratación del Cemento Portland , 2012)

A medida que el cemento se hidrata, se forman huecos en la estructura de la pasta. Éstos son muy importantes, ya que dependen básicamente de la resistencia, estabilidad volumétrica y durabilidad del hormigón. Por otra parte, la mezcla puede contener cierta cantidad de aire. El aire atrapado incrementa la permeabilidad y reduce la resistencia, sin embargo la presencia de microscópicas burbujas de aire bien distribuidas puede aumentar enormemente la durabilidad de la pasta aglutinante.

2.5.1.3. AGUA EN LA HIDRATACIÓN DE LOS CEMENTOS

El agua potable suele ser satisfactoria para ser usada con el cemento, sin embargo, muchas aguas no potables también pueden ser adecuadas.

Para que se produzca una correcta hidratación en los cementos, es necesario que el agua esté limpia, es decir exenta de ácido, aceite, materia orgánica u otra sustancia perjudicial para el correcto desarrollo del mismo. Por otra parte, el agua de mar se puede usar en la mezcla de concreto sin reforzar, aunque la resistencia a los 28 días será menor que la del concreto normal. (Theodore Baumeister, 1984)

2.5.2. FRAGUADO

El fraguado hace referencia al endurecimiento de la pasta de cemento o al cambio de estado plástico al estado sólido. Aunque el fraguado dota al cemento de una cierta resistencia, es preciso distinguirlo del endurecimiento, que hace referencia a la ganancia de resistencia en una pasta de cemento fraguada. El fraguado normalmente se describe en dos niveles: fraguado inicial y fraguado final. Basado en medidas realizadas con el aparato de Vicat según la Norma INEN 158 (ASTM C191) o en las agujas de Gillmore con la Norma INEN 159 (ASTM C266). Los factores que afectan el tiempo de fraguado son el uso de aditivos, la relación agua – cemento y la finura del mismo. (Michael S. Mamlouk, 2009)

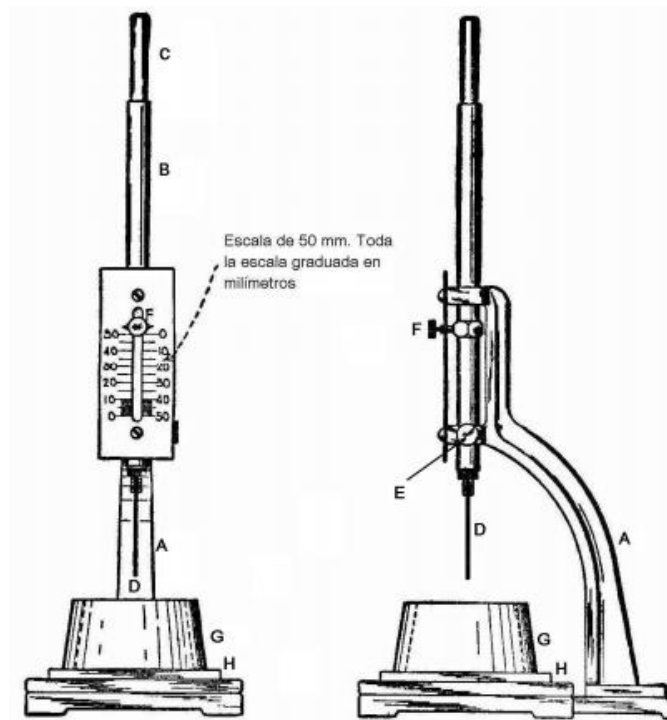


Figura 14. Aparato de Vicat para medida del tiempo de fraguado

Fuente: (NTE INEN 158, 2009)

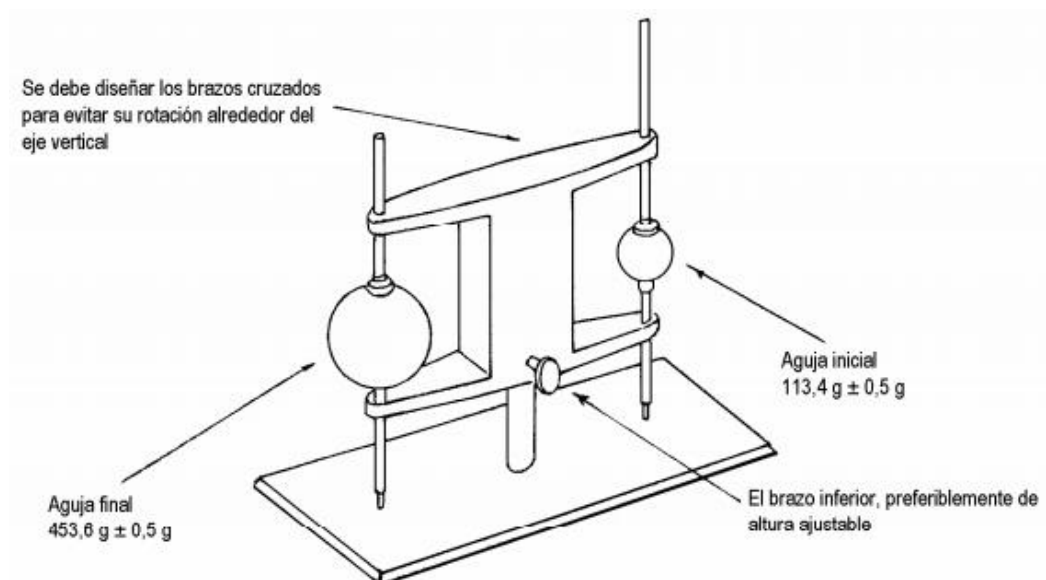


Figura 15. Agujas de Gillmore para medida del tiempo de fraguado

Fuente: (NTE INEN 159, 2010)

2.5.3. CONSISTENCIA

La consistencia de la pasta de cemento hace referencia a la capacidad de mantener su volumen una vez que ha fraguado. Si el cemento no es consistente, podría producirse una expansión después del fraguado. (Michael S. Mamlouk, 2009)

La Norma Técnica Ecuatoriana vigente INEN 200 (ASTM C151) establece el método de ensayo para la determinación de la expansión del cemento hidráulico en autoclave por medio de un ensayo sobre una muestra prismática elaborada únicamente con cemento.

2.5.4. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

La resistencia a la compresión del mortero se somete de acuerdo con la Norma ASTM C109, donde la resistencia a la compresión de los cubos de mortero es proporcional a la resistencia a la compresión de los cilindros de hormigón. Sin embargo, no puede predecirse de forma precisa la resistencia a la compresión del hormigón a partir de la resistencia de los cubos de mortero, ya que la resistencia del hormigón también se ve afectada por las características de los áridos, la mezcla utilizada para fabricar el hormigón y los procedimientos de construcción. (Michael S. Mamlouk, 2009)

2.6. TIPOS DE CEMENTOS

2.6.1. CEMENTOS PORTLAND

La primera norma establecida a regirse para los cementos portland en general, es en base a la Especificación ASTM para el Cemento Portland

C150, tanto los requisitos físicos como químicos se detallan en dicha norma. Además se especifican cinco tipos de cementos portland:

- **Cemento Portland Normal, Tipo I:** Es el que más se emplea para fines estructurales, pavimentos, estructuras de hormigón reforzado y se utiliza para aplicaciones en las cuales no se requiere otro tipo que tenga propiedades especiales.
- **Cemento Portland de resistencia moderada a los sulfatos, Tipo II:** Su uso es adecuado para grandes muelles, contrafuertes y muros de contención. El moderado calor de hidratación también es ventajoso a la hora de colocar el hormigón en regiones cálidas.
- **Cemento Portland de alta resistencia inicial, Tipo III:** Utilizado para la construcción rápida cuando se requiere alta resistencia en pocos días. En ambientes fríos reduce el tiempo requerido para una curación controlada.
- **Cemento Portland de bajo calor de hidratación, Tipo IV:** Se utiliza para construcciones masivas de concreto, como en el caso de las presas de gran tamaño, donde un aumento importante en la temperatura ocasionaría graves problemas.
- **Cemento Portland de alta resistencia a los sulfatos, Tipo V:** Principalmente se utiliza en estructuras hidráulicas expuestas al agua de mar o aguas con alto contenido de álcalis.

Estos cinco tipos de cementos en general, se producen modificando su composición química como se muestra a continuación:

Tabla 4.

Composiciones típicas de compuestos de cemento portland

Tipo de cemento	Designación ASTM C150	Composiciones (% en peso)*			
		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Uso general	I†	55	20	12	9
Calor de hidratación moderado, moderada resistencia al sulfato	II	45	30	7	12
Fraguado rápido	III	65	10	12	8
Calor de hidratación bajo	IV	25	50	5	13
Resistente al sulfato	V	40	35	3	14

*Los porcentajes faltantes corresponden al yeso y a componentes menores como MgO, álcalis, sulfatos, etcétera.

†Éste es el tipo más común de todos los cementos.

Fuente: J. F. Young, *J. Educ. Module Mater. Sci.*, 3:410 (1981). Reproducido con autorización del *Journal of Materials Education*, University Park, PA.

Fuente: (Hashemi, 2009)

En la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 152, además de los cementos descritos anteriormente, dicha norma contempla cementos portland con aire retenido, que son utilizados para la producción de concreto expuesto a intensas heladas. Éstos cementos se fabrican únicamente en los tipos de cemento portland I, II y III, que se designan con la letra A. Éstos son: IIA y IIIA. Adicional a ello para el cemento portland Tipo II, se designa II(MH) y II(MH)A. En donde el cemento portland Tipo II(MH) es utilizado para uso general, en especial cuando se desea un moderado calor de hidratación y una moderada resistencia a los sulfatos, por otro lado el cemento portland Tipo II(MH)A es un cemento con incorporador de aire para los mismos usos del Tipo II(MH) respectivamente.

2.6.2. CEMENTOS HIDRÁULICOS COMPUESTOS

Debido a los distintos procesos tanto físicos como químicos en la elaboración de los cinco tipos de cemento portland, se generan grandes cantidades de CO₂. A continuación se crean los cementos hidráulicos compuestos, en los que parte del clínker se sustituye por componentes minerales logrando así cementos con desempeños semejantes a los

cementos puros, y a su vez generando una menor cantidad de CO₂. La Norma Técnica Ecuatoriana INEN 490 (ASTM C595) contempla los siguientes cementos:

- **Cemento Portland de escoria de altos hornos, Tipo IS:** Consiste de una mezcla íntimamente molida de clínker de cemento portland y escoria de altos hornos granulada, o una mezcla íntima y uniforme de cemento portland y escoria de altos hornos granulada fina.
- **Cemento Portland Puzolánico, Tipo IP:** Consiste de una mezcla íntima y uniforme de cemento portland o cemento portland de escoria de altos hornos y puzolana fina producido por molido conjunto de clínker de cemento portland y puzolana, o a su vez por una puzolana finamente dividida.
- **Cemento compuesto ternario, Tipo IT:** Es un cemento hidráulico compuesto, que consiste en cemento portland con una combinación de dos puzolanas diferentes o con cemento de escoria y una puzolana.

2.6.3. CEMENTOS HIDRÁULICOS POR DESEMPEÑO

Actualmente, los compuestos hidráulicos por desempeño se encuentran vigentes en el Ecuador, bajo la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2380 (ASTM C1157), los cuales son:

- Cemento para uso en general, Tipo GU
- Cemento de alta resistencia inicial, Tipo HE

- Cemento con moderada resistencia a los sulfatos, Tipo MS
- Cemento con alta resistencia a los sulfatos, Tipo HS
- Cemento con moderado calor de hidratación, Tipo MH
- Cemento con bajo calor de hidratación, Tipo LH

A continuación, se muestra una tabla con equivalencias de los diferentes tipos de cementos portland:

Cuadro 1.

Equivalencias de los diferentes tipos de cementos

Cementos Hidráulicos por Desempeño	Cementos Hidráulicos Compuestos	Cementos Portland
GU	IP	Tipo I
HE		Tipo III
HS		Tipo V
MS	IP (MS)	Tipo II
MH	IP (MH)	Tipo IV
LH		

Fuente: (Holcim, 2012)

2.7. CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO

El cemento portland puzolánico debe ser un cemento hidráulico, en el cual el constituyente puzolana representa hasta el 40% en masa del cemento compuesto. (NTE INEN 490, 2011)

Varios investigadores han realizado destacadas comparaciones entre el cemento portland y el cemento portland puzolánico, determinando que la adición de puzolana al cemento produce concretos más plásticos, impermeables, de manera que existe mayor comodidad para colocarse en los encofrados y genera menor calor de hidratación, pero por ésta misma razón se necesita de más agua de mezcla que el cemento portland normal para obtener una misma consistencia. (Cotera, 2014)

2.7.1. DEFINICIÓN DE PUZOLANA

Las puzolanas se identifican como un material silíceo o sílico – aluminoso, que por sí mismo tienen poco o ningún valor cementante, pero que finamente divididos y en presencia de la humedad reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a la temperatura ambiente para formar compuestos que poseen propiedades aglutinantes. (NTE INEN 490, 2011)

Aparte de ello, la adición de puzolanas en el cemento ecuatoriano ayuda para contrarrestar el efecto de los sulfatos provenientes de los suelos y aguas. Muchos problemas que se producen en el hormigón son por causa de la cal, puesto que al momento de mezclar la caliza con arcilla, se encuentra mayor presencia de caliza, esto hace que no se combine por completo con los demás compuestos, y quede disponible aproximadamente un 1% de la misma.

2.7.2. PRELIMINARES HISTÓRICOS DEL CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO

Los primeros en conocer y usar la cal fueron los griegos y romanos, y que por casualidad añadieron ciertos materiales de origen volcánico que se presentaban en los diferentes pueblos de sus alrededores, así nacieron los primeros conglomerantes llamados cementos puzolánicos.

En Italia se desarrollaron los primeros cementos hidráulicos, tras las construcciones famosas del Coliseo y el Panteón en Roma constituido por puzolana, cal y piedra. Su nombre proviene del origen de la misma, que se encuentra en Puzol (Italia).



Figura 16. Coliseo y Panteón en Roma – Italia

Fuente: (Comisión Federal de Electricidad, 2001)

Es así como estos materiales autóctonos fueron descubriéndose alrededor del mundo. Y en Ecuador, Italia y España se los conocen como

puzolanas, en Alemania, Rumania y Rusia “tras”, en Grecia “tierra de Santorin”, en Francia “gaize”, en Dinamarca “moler”. (Calleja, 2014)

2.7.3. FABRICACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO

La producción del cemento portland puzolánico se puede dar en dos formas diferentes: la primera es la unión de la puzolana con el clínker, donde se pueden efectuar conjuntamente para ser molidos y la otra forma es mezclándola directamente a la puzolana con el cemento.

En Ecuador, en particular la empresa Lafarge, inicia el proceso con la extracción de calizas y arcillas en las canteras de las minas de Selva Alegre, ubicadas en la provincia de Imbabura, varios camiones llevan dichas piedras a la trituradora, para posteriormente descender en cintas transportadoras una distancia de 292 metros en una chimenea vertical, que atraviesa el interior de la loma, con una inclinación de 75°.



Figura 17. Minas de Selva Alegre en el Valle de Intag – Provincia de Imbabura

Fuente: (Rivas, 2013)



Figura 18. Chimenea vertical en las Minas de Selva Alegre – Provincia de Imbabura

Fuente: (Rivas, 2013)

Al descender, llega a un túnel de 540 metros de longitud, en donde se encuentra la apiladora radial y se reduce el tamaño de las rocas hasta partículas de aproximadamente 25 mm., para luego ser transportadas en volquetas a la planta donde se procesarán tanto la caliza como la arcilla.

Una vez mezclados aproximadamente un 92% de caliza y un 8% de arcilla, se añade aportaciones de hierro y se tritura nuevamente, para ser llevados en cintas transportadoras al molino de crudo. En éste molino se obtiene un polvo muy fino, conocido como “harina de crudo”, que se almacena en silos.

Posteriormente, se produce la calcinación de los materiales, donde los minerales reaccionan químicamente, formando el clínker. Ésta calcinación da lugar en un horno especial, constituido por un gran cilindro dispuesto horizontalmente con una ligera inclinación que rueda lentamente. La

temperatura que se llega a alcanzar aproximadamente es de 1500°C, posteriormente son enfriados mediante corrientes de aire.

Finalmente, al clínker se le añade pequeñas porciones de yeso y puzolana, para regular el fraguado, puesto que si solo se utilizara clínker se endurecería muy rápido. Luego se almacenan en silos y se distribuye a los clientes, por general en bolsas de papel que contienen 50 kilogramos cada una.



Figura 19. Planta Lafarge Selva Alegre en Otavalo – Provincia de Imbabura

Fuente: (Rivas, 2013)

El cemento debe almacenarse en lugar seco y alejado de las paredes, puesto que absorbe de una manera rápida el agua de la atmósfera y además se deteriora con facilidad si se expone a la humedad. Para prevenir de la humedad del suelo, se debe colocar sobre una plataforma que lo aisle. (Garza, 1991)

Por otra parte la industria del cemento en Ecuador, las promueven 4 empresas cementeras, las cuales son:

Cuadro 2.

Empresas Cementeras en Ecuador

EMPRESA	UBICACIÓN	PLANTA
HOLCIM Ecuador S.A.	Guayaquil	Cerro Blanco
	Latacunga	San Rafael
LAFARGE Cementos S.A.	Otavalo	Selva Alegre
Industrias Guapán S.A.	Azogues	Guapán
Unión Cementera Nacional UCEM C.E.M. (Cemento Chimborazo C.A.)	Riobamba	San Juan Chico

Fuente: (Negrete, 2012)

La comercialización histórica anual por empresa del cemento gris en el Ecuador a partir de los años 2000 al 2012, se muestra a continuación:


Tabla 5.

Comercialización del cemento gris anual por empresa años 2000 – 2012


Toneladas métricas

Fuente: Instituto Ecuatoriano de la Construcción Conforme a Oficio N° MIPRO-SC-2011-0177-SC


AÑO	EMPRESA				IMPORTADO (*)	TOTAL CEMENTO
	HOLCIM	LAFARGE	GUAPÁN	CHIMBORAZO		
2000	1.657.790	569.288	316.794	200.638	5.700	2.750.210
2001	1.937.572	614.311	289.981	233.369	21.450	3.096.683
2002	2.033.455	627.406	302.299	247.521	44.782	3.255.463
2003	1.947.597	634.070	332.028	242.586	26.884	3.183.165
2004	2.192.185	640.866	404.200	232.819	8.100	3.478.170
2005	2.422.542	665.644	392.352	234.962	0	3.715.500
2006	2.754.605	731.812	424.720	229.871	0	4.141.008
2007	3.019.218	788.947	410.935	227.561	409	4.447.070
2008	3.336.146	954.714	416.775	283.540	74	4.991.249
2009	3.480.298	1.061.221	430.931	346.485	0	5.318.935
2010	3.328.877	1.176.458	432.966	348.824	0	5.287.125
2011	3.614.755	1.313.075	430.868	345.989	0	5.704.687
2012	3.915.512	1.346.059	442.962	327.823	0	6.032.356




3,9
comercialización
(en millones de ton.)
65%
Participación en el mercado



1,3
comercialización
(en millones de ton.)
22%
Participación en el mercado



0,4
comercialización
(en millones de ton.)
7%
Participación en el mercado



0,3
comercialización
(en millones de ton.)
5%
Participación en el mercado

Fuente: (INECYC, 2006)

2.7.4. TIPOS DE PUZOLANAS

Existe gran variedad en cuanto a la procedencia de puzolanas que tienen la capacidad necesaria para cumplir con los requisitos expuestos en las normas. Se dividen en dos grandes grupos: las puzolanas naturales y las puzolanas artificiales.

2.7.4.1. PUZOLANAS NATURALES

Las puzolanas naturales son aquellas que no son tratadas, conocidas más comúnmente como crudas o pueden ser tratadas a temperaturas elevadas, es decir calcinadas. Pueden tener dos orígenes distintos, uno puramente mineral y el otro orgánico. Las puzolanas naturales de origen mineral son productos de transformación del polvo y “cenizas” volcánicas originarios de erupciones explosivas. Por otra parte las puzolanas naturales de origen orgánico son rocas sedimentarias formadas en yacimientos o depósitos que en su origen fueron submarinos, por acumulación de esqueletos y caparazones silíceos de animales o plantas. (Salazar, 2013)

- Tierras diatomáceas o tierra blanca.
- Cenizas, arenas, lapilli, tobas y rocas vítreas volcánicas.
- Rocas silíceas diversas, de origen ígneo, metamórfico y sedimentario, entre ellas las arcillas calcinadas.

2.7.4.2. PUZOLANAS ARTIFICIALES

Las puzolanas artificiales son aquellas que son subproductos industriales, mediante un tratamiento térmico adecuado. Así mismo los encontramos en dos tipos: el primero es el formado por materiales naturales

de naturaleza arcillosa y esquistosa, que adquieren el carácter puzolánico por sometimiento a procesos térmicos, y otro el constituido por subproductos de determinadas operaciones industriales, que en virtud de su naturaleza y de las transformaciones sufridas en las mismas, adquieren las propiedades puzolánicas. (Salazar, 2013)

- Cenizas volantes en bajo y alto calcio.
- Humo de sílice.
- Escoria de altos hornos, metalúrgicas y de ferroaleaciones.
- Ladrillo molido.

2.7.5. VENTAJAS DEL USO DE PUZOLANA

- La puzolana además de formar un nuevo poder cementante, crea nuevos compuestos estables al combinarse con el hidróxido de calcio, aumentando así el volumen de la pasta aglutinante.
- Los hormigones con cemento portland puzolánico han presentado ser muy resistentes con la reacción de todo tipo de aguas agresivas.
- Las porosidades propias del hormigón disminuyen en tamaño y cantidad, volviéndolos menos permeables. (Lafarge, 2009)

2.8. USO DE LA BIOMASA EN ECUADOR

El sol es el origen y sostén de la vida sobre el planeta. Los vegetales mediante la fotosíntesis captan la energía solar y la transforman en energía química fabricando moléculas orgánicas y necesitan absorber CO_2 atmosférico. Se podría sintetizar diciendo que mediante el proceso de fotosíntesis, la biomasa es la energía solar convertida por la vegetación en materia orgánica o energía química almacenada. A partir de la biomasa vegetal, se crea la biomasa animal, puesto que el alimento es necesario para el crecimiento de los animales. A continuación en la figura 2.18., se observa la clasificación de las fuentes de biomasa.

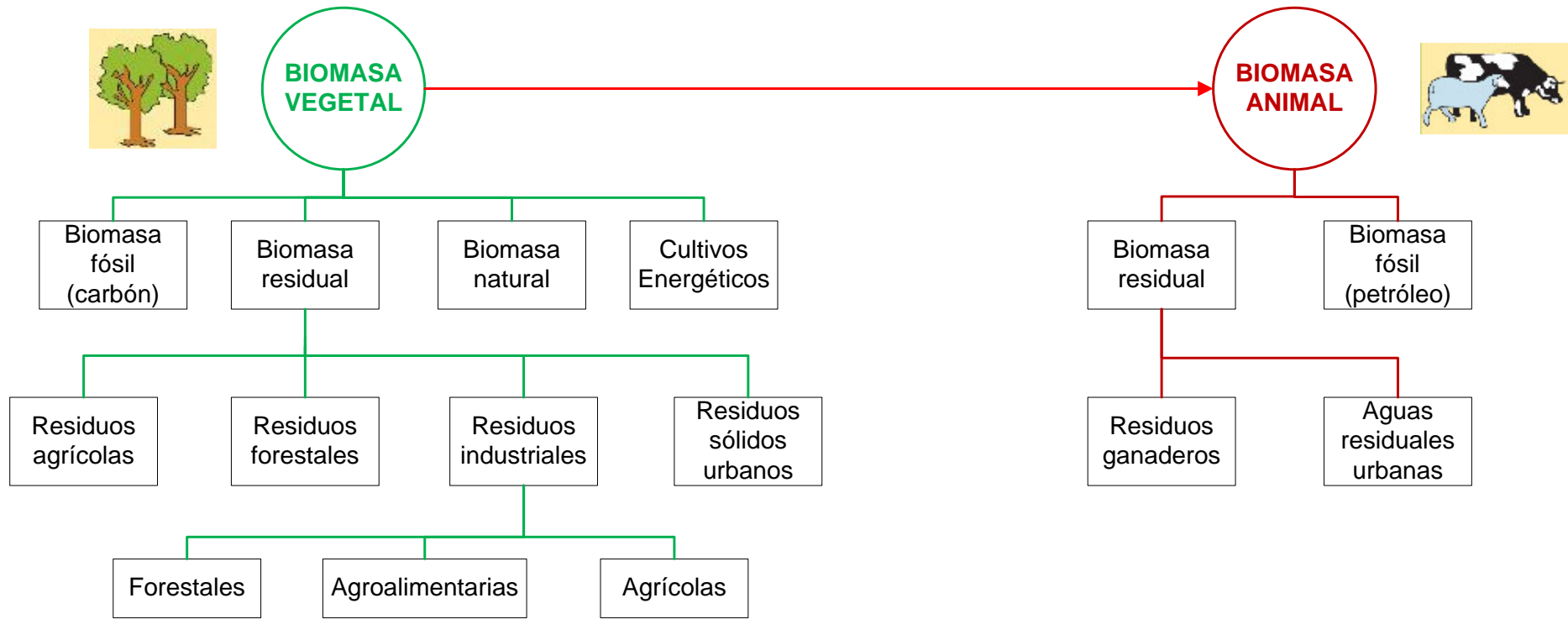


Figura 20. Clasificación de las fuentes de biomasa

Fuente: (González, 2009)

Los sectores industriales son lo que generan una gran variedad de residuos, entre ellos se encuentran los residuos de carpinterías, cáscaras de frutos, bagazo, etc.

Tabla 6.

Potencial de Biomasa en Ecuador

Tipo	Teórico (ktep/año)	Técnico (ktep/año)
Residuos sólidos urbanos	270.3	181.8
Residuos agrícolas	1.487.4	594.9
Residuos agroindustriales	384.1 166.3	230.5 76.0
Residuos ganaderos	249.3	74.8
Industria alcoholera	4.1	3.7
TOTAL	2561.5	1161.7

Fuente: (Barriga, 2012)

Cabe recalcar que el ktep es una unidad de energía. El tep es una cantidad de energía contenida en una tonelada de petróleo.

Así mismo existen cultivos óptimos y tradicionales, que en Ecuador son una fuente de ingresos para la economía del país, como son los cultivos de palma, caña de azúcar, trigo, maíz característicos del país. A continuación se muestra el mapa de síntesis de distribución geográfica de biomasa de desechos agropecuarios elaborado por la Corporación ENYA (Energía y Ambiente).

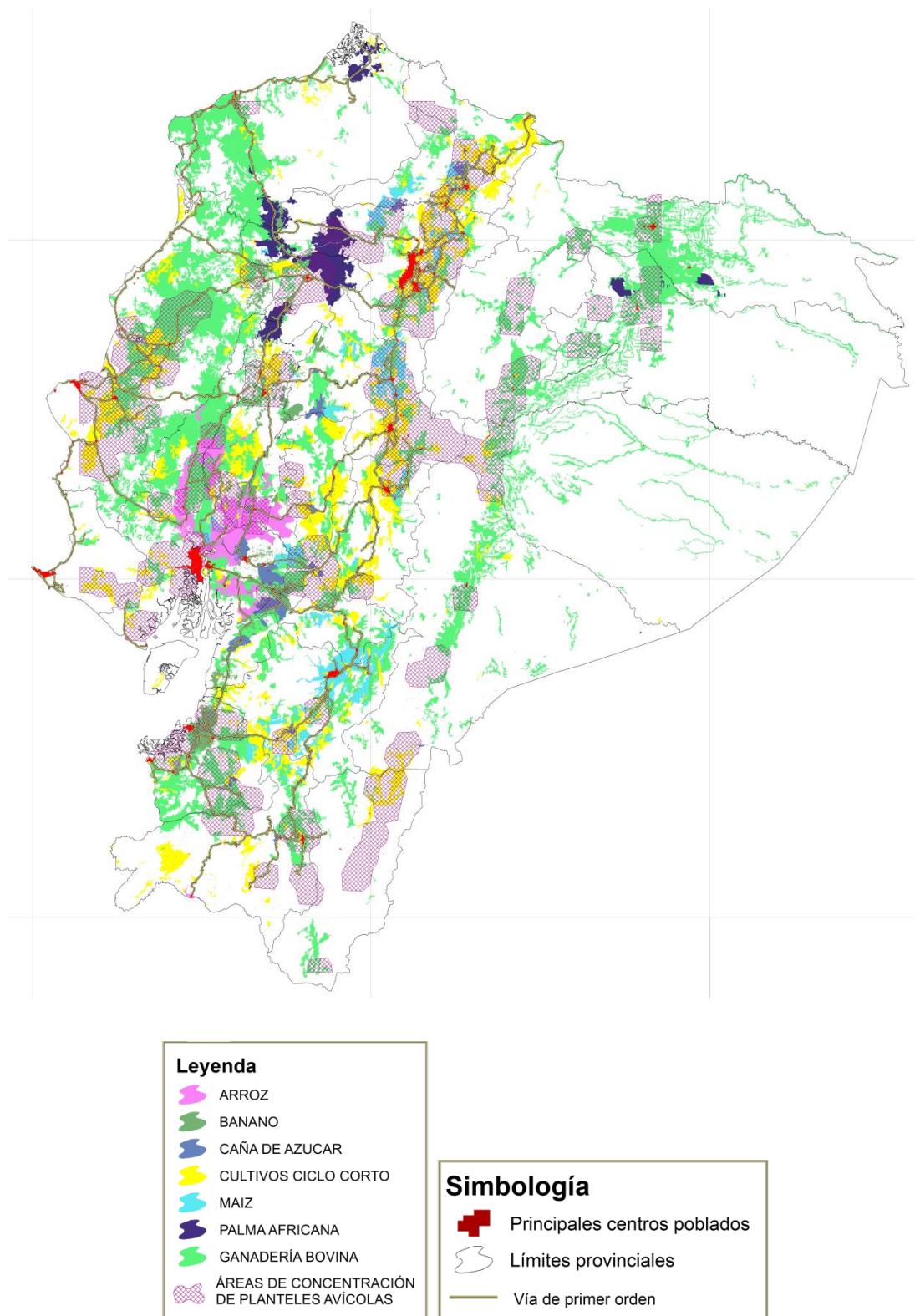


Figura 21. Mapa de la distribución geográfica de biomasa de desechos agropecuarios

Fuente: (Barriga, 2012)

2.8.1. RAQUIS DE PALMA AFRICANA

La palma africana en general, es una palma aceitera, originaria del golfo de Guinea en el África occidental, su nombre científico es *Elaeis guineensis*, que crece en tierras por debajo de los 500 metros sobre el nivel del mar, y se desarrolla entre temperaturas que oscilan entre los 22 y 23°C. Las zonas de producción se encuentran ubicadas principalmente en Santo Domingo de los Tsáchilas, Quindé, Francisco de Orellana y Quevedo. (Solagro, 2014)



Figura 22. Racimos de Palma Africana (*Elaeis guineensis*)

Fuente: (Solagro, 2014)

El raquis de palma africana constituye aproximadamente el 50% en peso de la fruta para procesar. Según varios autores las fibras de palma africana son fuertes y estables, y necesitan superar la temperatura de 330°C para degradarse. El principal componente que se encuentra en las fibras es la celulosa entre aproximadamente un 60%. La procedencia del raquis de palma africana es de Santo Domingo de los Tsáchilas.



Figura 23. Raquis de Palma Africana seca

Existen gran variedad de raquis de palma africana, esto varía de acuerdo a su edad y calidad de la misma.

2.8.2. RAQUIS DE PLÁTANO

En Ecuador, la producción bananera es un importante rubro en la economía, y el cultivo del mismo es una fuente de ingreso para empresas nacionales como internacionales. Proviene de Filipinas y de otras regiones de Asia Sub – Oriental, su nombre científico es *Musa Balbisiana* y crece en suelos tropicales húmedos de entre 0 y 300 metros sobre el nivel del mar, entre temperaturas de 25 a 30°C. Las principales provincias donde se cultiva el banano y plátano son: El Guayas, El Oro y Los Ríos. Particularmente es conocido por su alto contenido de potasio (K).

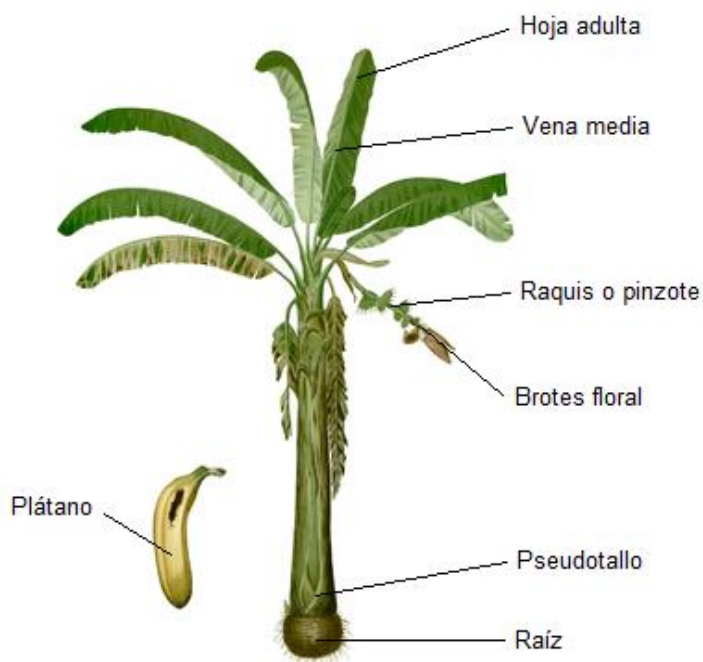


Figura 24. Partes de Planta de Plátano (*Musa Balbisiana*)

Fuente: (Barriga, 2012)

El raquis de plátano también llamado pinzote o vástago de banano, es la parte de la estructura del eje floral, es decir del racimo del fruto. De la planta de plátano, solo el 12% se considera comercializable, que es el fruto, lo demás se convierte en residuo agrícola. La procedencia del raquis de plátano es de Santo Domingo de los Tsáchilas.



Figura 25. Raquis de plátano seco

Adicional a ello, el banano absorbe fácilmente el 30% del agua disponible a partir del punto de humedad equivalente.

2.8.3. CASCARILLA DE CACAO

Ecuador ha sido uno de los principales productores mundiales del cacao, en su mayoría se exporta el cacao conocido como Cacao Nacional Sabor Arriba, con características de ser fino y fino de aroma. Su origen proviene de la cuenca alta del Río Amazonas, su nombre científico es *Theobroma cacao* L. Se desarrolla en suelos ricos en materia orgánica, fértiles, con una temperatura entre 25 y 29°C. Las principales provincias donde se cultivan son en Los Ríos, en El Oro, y al sur de la provincia del Guayas.

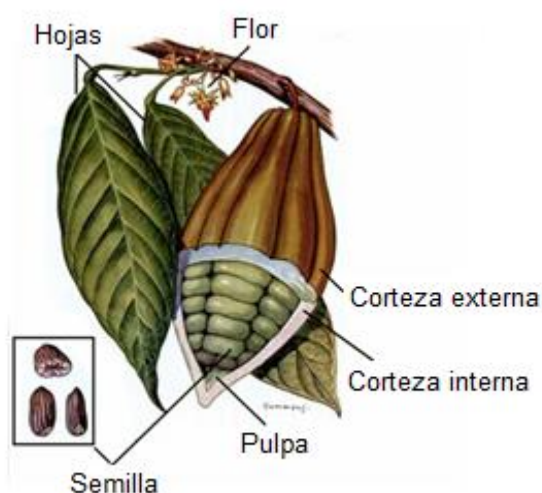


Figura 26. Partes del Cacao (*Theobroma cacao* L.)

Fuente: (Barriga, 2012)

La cascarilla de cacao se obtiene usualmente por diferentes procesos que se realiza al cacao, entre ellos están la manteca, pasta y licor de cacao, o el cacao en polvo, para el chocolate. De 100 kilogramos de semillas de cacao, el 85% se considera rentable, y del restante, el 12% corresponde a la

cascarilla de cacao. En las cascarillas de cacao se encuentran altos contenidos de alcaloides, así mismo posee un pigmento resistente al calor y a la luz, otros estudios demuestran su alto contenido de antioxidantes. La procedencia de la cascarilla de cacao es de Santo Domingo de los Tsáchilas.



Figura 27. Cascarilla de cacao seca

2.8.4. CASCARILLA DE CAFÉ

En Ecuador se cultivan cafetales de las especies arábica y robusta. En Santo Domingo de los Tsáchilas lugar de procedencia de la cascarilla de café a ser utilizada para los ensayos, existen plantaciones de especies robustas, las mismas que se encuentran en zonas tropicales húmedas del litoral y en la región amazónica. Su origen es de Etiopía, y su nombre científico es *Coffea arabica*, se cultivan entre 500 y 2000 metros de altitud con temperaturas entre los 15 y 25°C.

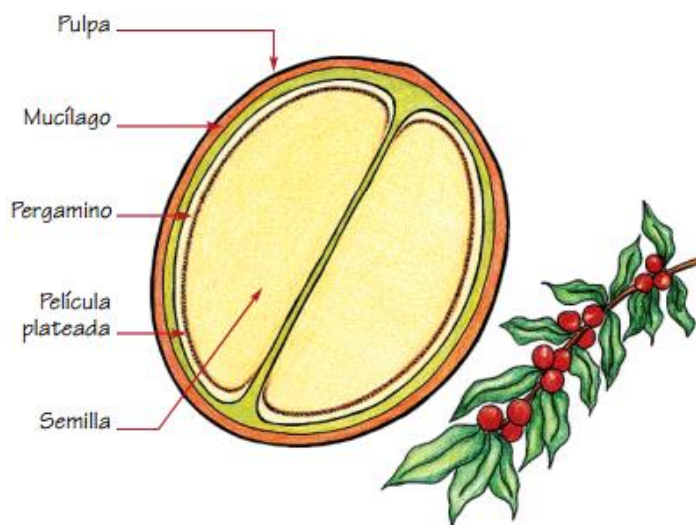


Figura 28. Composición del fruto del café (*Coffea arabica*)

Fuente: (Barriga, 2012)

La cascarilla de café se obtiene del procesamiento del café para la elaboración de alimentos y bebidas. Por otra parte, las grandes cantidades de residuo generadas son de mayor problema, ya que presentan cantidades apreciables de cafeína y se los considera de naturaleza tóxica. Posee un bajo contenido de humedad, puesto que anteriormente se expone a un proceso de secado. La procedencia de la misma es de Santo Domingo de los Tsáchilas.



Figura 29. Cascarilla de café seca

2.8.5. BAGAZO DE CAÑA

La caña tiene su origen genético en Nueva Guinea, su nombre científico es *Saccharum officinarum*, su principal característica es que posee una alta eficiencia fotosintética y el contenido de azúcar oscila entre el 11 y 16%. Para el cultivo del mismo se requiere una temperatura promedio de 25°C, con una mínima de 18°C y una máxima de 34°C. Las provincias que se destacan en la producción de caña de azúcar son: Guayas, Cañar, Carchi, Imbabura, Los Ríos y Loja.

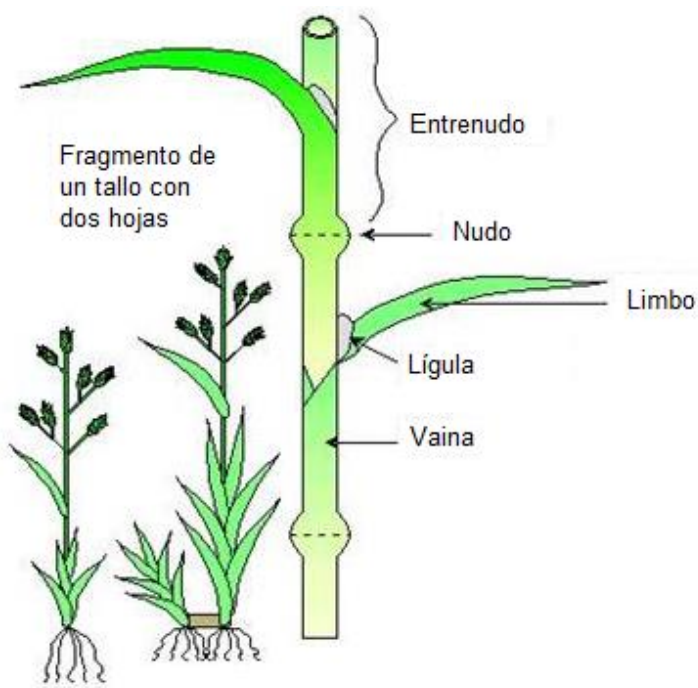


Figura 30. Partes de la Caña de Azúcar (*Saccharum officinarum*)

Fuente: (Barriga, 2012)

El bagazo de caña es el residuo que se obtiene del proceso de molienda, es decir de la extracción del jugo de caña, éste puede ser también por medio de una prensa. El bagazo de caña está compuesto de un 80% entre celulosa y hemicelulosa y el 20% de lignina. La procedencia del mismo es de Baños de Agua Santa, provincia de Tungurahua.



Figura 31. Bagazo de caña de azúcar con cáscara seco

2.8.6. GUADÚA

El bambú también conocido por los agricultores como caña guadúa, caña brava es originario de las selvas sudestes venezolanas, se extiende por Brasil, Perú, Colombia y por las selvas de las Guyanas. Su nombre científico es *Guagúa angustifolia* y crecen en las zonas tropicales, subtropicales y templadas entre los 18 y 28°C, su altitud ideal es de 400 a 1200 metros sobre el nivel del mar. Las principales provincias donde se cultiva son en Esmeraldas, Los Ríos y Guayas.

La guadúa es un recurso natural renovable de rápido crecimiento y de fácil manejo, aparte de ello tiene fibras naturales muy fuertes. La guadúa utilizada es proveniente de Quevedo, provincia de los Ríos.

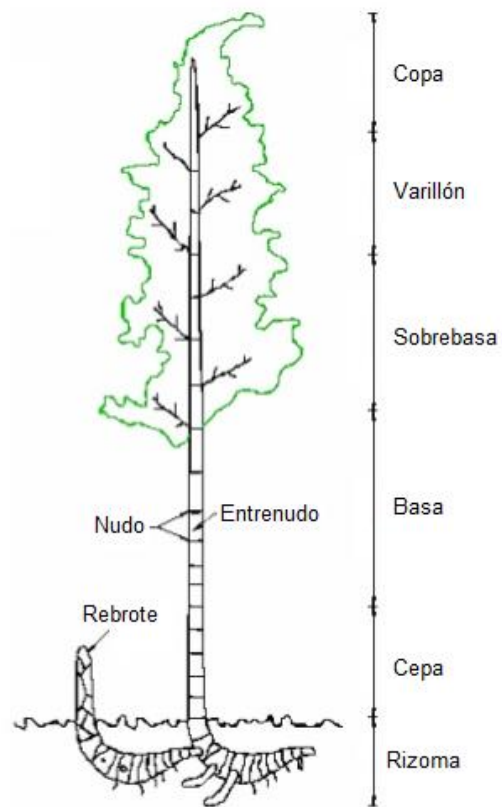


Figura 32. Partes del Bambú (*Saccharum officinarum*)

Fuente: (Barriga, 2012)



Figura 33. Fibras de Guadúa seca

CAPÍTULO III

MÉTODO DE ENSAYO

3.1. APARATO CALORIMÉTRICO

Las curvas de hidratación del cemento portland puzolánico sobre las diferentes biomásas, son analizadas gracias al calorímetro para medir temperatura en un sistema cuasi adiabático, el mismo que se encuentra en el laboratorio de termodinámica del DECEM.

3.1.1. CALORÍMETRO

El calorímetro es un equipo que determina la temperatura a la cual se producen varias reacciones durante un determinado tiempo. Él mismo que es cuasi adiabático y por ende prácticamente no permite la transferencia de calor con el entorno y el medio ambiente. El sistema cuasi adiabático se analiza en un lapso de tiempo determinado por el usuario, mediante sensores de temperatura y finalmente programados en LabVIEW.



Figura 34. Calorímetro para medir temperatura en un sistema cuasi adiabático

3.1.2. PRIMER RECIPIENTE DE AISLAMIENTO

El primer recipiente conformado por el calorímetro es de tubo de vidrio borosilicato en vacío, el mismo que ofrece una temperatura de uso más alta, además que proporciona mejores propiedades de resistencia al choque térmico que el vidrio de sosa y de cal.



Figura 35. Primer recipiente de aislamiento

3.1.3. SEGUNDO RECIPIENTE DE AISLAMIENTO

El segundo recipiente es de vidrio, puesto que es apropiado para aplicaciones de transferencia de calor.



Figura 36. Segundo recipiente de aislamiento

3.1.4. TERCER RECIPIENTE DE AISLAMIENTO

El tercer recipiente es de polipropileno, el cual posee gran resistencia contra los álcalis y ácidos, así mismo evita el traspaso de humedad.



Figura 37. Tercer recipiente de aislamiento

3.1.5. ELEMENTOS ESTRUCTURALES

La base para colocar la muestra y las tapas de los dos primeros recipientes de aislamiento son de policloruro de vinilo (PVC), conocido miembro de la familia de termoplásticos, además que es resistente y liviano, no se quema con facilidad y adicional a ello es un aislante eléctrico. Por otra parte la tapa del tercer recipiente es de polipropileno, y el soporte para el primer recipiente es de latón.

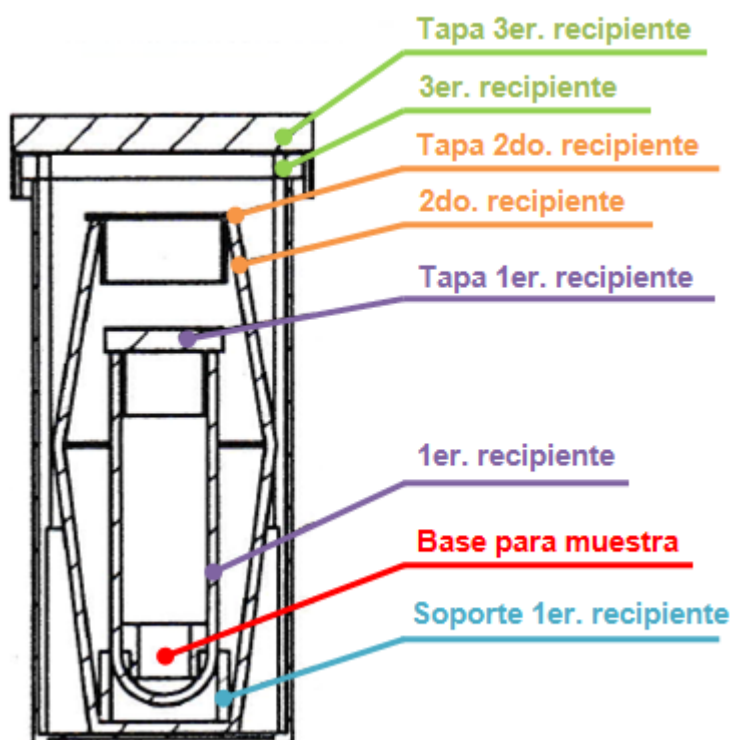


Figura 38. Elementos estructurales del calorímetro

3.1.6. ELEMENTOS AISLANTES

El aislante colocado entre el primer y segundo recipiente es el poliestireno expandido en forma de bolas, presenta una excelente capacidad

de aislamiento térmico frente al calor y al frío, no se pudre, no se enmohece, ni se descompone.

Adicional a ello, entre el primer y segundo recipiente, se encuentra espuma de poliuretano de color negro, el cual es un buen aislante térmico, así mismo se encuentra entre el segundo y tercer recipiente.

3.1.7. SENSORES

El calorímetro está compuesto básicamente por tres sensores citados a continuación:

- **Termocupla Tipo K:** El rango de medición de los termopares tipo K (NiCr – Ni) en función del tipo de utilización que se dé, es de 0 a 1300°C. La temperatura máxima de trabajo para las mezclas a realizar será de 30°C.
- **MAX6675:** Cumple la función de digitalizar las señales obtenidas de la termocupla tipo K, además de realizar la compensación de junta fría.
- **DHT11:** Éste sensor se caracteriza por tener la señal digital calibrada por lo que asegura fiabilidad a lo largo del tiempo y alta calidad.

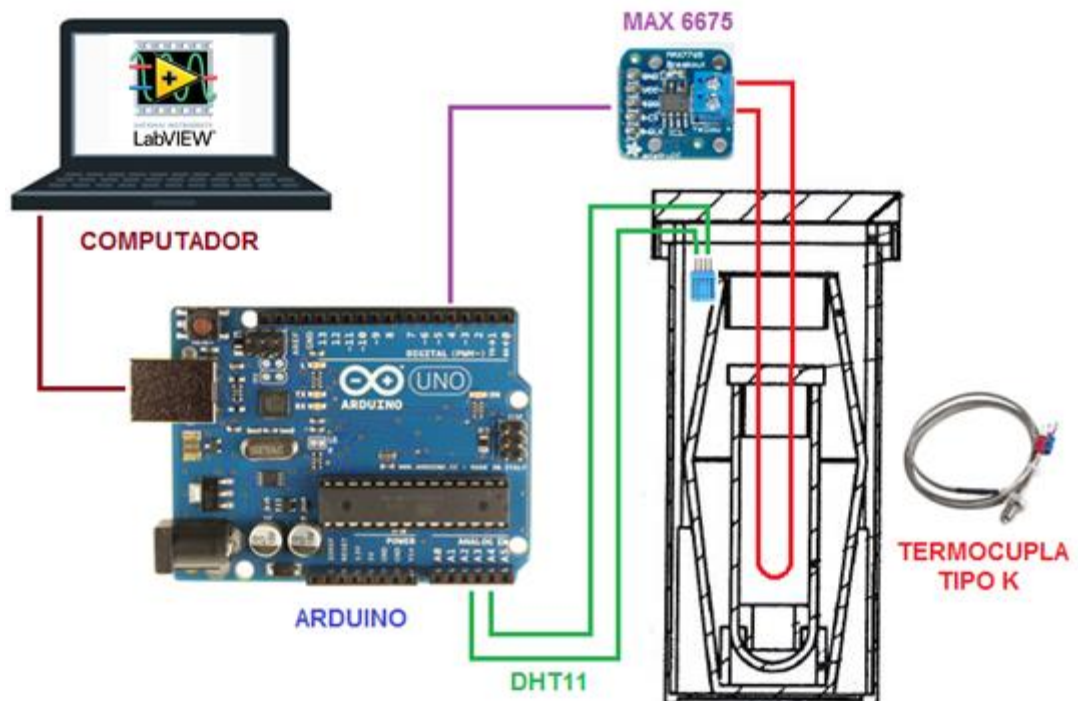


Figura 39. Esquema Arduino – Interfaz HMI

3.2. DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD CALORÍFICA DEL CALORÍMETRO

Previo a la utilización del equipo y a la realización de pruebas en el mismo, se lleva a cabo la calibración del equipo denominado “Calorímetro para Cemento Portland Puzolánico”, para lo cual se determina su capacidad calorífica.

Al mezclar dos cantidades de líquidos a distinta temperatura se genera una transferencia de energía en forma de calor. Dicho tránsito de energía se mantiene hasta que se igualan las temperaturas, es ahí cuando se dice que ha alcanzado el equilibrio térmico.

$$Q = m \cdot C_e \cdot \Delta T$$

[1]

donde:

Q : Calor ganado o cedido. [cal.]

m : Masa del líquido. [gr.]

C_e : Calor específico del líquido. [cal/gr.°C]

ΔT : Variación de temperatura que experimentan. [°C]

El calorímetro, por ser un sistema adiabático, no permite la transferencia de calor con el medio externo; por lo tanto el calor liberado dentro del calorímetro, debe ser totalmente absorbido por él.

$$q_{\text{liberado}} + q_{\text{absorbido}} = 0 \quad [2]$$

$$q_{\text{reacción}} + q_{\text{calorímetro}} = 0 \quad [3]$$

Para determinar la capacidad calorífica del calorímetro, primero se colocan 55 gramos de agua destilada en un vaso térmico para ser ingresado al calorímetro, después de un minuto se determina su temperatura inicial, la cual es de 24°C. A continuación, se abren las tapas del calorímetro y se vierte en el vaso térmico los demás 55 gramos de agua destilada a 80°C. Posterior a ello, se agita la mezcla y después de un minuto, se mide la temperatura de equilibrio T_e , que es de 52°C.

La capacidad calorífica del calorímetro se le denomina equivalente en agua del calorímetro, y se expresa en gramos de agua, desarrollada por la siguiente ecuación:

$$m_1 \cdot C_{e_{H_2O}} \cdot (T_1 - T_e) + C_{cal} \cdot (T_1 - T_e) + m_2 \cdot C_{e_{H_2O}} \cdot (T_2 - T_e) = 0 \quad [4]$$

$$C_{cal} = \frac{m_2(T_e - T_2)}{T_1 - T_e} - m_1 \quad [5]$$

donde:

C_{cal} : Capacidad calorífica del calorímetro. [gr. de H₂O]

T_1 : Temperatura inicial del agua destilada. [°C]

T_2 : Temperatura de agua destilada caliente. [°C]

T_e : Temperatura de equilibrio. [°C]

m_1 : Masa inicial del agua destilada. [gr.]

m_2 : Masa de agua destilada caliente. [gr.]

$$C_{cal} = \frac{55 \text{ gr.} \cdot (52 - 80)^\circ\text{C}}{(24 - 52)^\circ\text{C}} - 55 \text{ gr.} = 5 \text{ gr.}$$

Donde se determina que el equivalente en agua del calorímetro es de 5 gramos.

3.3. MATERIALES

- El cemento portland puzolánico utilizado para las muestras es el cemento Lafarge – Selva Alegre, puesto que dicha empresa se especializa solamente en la elaboración y fabricación de

cementos portland puzolánicos. Por otra parte, también se realiza un estudio con el cemento portland, de procedencia española.



Figura 40. Cemento portland puzolánico tipo IP Lafarge – Selva Alegre

- Para la mezcla íntima del cemento con agua y la biomasa respectivamente, se realiza con un agitador o varilla de agitación de vidrio de 25 cm. superior.
- Un vaso de precipitación de vidrio de 400 mililitros, es utilizado como recipiente para realizar la mezcla de cemento, agua y biomasa.



Figura 41. Vaso de precipitación y varilla de agitación de vidrio

- Bajo la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 199, especifica que para la preparación de la pasta de cemento, los ensayos se deben realizar con agua destilada, por lo que se utiliza 1.5 galones de agua destilada.



Figura 42. Agua destilada

- Vasos térmicos desechables para bebidas frías o calientes de 4 onzas son utilizados como recipientes de almacenamiento para cada mezcla realizada, los mismos que son introducidos dentro del calorímetro.
- Los vasos para poder ser ingresados dentro del primer recipiente de aislamiento deben ser perforados por un cable sólido 14 AWG, THHN, Incable, R100.
- Para que el borne de contacto de la termocupla tipo K, no sea sometido directamente a la mezcla cemento, agua y biomasa correspondiente, colocar en forma de acople a dicho borne de contacto, una lámina de cobre de espesor 0.105 mm., y dejar una longitud libre de 2.5 cm., para que éste tome contacto con la mezcla. Adicional a ello, para la realización del acople, la lámina de cobre se une mediante cautín y pasta para soldar.

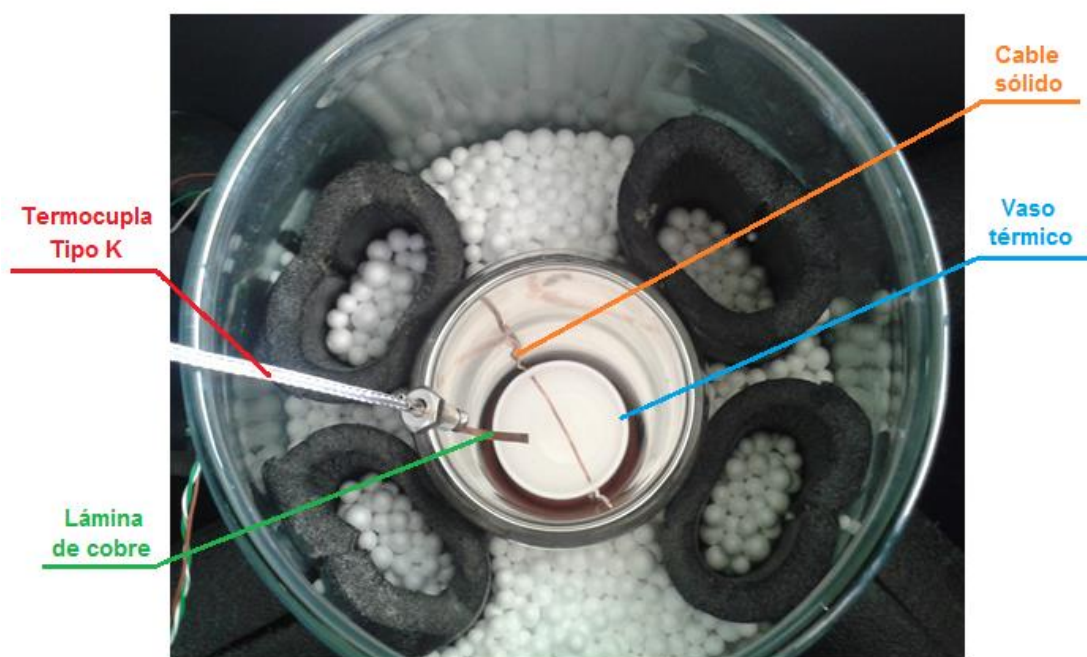


Figura 43. Materiales necesarios para la toma de datos

- Para las mediciones de las muestras se utiliza una balanza de 5 kilogramos – 11 libras, marca CAMRY, facilitada por el laboratorio de termodinámica del DECEM.



Figura 44. Balanza marca CAMRY

3.4. PROCEDIMIENTO

3.4.1. PREPARACIÓN DE LA PASTA DE CEMENTO

Para efectuar la mezcla de agua destilada tanto con el cemento portland como del puzolánico, se debe realizar la muestra en una habitación con temperatura constante a $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, y los materiales deben estar a temperatura ambiente antes de la preparación de la pasta. Mezclar 150 gramos de cemento y 60 cm^3 de agua destilada por medio de un agitador o varilla de agitación de vidrio durante 5 minutos. Colocar la muestra en el vaso térmico de 4 onzas, llenándolo hasta cerca de 15 mm. desde la parte superior. Inmediatamente después de llenado el vaso, la lámina de cobre debe ser ligeramente insertada en la mezcla para mejores resultados,

finalmente cerrar con las tapas correspondientes a cada uno de los recipientes y verificar en el software.



Figura 45. Interfaz HMI, para la observación de parámetros e interacción con el usuario

3.4.2. PREPARACIÓN DE LA BIOMASA

Los seis tipos de biomasa a considerar los cuales son: raquis de palma africana, raquis de plátano, cascarilla de cacao, cascarilla de café, bagazo de caña y guadúa, cada uno de ellos, independientemente de la procedencia que posea deben estar totalmente secos y posterior a ello se lleva a cabo la elaboración de pequeñas fibras para realizar las muestras tanto con biomasa húmeda, como seca. La biomasa seca toma lugar a la biomasa expuesta al aire libre, y que con el paso del tiempo la misma es secada con presencia del sol, por otra parte la biomasa húmeda se considera a la biomasa que ha sido remojada durante un lapso de 30 minutos a 1 hora con agua destilada,

la misma que luego de un determinado tiempo es exprimida y se procede a la mezcla con el cemento.

Para la determinación de la masa de biomasa a ser utilizada para el análisis, se calcula con la siguiente ecuación:

$$m_b = \frac{m_a - 0.25m_c}{2} \quad [6]$$

donde:

m_b : Masa de la biomasa. [gr.]

m_a : Masa del agua. [gr.]

m_c : Masa del cemento. [gr.]

$$m_b = \frac{60gr. - 0.25 (150 gr.)}{2} = 11.25 gr.$$

Por consiguiente para las muestras realizadas a continuación, se utiliza tanto con biomasa húmeda como seca, una masa de 11 gramos aproximadamente.

3.4.3. PREPARACIÓN DE LA PASTA DE CEMENTO CON BIOMASA

Así mismo para efectuar la mezcla de cemento, agua y biomasa, se debe realizar en una habitación con temperatura constante a $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, y tanto las biomosas, como los materiales deben estar a temperaturas ambiente antes de la preparación de la pasta. Mezclar durante 2 minutos 150 gramos

de cemento y 60 cm³ de agua destilada, después adicionar lentamente 11 gramos de fibras de biomasa en general y mezclarlos durante 3 minutos por medio de un agitador o varilla de agitación de vidrio. Colocar la muestra en el vaso térmico de 4 onzas, llenándolo hasta cerca de 15 mm. desde la parte superior. Inmediatamente después de llenado el vaso, la lámina de cobre debe ser ligeramente insertada en la mezcla para mejores resultados, finalmente cerrar con las tapas correspondientes a cada uno de los recipientes y verificar en el software. El análisis con el cemento Lafarge – Selva Alegre se realiza con fibras tanto húmedas, como secas. Por otra parte, con el cemento portland se realiza el análisis con fibras húmedas.

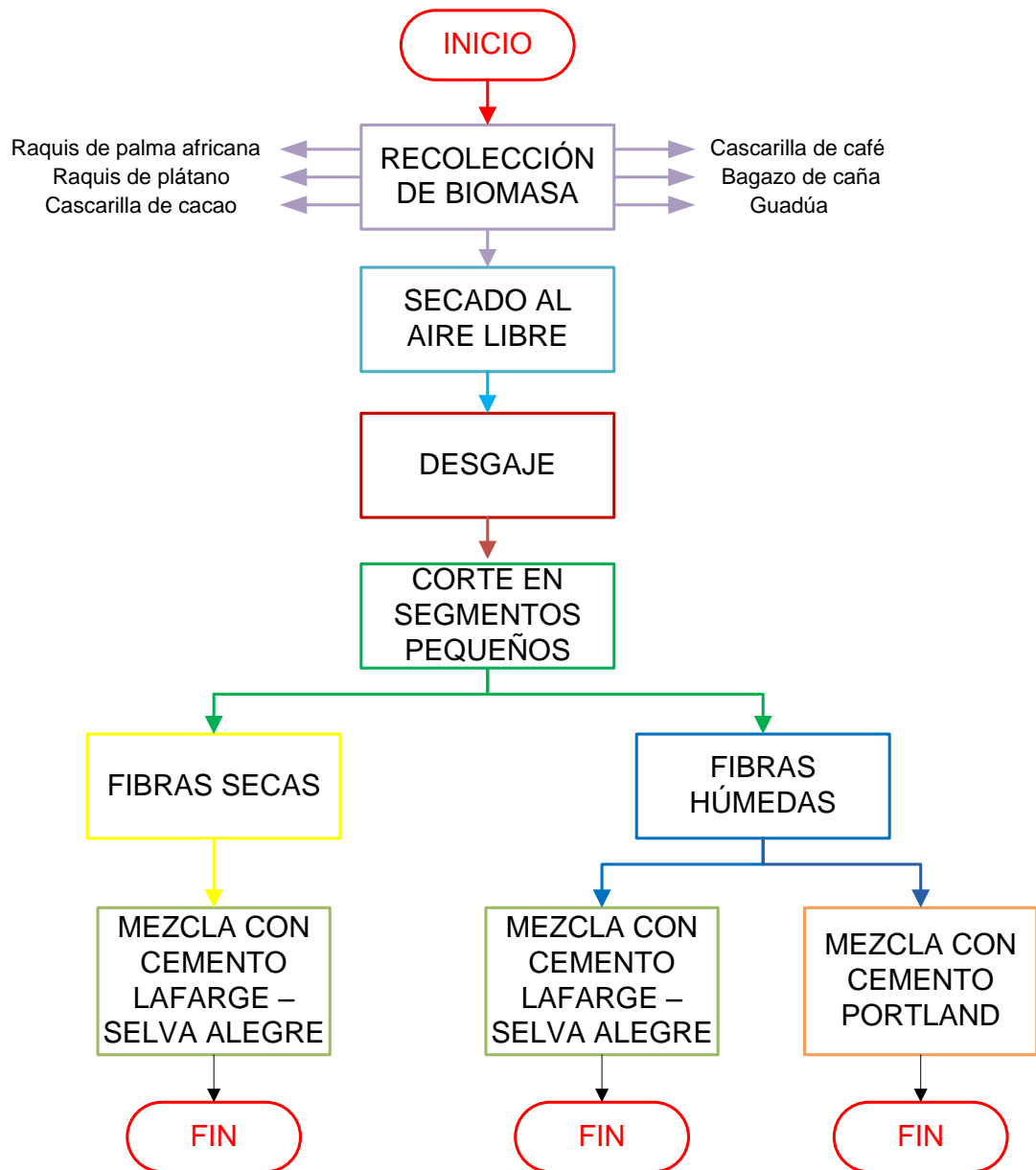


Figura 46. Esquema a seguir para la preparación de mezclas

3.5. CALIBRACIÓN DEL EQUIPO

3.5.1. PRUEBA PILOTO CON AGUA DESTILADA

Previo a la utilización del equipo y a la realización de pruebas en el mismo, se lleva a cabo pruebas pilotos en el equipo denominado “Calorímetro para Cemento Portland Puzolánico”. Para lo cual verificar el correcto funcionamiento del mismo, y si existe alguna novedad tomar las medidas adecuadas.

A continuación se determina la temperatura bajo la presencia de agua destilada, la misma que posee una temperatura de 24°C, esto es determinado gracias al termómetro de mercurio facilitado por el Laboratorio de Termodinámica del DECEM.



Figura 47. Medición del agua destilada con termómetro de mercurio

Posterior a ello, se lo compara con el calorímetro, primero inspeccionar que los sensores de temperatura se encuentren en buen estado, así como la existencia en el ordenador del software Arduino y Labview. Proceder a conectar los cables a la placa de Arduino UNO, verificando los pines y que el cable USB se encuentre en perfecto estado para poder conectarlo a una computadora de escritorio y realizar la toma de datos de las muestras.

Por otra parte, una vez ya inspeccionadas todas las partes del calorímetro y sus componentes, introducir el vaso térmico con agua destilada dentro del calorímetro y luego cerrar completamente por las tres tapas, posterior a ello, obtener las medidas de temperatura interna y de aislamiento, gracias a la termocupla tipo K y al sensor DHT11, respectivamente.

Tanto en el termómetro de mercurio, como en la interfaz HMI presentan una temperatura de 24°C como se muestra a continuación. Adicional a ello, la humedad relativa es del 35%.

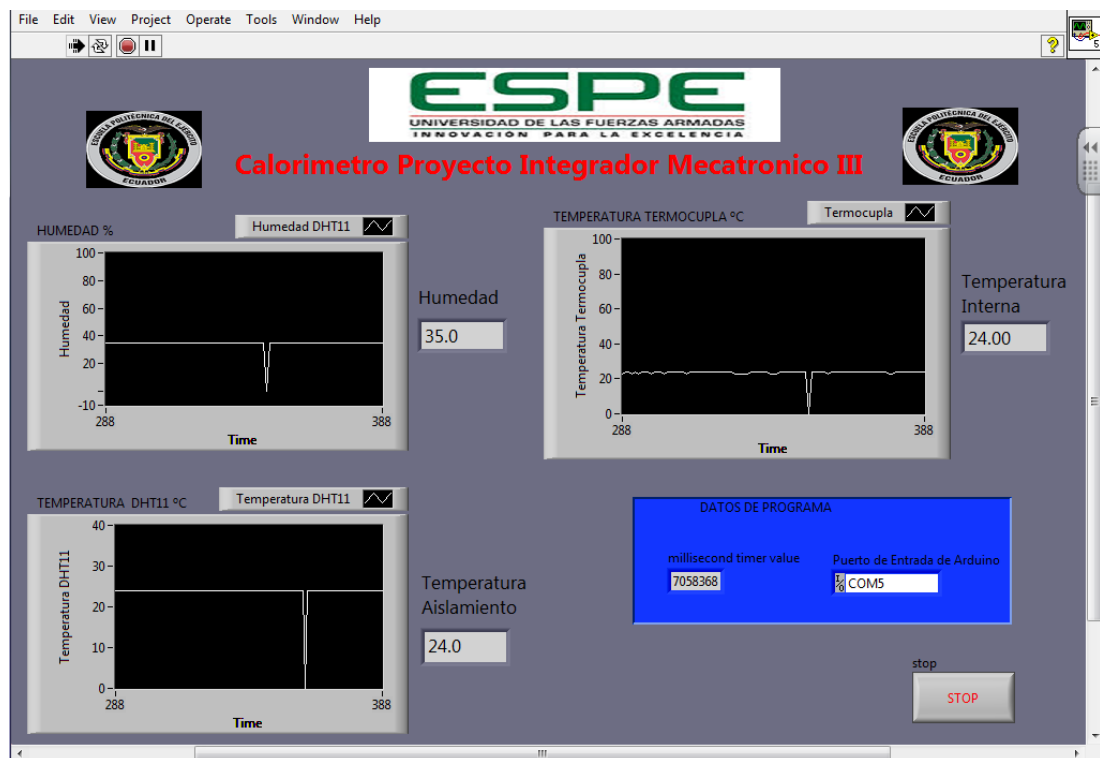


Figura 48. Resultados en la interfaz HMI con el agua destilada

Con estos resultados, determinar que el software se encuentra en buen estado, es decir que no existe error alguno en cuanto a la determinación de datos.

3.5.2. PRUEBA PILOTO CON PASTA AGLUTINANTE

A continuación, se desarrolla de la misma manera con la pasta de cemento portland puzolánico Lafarge – Selva Alegre y agua, donde se determina que la temperatura es de 23°C, con la ayuda del termómetro de mercurio.



Figura 49. Medición de la pasta de cemento con el termómetro de mercurio

Posterior a ello, la mezcla es almacenada en el vaso térmico, el mismo que es introducido dentro del calorímetro, realizar los mismos pasos expuestos para el agua destilada. Una vez sellado el calorímetro, proceder a cargar el programa en LabVIEW y verificar las temperaturas. La temperatura interna es de 22.25°C como se muestra a continuación.

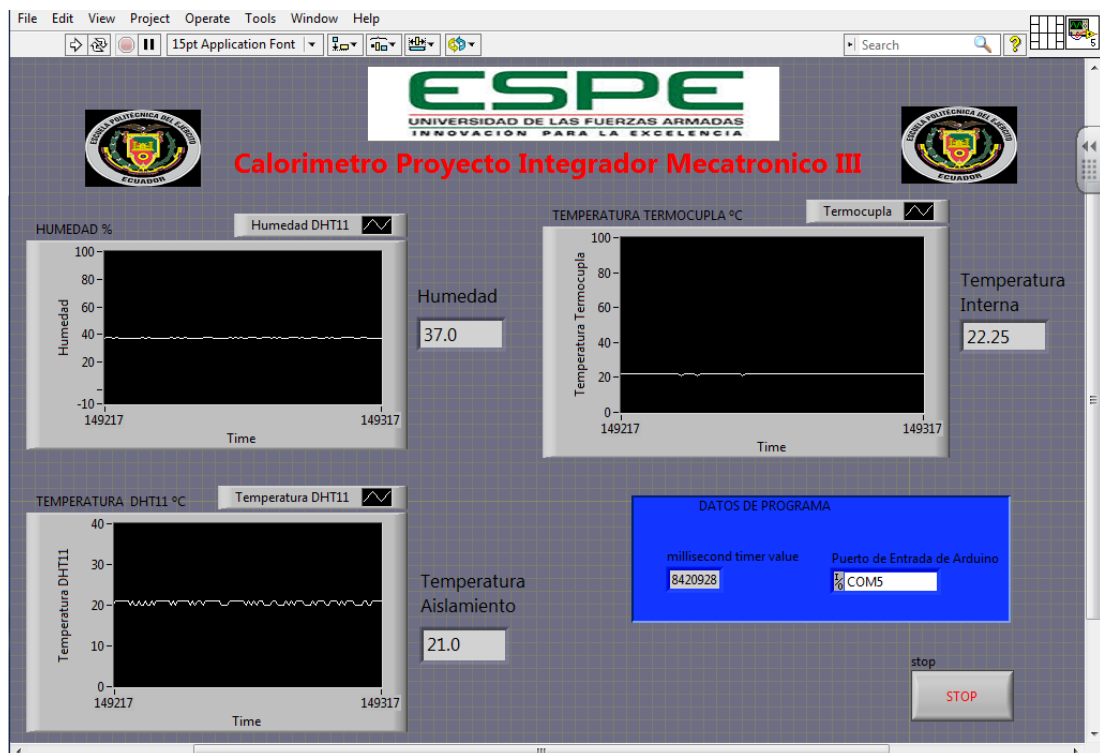


Figura 50. Resultados en la interfaz HMI con la pasta de cemento

Cabe recalcar que no existe mayor diferencia de temperatura entre el termómetro de mercurio y el calorímetro respectivamente. Además la temperatura de aislamiento es de 21°C, esto se debe al porcentaje de error que existe en el sistema adiabático del calorímetro. Adicional a ello, la humedad es del 37%.

3.6. ENSAYOS REALIZADOS

3.6.1. CEMENTO PORTLAND

El cemento portland a utilizar es de procedencia española, cabe recalcar que el material restante se almacena en varias fundas completamente cerradas, cubrir el cemento para su mejor conservación y utilización durante el proceso experimental es de suma importancia.

La mezcla se efectúa durante 5 minutos, siguiendo el procedimiento respectivo, 150 gramos de cemento y 60 cm³ de agua destilada por medio de una varilla de agitación de vidrio. La relación de agua/cemento es igual a 0.4. Durante los 2 primeros minutos, la pasta es de forma algo suave y al transcurrir más tiempo, ésta es aún más. El color que toma la pasta aglutinante es gris, pero más clara que la del cemento Lafarge – Selva Alegre, y finalmente la pasta seca toma una superficie rugosa.

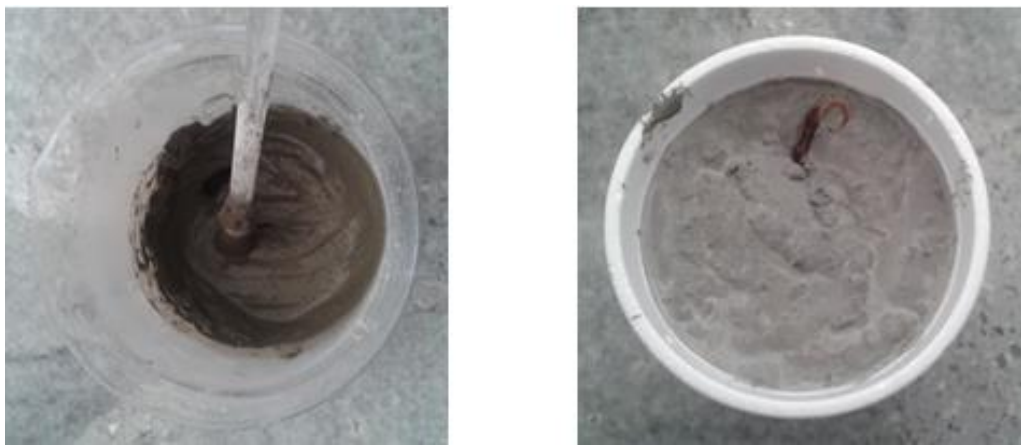


Figura 51. Pasta de cemento portland

Al ser retirada la muestra del calorímetro, observar en la figura 3.19., que en la tapa del primer recipiente de aislamiento, presenta gotas de vapor de agua húmedo, esto es gracias a la presencia de la mezcla realizada, así mismo presenta acumulación de agua en la parte inferior del recipiente. (Figura 3.2)

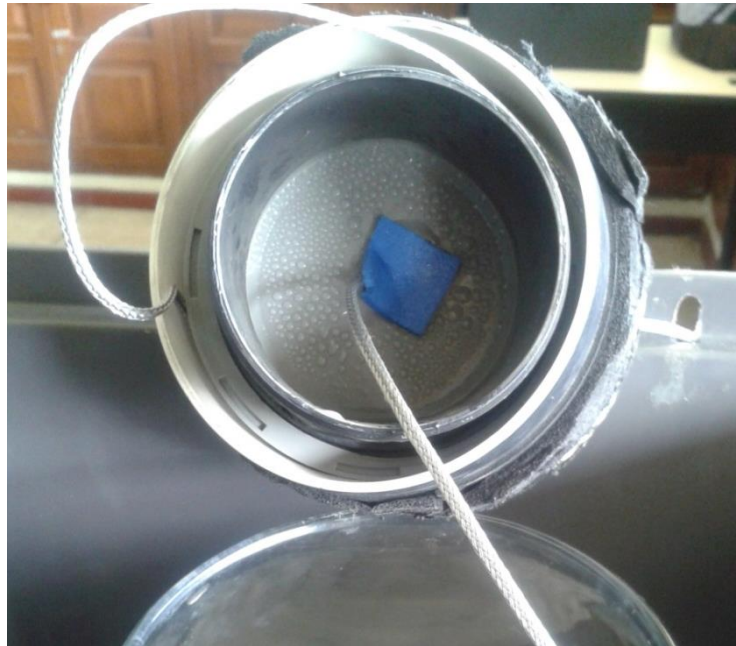


Figura 52. Tapa del primer recipiente de aislamiento con gotas de vapor saturado

3.6.2. CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO TIPO IP

El cemento portland puzolánico tipo IP utilizado es proveniente de la empresa Lafarge – Selva Alegre, adquirido en el sector del Triángulo, donde se distribuye dicho cemento. El material restante es almacenado en el mismo saco de papel adquirido y completamente cubierto para su mejor conservación y utilización durante el proceso experimental.

Así mismo, seguir el mismo procedimiento que con el cemento portland. La relación de agua/cemento es igual a 0.4. Durante los 2 primeros minutos, la pasta formada es algo dura y al transcurrir más tiempo, ésta se vuelve más suave, y presenta mayor facilidad para ser agitada. El color que toma la pasta aglutinante es gris, y finalmente la pasta seca toma una superficie lisa.



Figura 53. Pasta de cemento portland puzolánico tipo IP

Al ser retirada la muestra del calorímetro, observar que el mismo está ligeramente con vapor de agua húmedo por la presencia de la mezcla.



Figura 54. Calorímetro con vapor saturado

3.6.3. RAQUIS DE PALMA AFRICANA

El raquis de palma africana utilizada es de procedencia de Santo Domingo de los Tsáchilas y es el residuo del proceso industrial de la extracción de aceite, mediante vapor de agua, el mismo que es entregado por el tutor del proyecto de investigación. El material restante es almacenado en bolsas plásticas para su conservación y utilización durante el proceso experimental.

Por cada biomasa realizar 3 muestras. Para el cemento portland puzolánico tipo IP con fibras secas, cortar con tijeras en segmentos pequeños, el raquis de palma seco es muy delgado y mezclados de forma aleatoria forman fácilmente como una masa de fibras. Todos los ensayos son realizados con una relación agua/cemento = 0.4, por lo tanto se adiciona 60 cm³ de agua destilada, o lo mismo que 60 gramos, con 150 gramos de cemento portland puzolánico Lafarge – Selva Alegre y 11 gramos de raquis de palma africana.



Figura 55. Pasta con raquis de palma africana seca y cemento portland puzolánico tipo IP

Proceder a realizar la misma mezcla en cantidades iguales con las fibras húmedas de raquis de palma africana. Las mismas que anteriormente son humedecidas con agua destilada por aproximadamente 1 hora para que así, el raquis absorba completamente el agua. Para la mezcla las fibras son exprimidas, puesto que si no se lo hace, podría añadirse más agua de la requerida. El peso de las fibras húmedas exprimidas es de 25 gramos.



Figura 56. Pasta con raquis de palma africana húmeda y cemento portland puzolánico tipo IP

Finalmente, para la mezcla con el cemento portland, y con la misma relación agua/cemento = 0.4. En ésta mezcla, las fibras son húmedas, las mismas que poseen un peso de 25 gramos. Ligeramente, el calorímetro se humedece con la presencia de dicha mezcla.



Figura 57. Pasta con raquis de palma africana húmeda y cemento portland

3.6.4. RAQUIS DE PLÁTANO

La procedencia del raquis de plátano a ser utilizado es de Santo Domingo de los Tsáchilas y es el residuo de la extracción del fruto de plátano, el mismo que fue adquirido en el Mercado Central de Sangolquí. El tiempo que se lleva a cabo para el secado del mismo al aire libre y expuesto al sol es de 21 días aproximadamente.

Así mismo, proceder de la misma manera con el cemento portland puzolánico tipo IP y con fibras secas. El raquis de plátano presenta gran dureza al ser cortado con las manos, por lo tanto proceder a cortar con tijeras en segmentos de 2 a 3 cm., adicional a ello, algunas fibras presentan menor grosor que otras. La relación agua/cemento = 0.4, y 11 gramos de raquis de plátano.



Figura 58. Pasta con raquis de plátano seco y cemento portland puzolánico tipo IP

Proceder a realizar la misma mezcla en cantidades iguales con las fibras húmedas de raquis de plátano. Las mismas que presentan buenas propiedades como absorbentes de agua. Al momento de ser exprimidas, tomaron características de esponjas, por la rápida liberación del agua destilada. El peso de las fibras húmedas exprimidas es de 30 gramos.



Figura 59. Pasta con raquis de plátano húmedo y cemento portland puzolánico tipo IP

Finalmente, para la mezcla con el cemento portland, y con la misma relación agua/cemento = 0.4. En ésta mezcla, las fibras son húmedas, las mismas que poseen un peso de 30 gramos.



Figura 60. Pasta con raquis de plátano húmedo y cemento portland

3.6.5. CASCARILLA DE CACAO

La procedencia de la cascarilla de cacao a ser utilizada es de Santo Domingo de los Tsáchilas y su extracción proviene de la realización del cacao en polvo, el mismo que es donado por el tutor del proyecto de investigación. El material restante es almacenado en bolsas plásticas para su conservación y utilización durante el proceso experimental.

La primera mezcla es con cemento portland puzolánico tipo IP y con fibras secas. La cascarilla de cacao es fácilmente quebrantada con las manos en segmentos pequeños, para que puedan ser mezclados con facilidad. Algunas cascarillas a mezclar presentan la corteza interna de fina capa, y éstas presentan menor resistencia al momento de ser quebrantadas. La relación agua/cemento = 0.4, y 11 gramos de cascarilla de cacao.



Figura 61. Pasta con cascarilla de cacao seca y cemento portland puzolánico tipo IP

Proceder a realizar la misma mezcla en cantidades iguales con las fibras húmedas de cascarilla de cacao. Las mismas que anteriormente son humedecidas con agua destilada por aproximadamente 1 hora para que así, la cascarilla absorba completamente el agua. Al momento de ser exprimidas se presentan sumamente duras. El peso de las fibras húmedas es de 24 gramos.



Figura 62. Pasta con cascarilla de cacao húmeda y cemento portland puzolánico tipo IP

Finalmente, para la mezcla con el cemento portland, realizar con la misma relación agua/cemento = 0.4. En ésta mezcla, las fibras son húmedas, las mismas que poseen un peso de 25 gramos. Como se muestra

a continuación el calorímetro presenta poca agua acumulada en el primer recipiente de aislamiento, gracias a la presencia de dicha mezcla.



Figura 63. Pasta con cascarilla de cacao húmeda y cemento portland

3.6.6. CASCARILLA DE CAFÉ

La cascarilla de café utilizada para las mezclas es de procedencia de Santo Domingo de los Tsáchilas y su extracción proviene de la realización del café en polvo, la cascarilla de café es donada por el tutor del proyecto de investigación. El material restante es almacenado en bolsas plásticas para su conservación y utilización durante el proceso experimental. La cascarilla de café tarda en secar aproximadamente 21 días al aire libre y expuesto al sol.

Para la mezcla con cemento portland puzolánico tipo IP y con fibras secas, la cascarilla de café es fácilmente quebrantada con las manos y no se necesita el realizarlo varias veces, ya que por sí misma la cascarilla posee un tamaño pequeño. La relación agua/cemento = 0.4, y 11 gramos de cascarilla de café.



Figura 64. Pasta con cascarilla de café seca y cemento portland puzolánico tipo IP

Proceder a realizar la misma mezcla en cantidades iguales con las fibras húmedas de cascarilla de café. Las mismas que anteriormente son humedecidas con agua destilada por aproximadamente 1 hora. Al momento de ser exprimidas presentan fácil liberación del agua destilada. El peso de las fibras húmedas exprimidas es de 25 gramos.



Figura 65. Pasta con cascarilla de café húmeda y cemento portland puzolánico tipo IP

Finalmente, realizar la mezcla con el cemento portland, y con la misma relación agua/cemento = 0.4. En ésta mezcla, las fibras son húmedas, las mismas que poseen un peso de 25 gramos. Así mismo, como en el caso de

las cascarillas de cacao, el calorímetro presenta ligeramente poca agua acumulada en el primer recipiente de aislamiento.



Figura 66. Pasta con cascarilla de café húmeda y cemento portland

3.6.7. BAGAZO DE CAÑA

La procedencia del bagazo de caña utilizado es de Baños de Agua Santa, provincia de Tungurahua y es el residuo de la extracción del jugo de caña en la molienda, el mismo que fue adquirido en el sector del Tingo. El tiempo que se lleva a cabo para el secado del mismo al aire libre y expuesto al sol es de 21 días aproximadamente.

Para la mezcla con el cemento portland puzolánico tipo IP y con fibras secas, el bagazo de caña con cáscara presenta gran dureza, por lo tanto proceder a deshilar en segmentos longitudinales. Aproximadamente, los segmentos son de 2 a 3 cm., adicional a ello, existen fibras de menor grosor que otras, unas con cáscara y otras sin cáscara. La relación agua/cemento = 0.4, y 11 gramos de bagazo de caña.



Figura 67. Pasta con bagazo de caña seco y cemento portland puzolánico tipo IP

Proceder a realizar la misma mezcla en cantidades iguales con las fibras húmedas del bagazo de caña. Las mismas que presentan buenas propiedades como absorbentes de agua. Al igual que el raquis de plátano, al momento de ser exprimidas, tomaron características de esponjas por la rápida liberación del agua destilada. El peso de las fibras húmedas exprimidas es de 25 gramos.



Figura 68. Pasta con bagazo de caña húmedo y cemento portland puzolánico tipo IP

Finalmente, realizar la mezcla con el cemento portland, y con la misma relación agua/cemento = 0.4. En ésta mezcla, las fibras son húmedas, las mismas que poseen un peso de 25 gramos.



Figura 69. Pasta con bagazo de caña húmedo y cemento portland

3.6.8. GUADÚA

La procedencia de la guadúa utilizada es de Quevedo, provincia de Los Ríos, la misma que fue adquirida en el sector de Tumbaco, donde realizan muebles de éste tipo, para la obtención de las fibras primero se realiza el corte en segmentos de 3 metros de largo, después el aplastamiento de las mismas, luego se corta en segmentos más pequeños para realizar la limpieza correspondiente y finalmente las fibras se obtienen mediante un cepillo manual de carpintería, aproximadamente de 15 cm. de largo por 3 cm. de ancho.

Iniciar con cemento portland puzolánico tipo IP y con fibras secas. La guadúa presenta gran dureza al querer ser cortado con las manos, por lo tanto proceder a cortar con tijeras en segmentos de 2 a 3 cm. de largo, por 0.5 y 1 cm. de ancho., aproximadamente. La relación agua/cemento = 0.4, y 11 gramos de caña guadúa.



Figura 70. Pasta con guadúa seca y cemento portland puzolánico tipo IP

Proceder a realizar la misma mezcla en cantidades iguales con las fibras húmedas de la guadúa. Las mismas que presentan una baja liberación de agua destilada, y la absorción de la misma de igual manera. El peso de las fibras húmedas exprimidas es de 15 gramos.



Figura 71. Pasta con guadúa húmeda y cemento portland puzolánico tipo IP

Finalmente, realizar la mezcla con el cemento portland, y con la misma relación agua/cemento = 0.4. En ésta mezcla, las fibras son húmedas, las mismas que poseen un peso de 25 gramos.



Figura 72. Pasta con guadúa húmeda y cemento portland

3.7. ENSAYOS REALIZADOS ADICIONALES

3.7.1. GUADÚA

El primer ensayo realizado con la guadúa, es la adición de más agua a la mezcla, es decir mezclar 150 gramos de cemento portland puzolánico tipo IP con 120 cm³ de agua destilada, y 11 gramos de guadúa húmeda. Con una relación agua/cemento = 0.8. La pasta al ser retirada del calorímetro muestra aún agua sobre la superficie de la misma, y finalmente una vez seca, presenta poros y no existe un completo cubrimiento del cemento.



Figura 73. Pasta con guadúa húmeda y cemento portland puzolánico tipo IP con adición de más agua a la mezcla

El segundo ensayo realizado, es la adición de más cemento en la mezcla, es decir se mezcla 170 gramos de cemento portland puzolánico tipo IP con 60 cm^3 de agua destilada, y 11 gramos de guadúa húmeda. La relación agua/cemento = 0.35. Por lo que la pasta aglutinante presenta más dureza al ser agitada con la biomasa.



Figura 74. Pasta con guadúa húmeda y adición de más cemento portland puzolánico tipo IP a la mezcla

El tercer ensayo realizado, es respecto con la disminución de biomasa en la mezcla, es decir mezclar 150 gramos de cemento portland puzolánico tipo IP con 60 cm^3 de agua destilada, y 5 gramos de guadúa seca. Con una relación agua/cemento = 0.4. Una vez que la pasta está completamente seca, la superficie de la mezcla toma apariencia semejante a la del cemento portland puzolánico tipo IP.



Figura 75. Pasta con cemento portland puzolánico tipo IP y disminución de guadúa seca en la mezcla

3.7.2. BAGAZO DE CAÑA

El ensayo realizado con el bagazo de caña, es con la adición de más biomasa, es decir mezclar 150 gramos de cemento portland con 60 cm³ de agua destilada, y 19 gramos de bagazo de caña seco. Con una relación agua/cemento = 0.4. Una vez que la pasta está completamente seca, observar que no posee una buena unión el bagazo de caña con el cemento.



Figura 76. Pasta con cemento portland y adición de más bagazo de caña seco en la mezcla

CAPÍTULO IV

PROCESAMIENTO DE DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. PROCESAMIENTO DE DATOS

En la interfaz HMI de LabView, los datos son almacenados en archivos de texto (LVM), por lo cual los datos son registrados cada medio segundo. Esto es de gran ayuda para una mejor realización en cuanto a las curvas de hidratación. Cada una de las curvas de hidratación, tiene una forma dada y son analizadas con muestreos de tiempo según sea conveniente para un mejor análisis, las curvas de hidratación son analizadas cada 5 minutos.

4.1.1. CURVAS DE HIDRATACIÓN

A continuación, se muestran las curvas de hidratación tanto del cemento portland, como del puzolánico tipo IP, y a partir de las mismas se caracterizan las diferentes biomásas ecuatorianas provenientes de raquis de palma africana, raquis de plátano, cascarilla de cacao, cascarilla de café, bagazo de caña, guadúa, correspondientemente.

4.1.1.1. CEMENTO PORTLAND

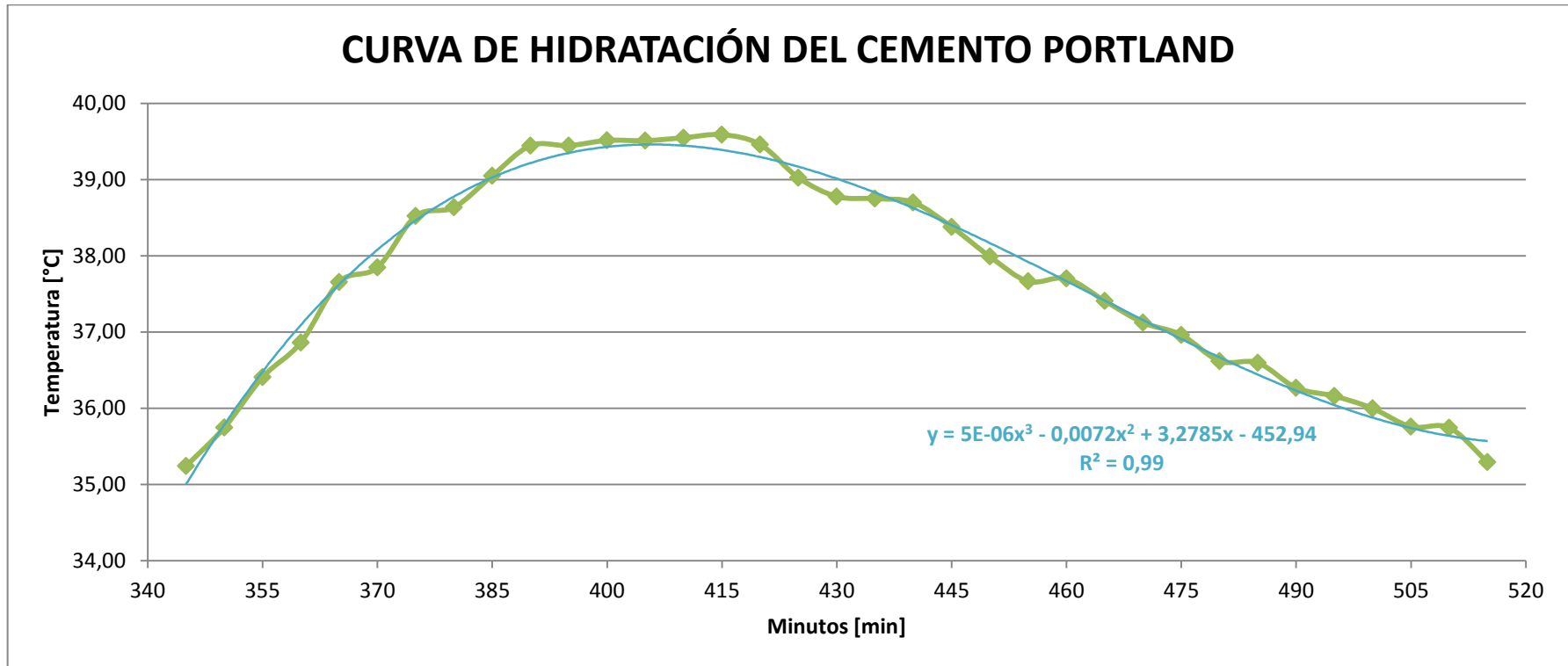


Figura 77. Curva de hidratación del Cemento Portland

4.1.1.2. CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO TIPO IP

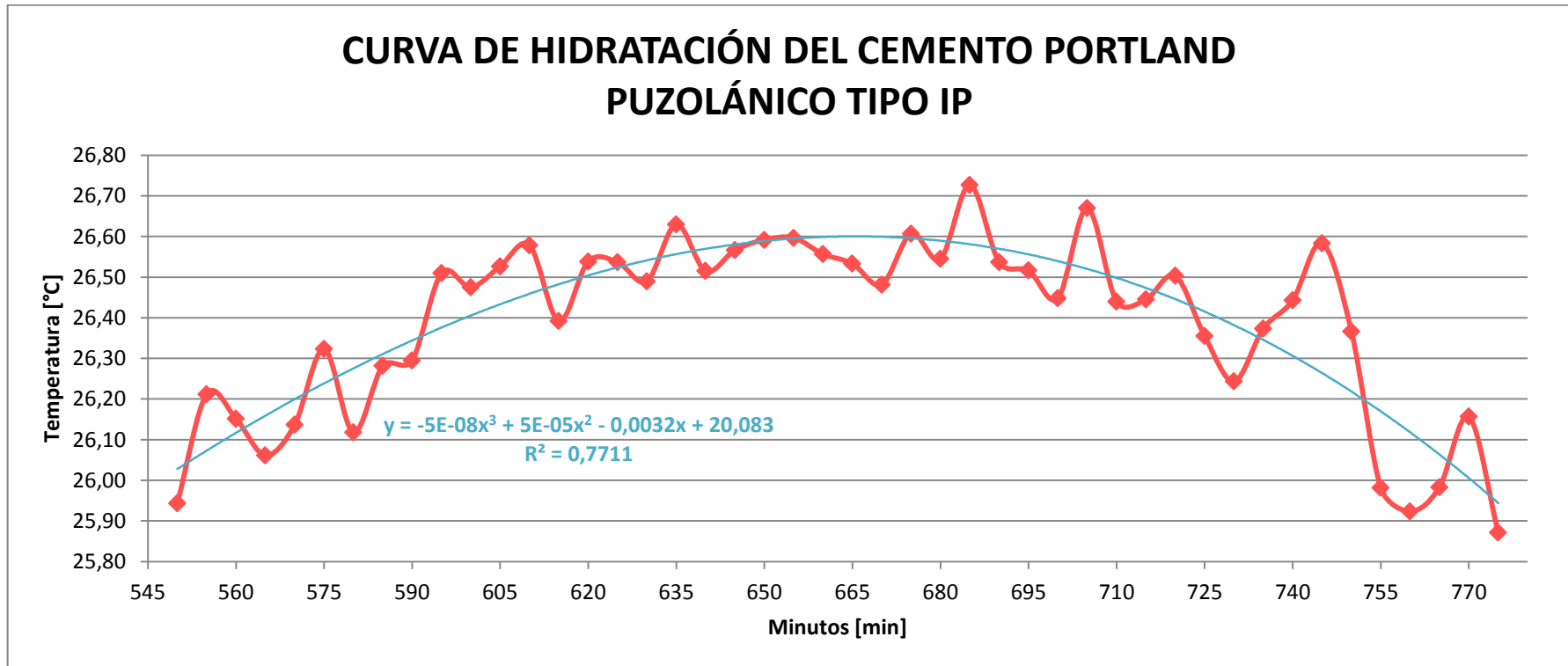


Figura 78. Curva de hidratación del Cemento Portland Pozolánico tipo IP

4.1.1.3. RAQUIS DE PALMA AFRICANA

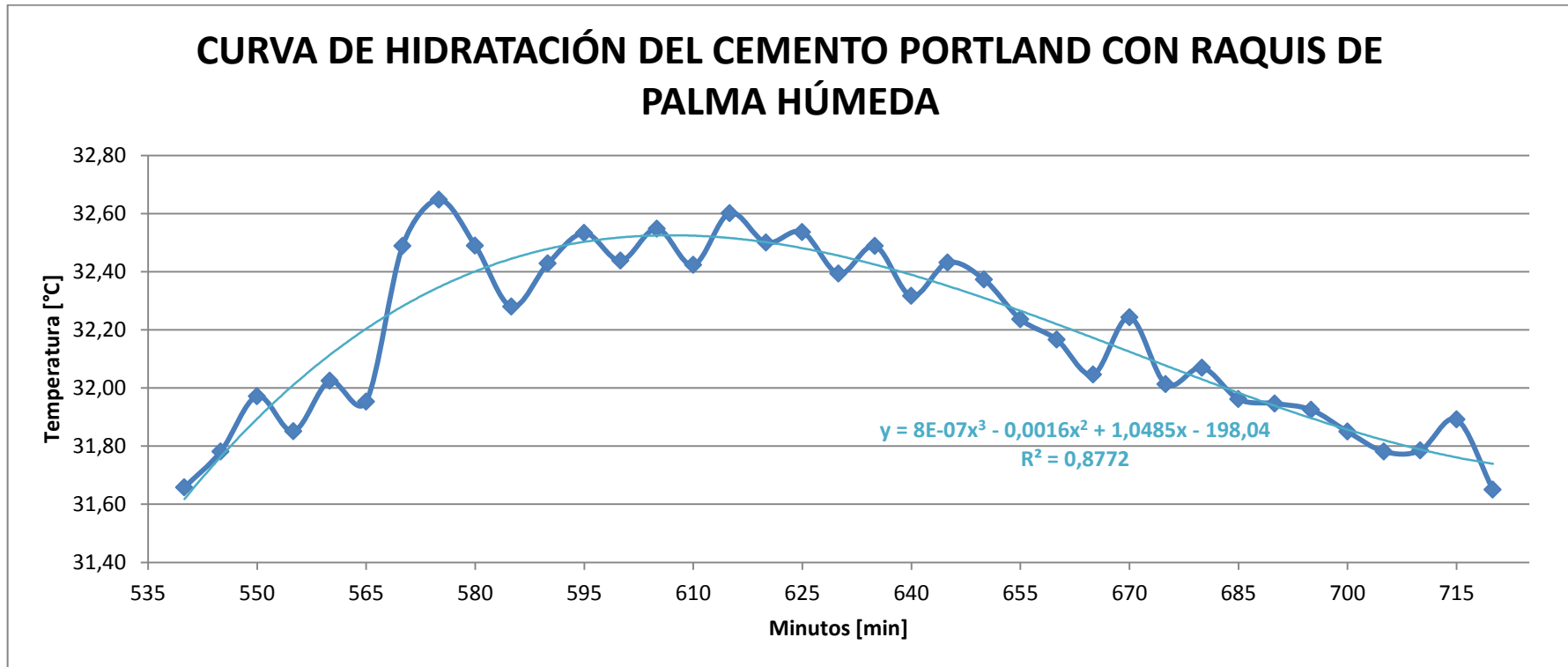


Figura 79. Curva de hidratación del Cemento Portland con raquis de palma húmeda

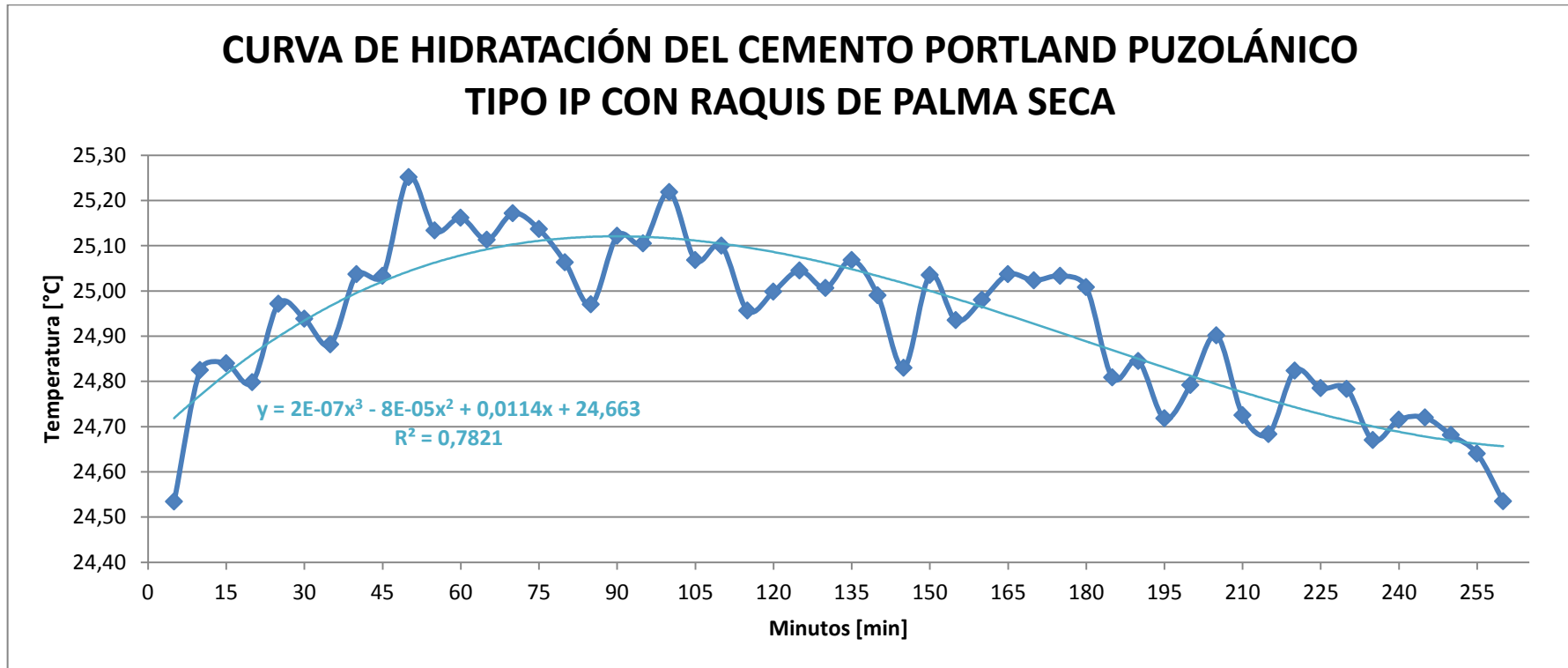


Figura 80. Curva de hidratación del Cemento Portland Pozzolánico tipo IP con raquis de palma seca

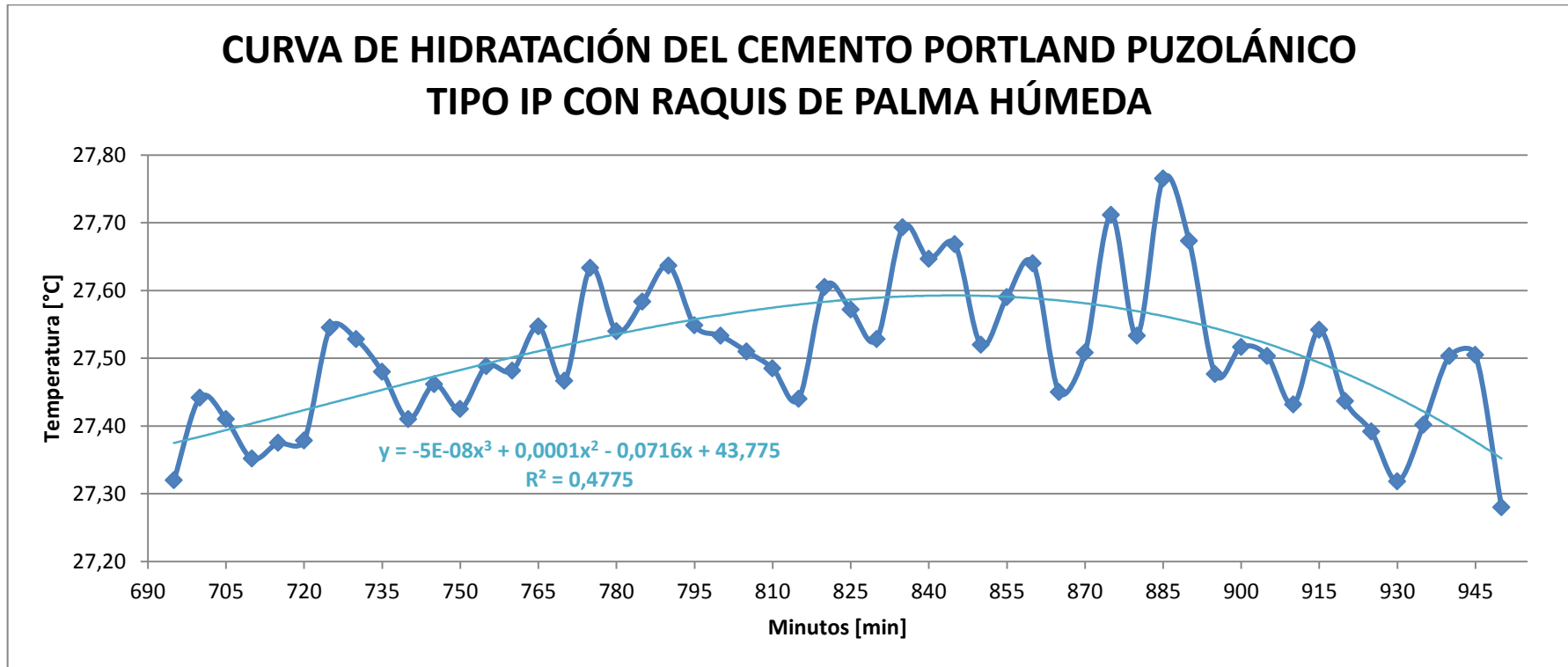


Figura 81. Curva de hidratación del Cemento Portland Pozolánico tipo IP con raquis de palma húmeda

4.1.1.4. RAQUIS DE PLÁTANO

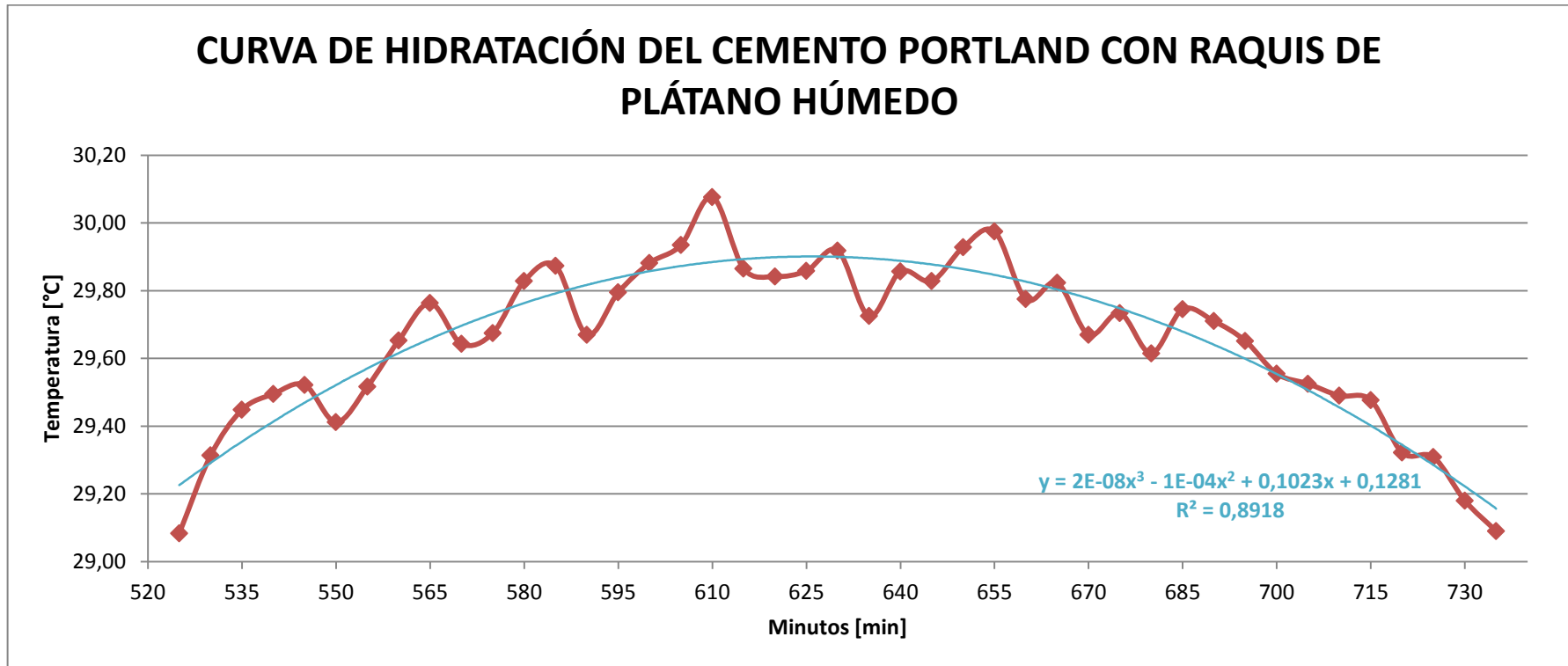


Figura 82. Curva de hidratación del Cemento Portland con raquis de plátano húmedo

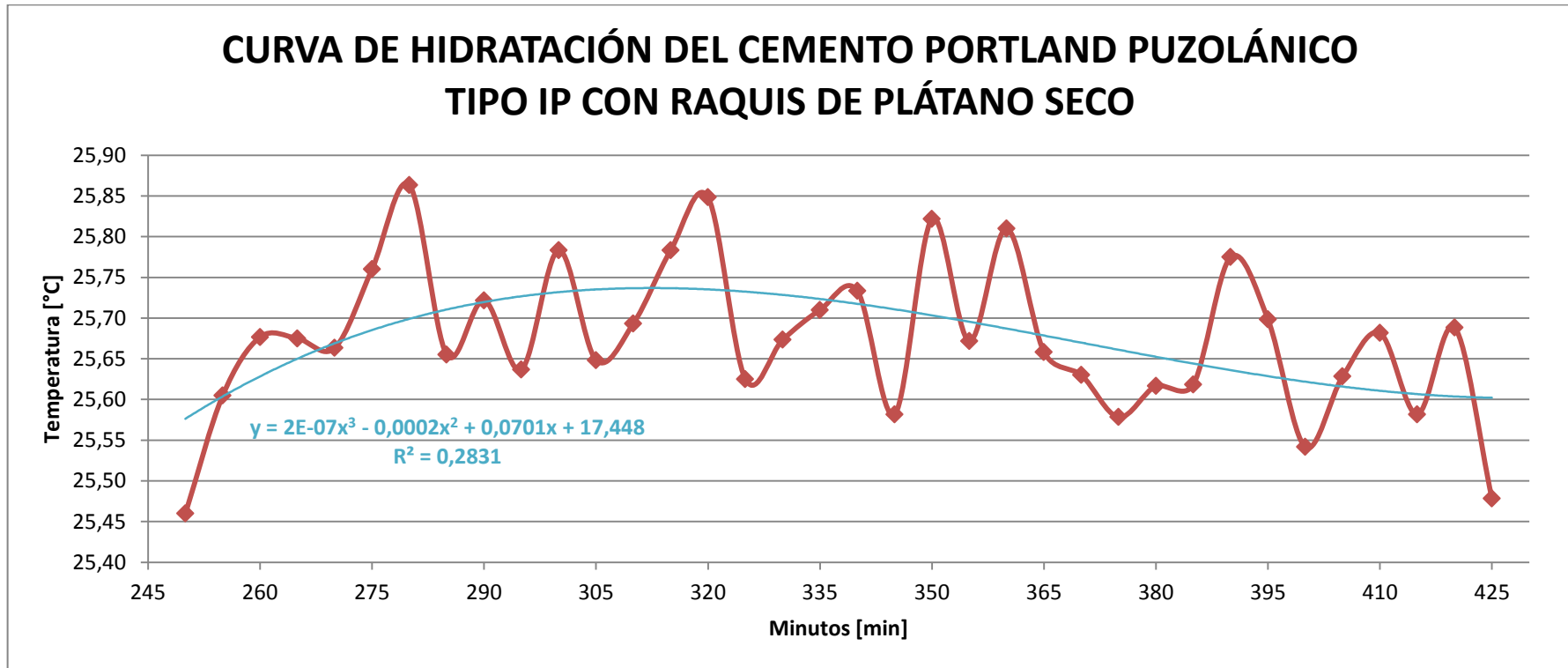


Figura 83. Curva de hidratación del Cemento Portland Pozolánico tipo IP con raquis de plátano seco

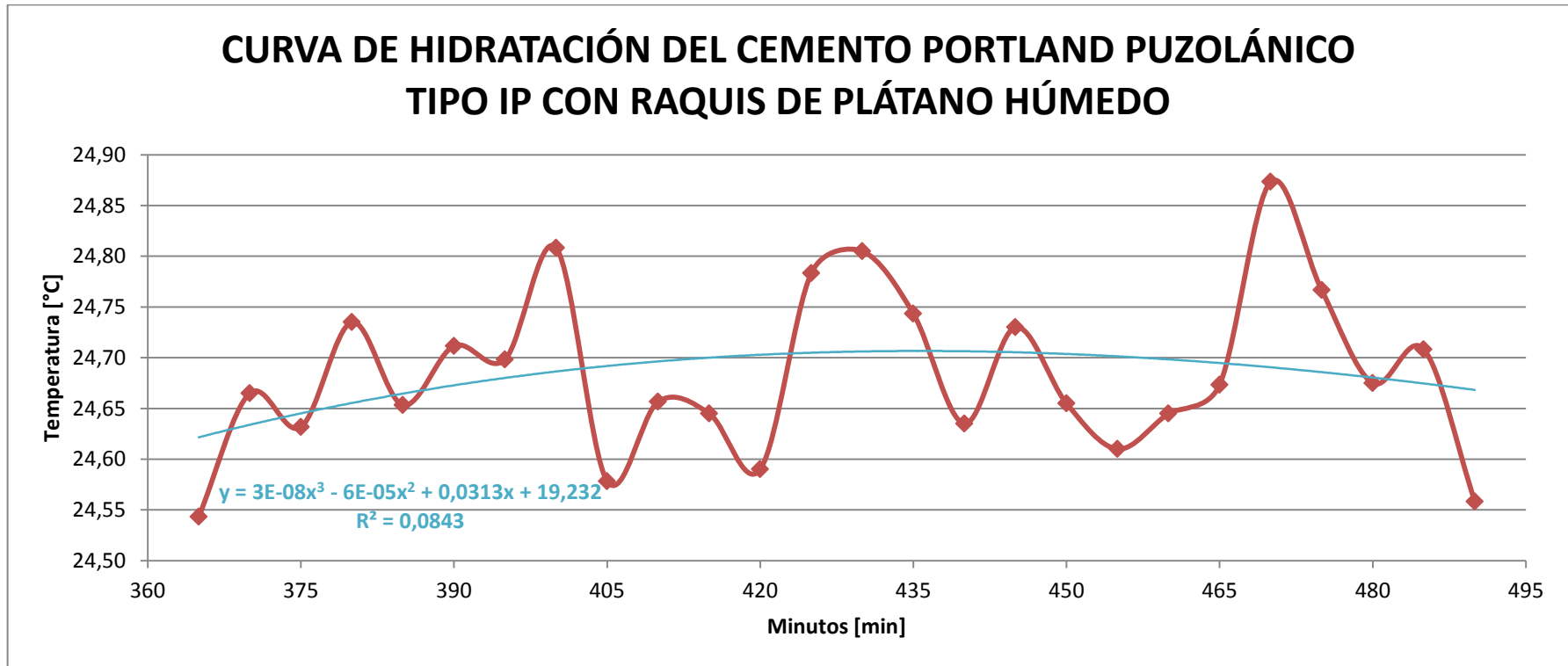


Figura 84. Curva de hidratación del Cemento Portland Pozzolánico tipo IP con raquis de plátano húmedo

4.1.1.5. CASCARILLA DE CACAO

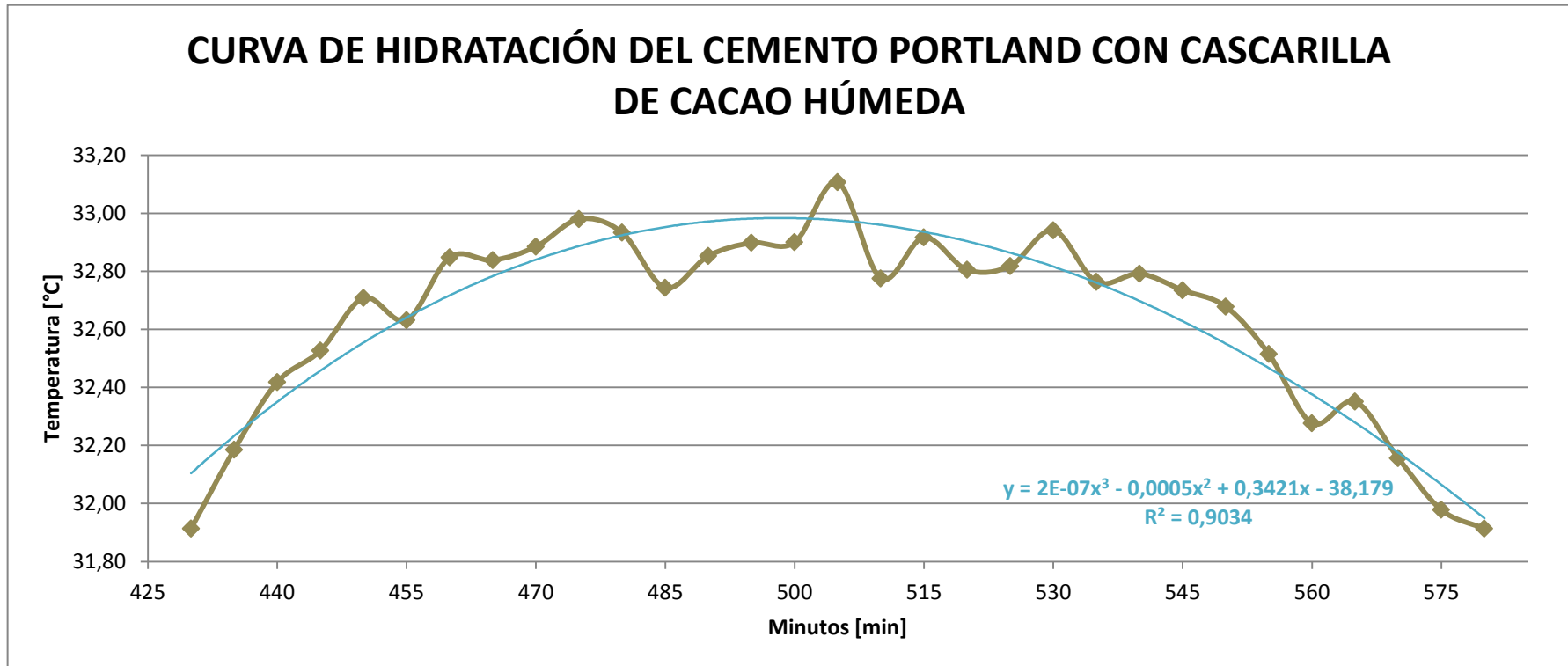


Figura 85. Curva de hidratación del Cemento Portland con cascarilla de cacao húmeda

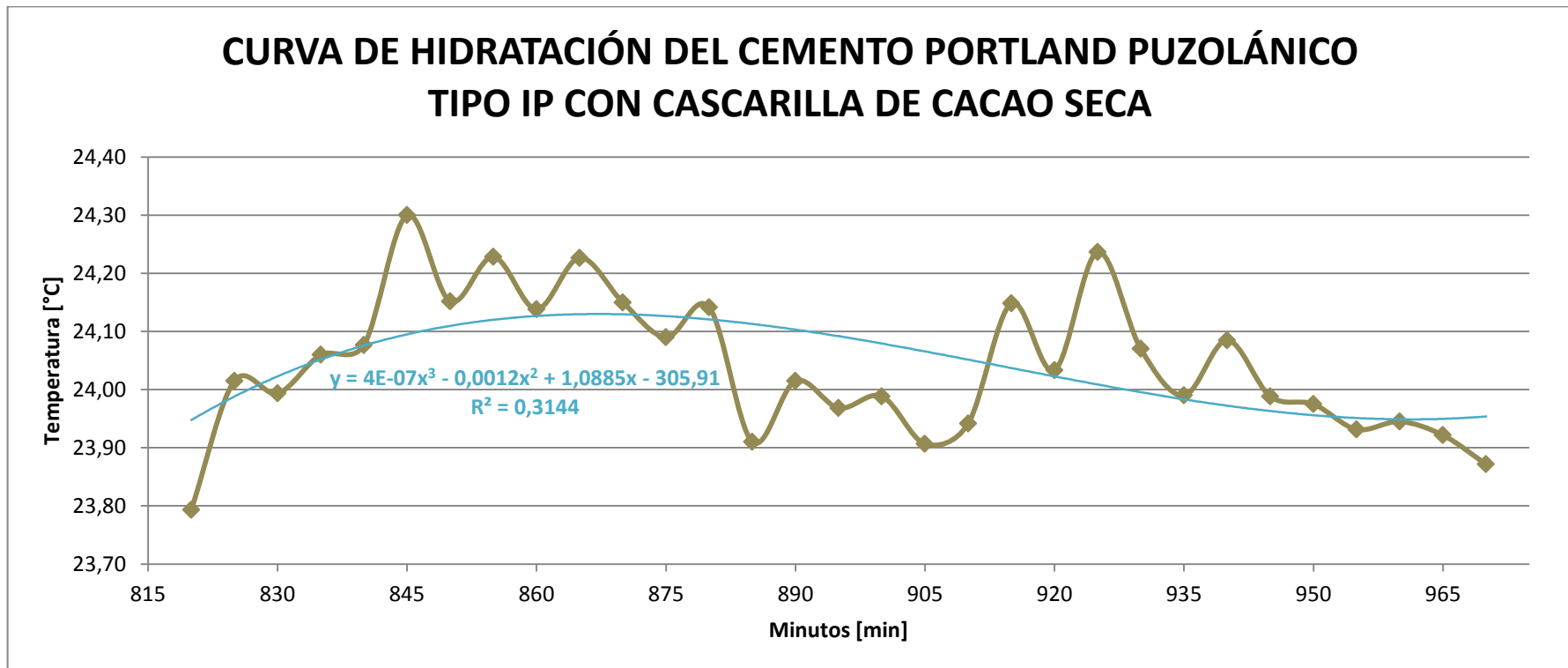


Figura 86. Curva de hidratación del Cemento Portland Pozolánico tipo IP con cascarilla de cacao seca

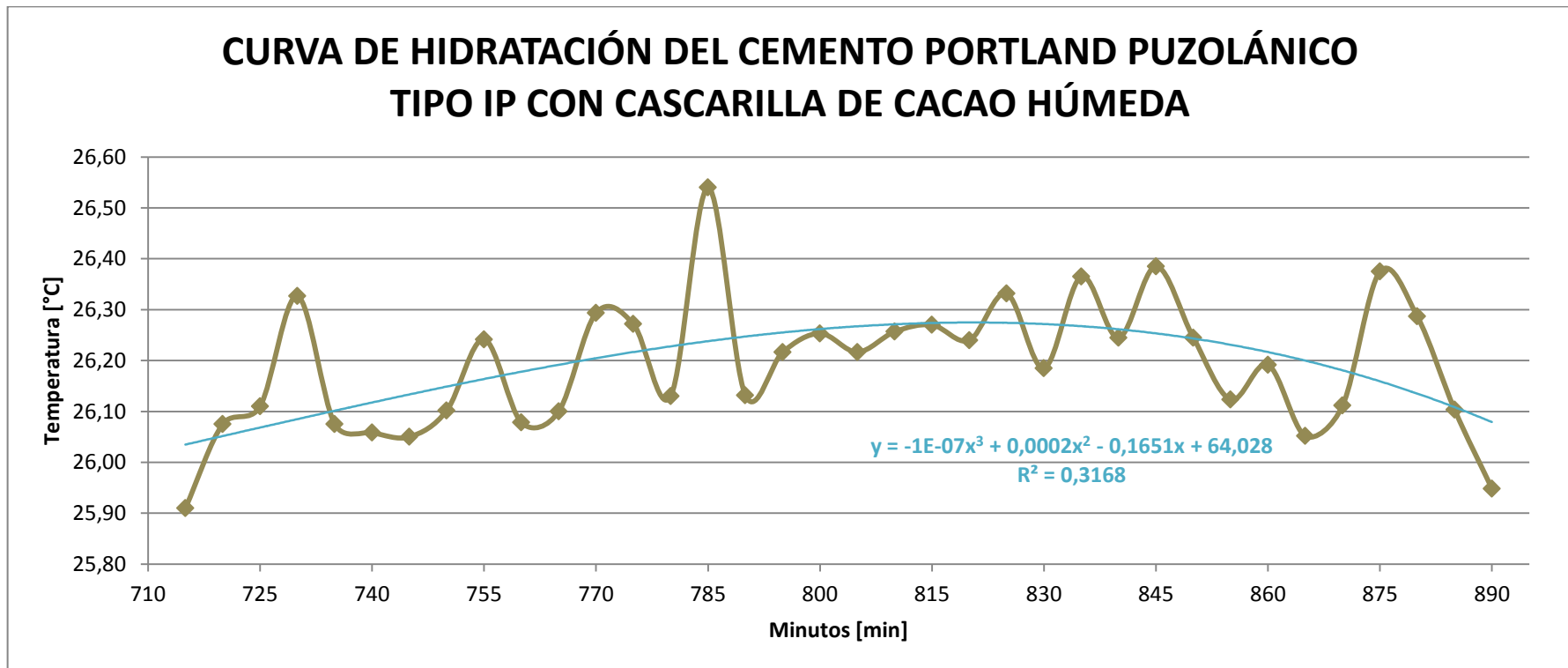


Figura 87. Curva de hidratación del Cemento Portland Pozolánico tipo IP con cascarilla de cacao húmeda

4.1.1.6. CASCARILLA DE CAFÉ

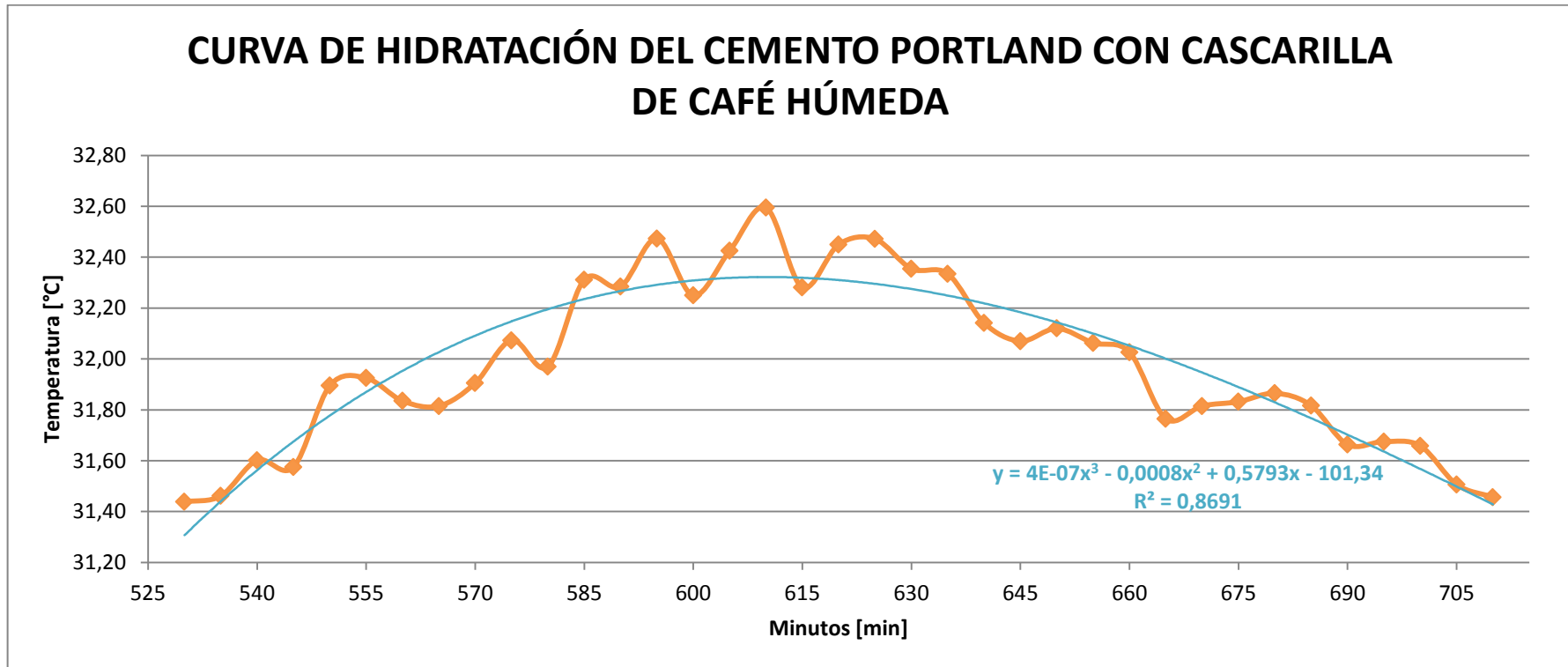


Figura 88. Curva de hidratación del Cemento Portland con cascarilla de café húmeda

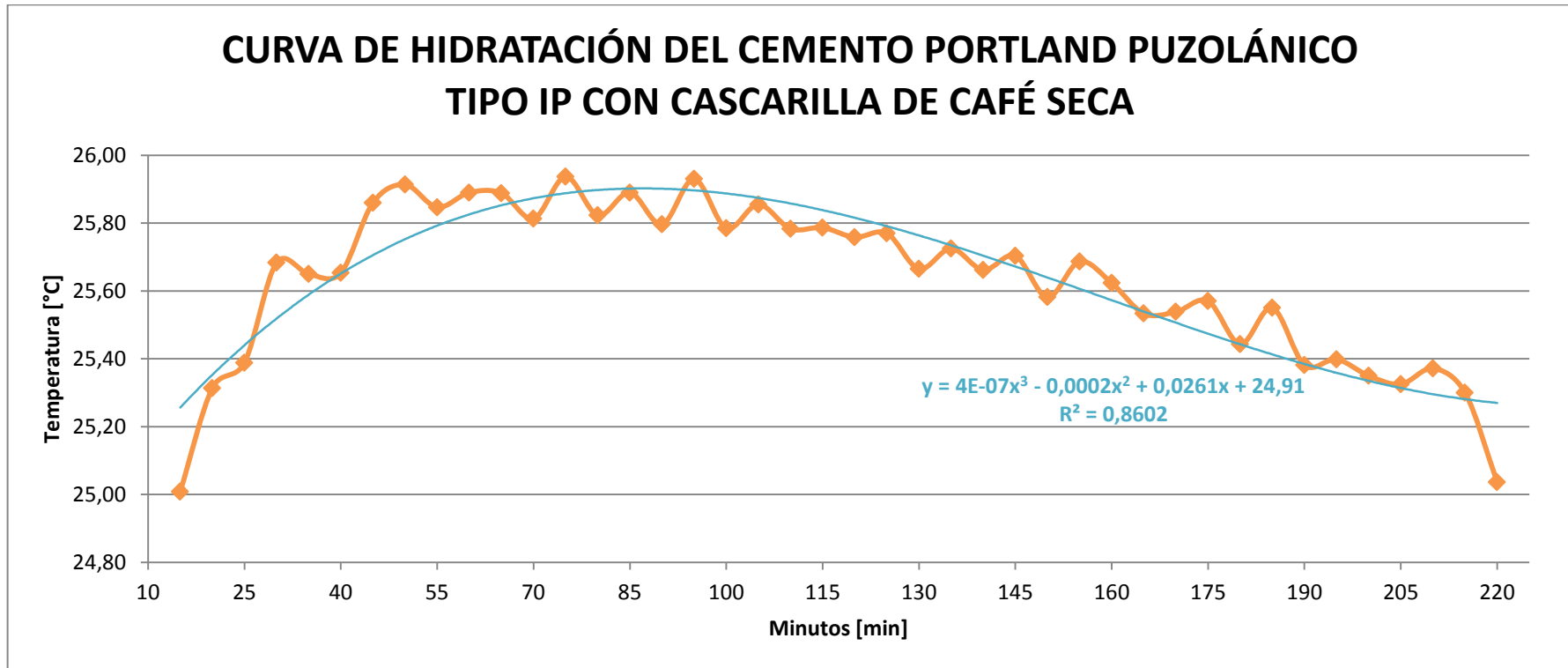


Figura 89. Curva de hidratación del Cemento Portland Pozolánico tipo IP con cascarilla de café seca

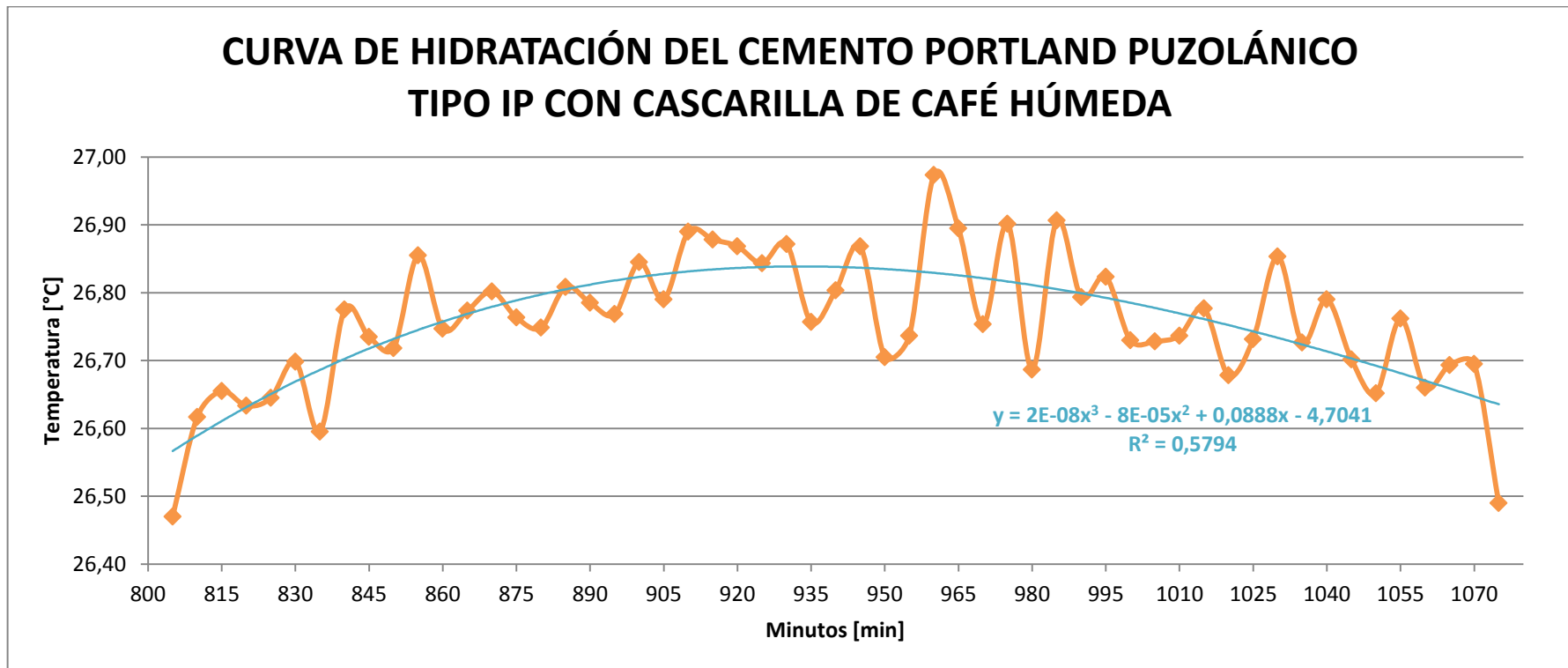


Figura 90. Curva de hidratación del Cemento Portland Pozzolánico tipo IP con cascarilla de café húmeda

4.1.1.7. BAGAZO DE CAÑA

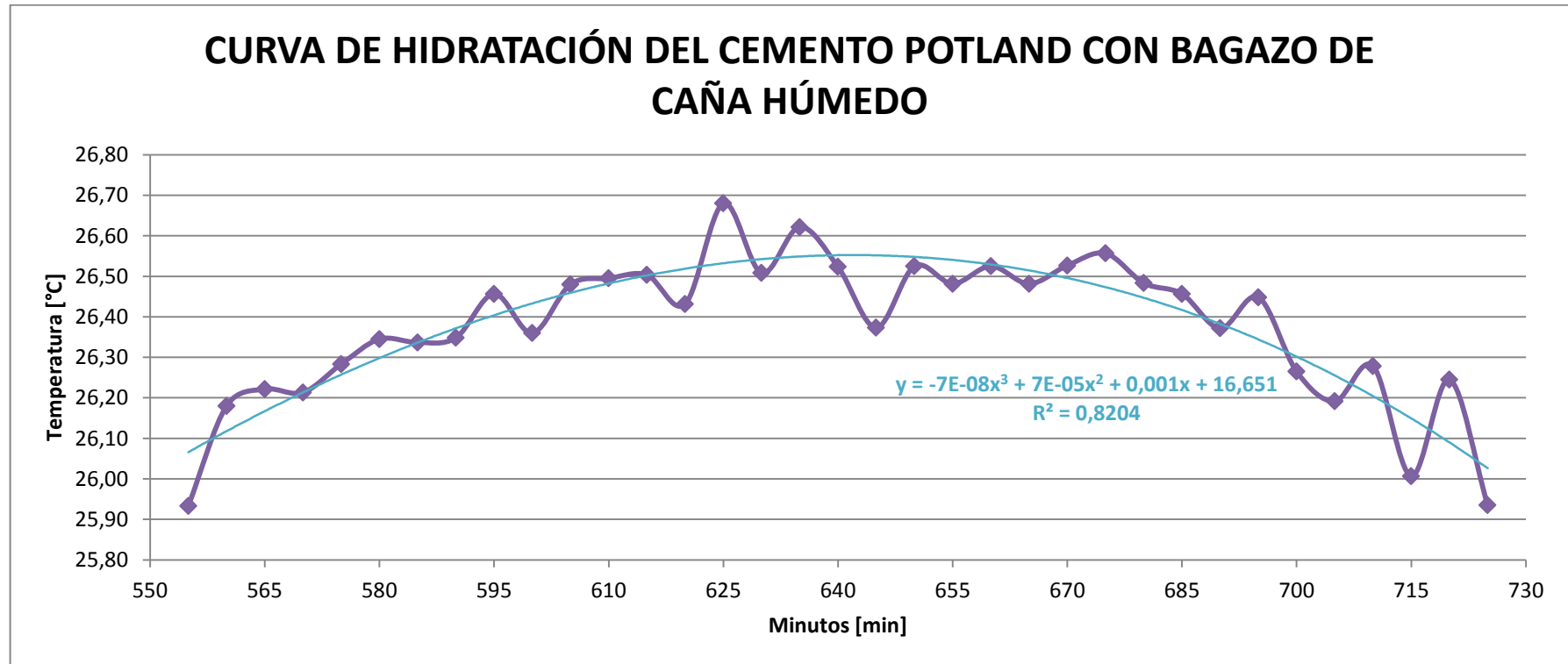


Figura 91. Curva de hidratación del Cemento Portland con bagazo de caña húmedo

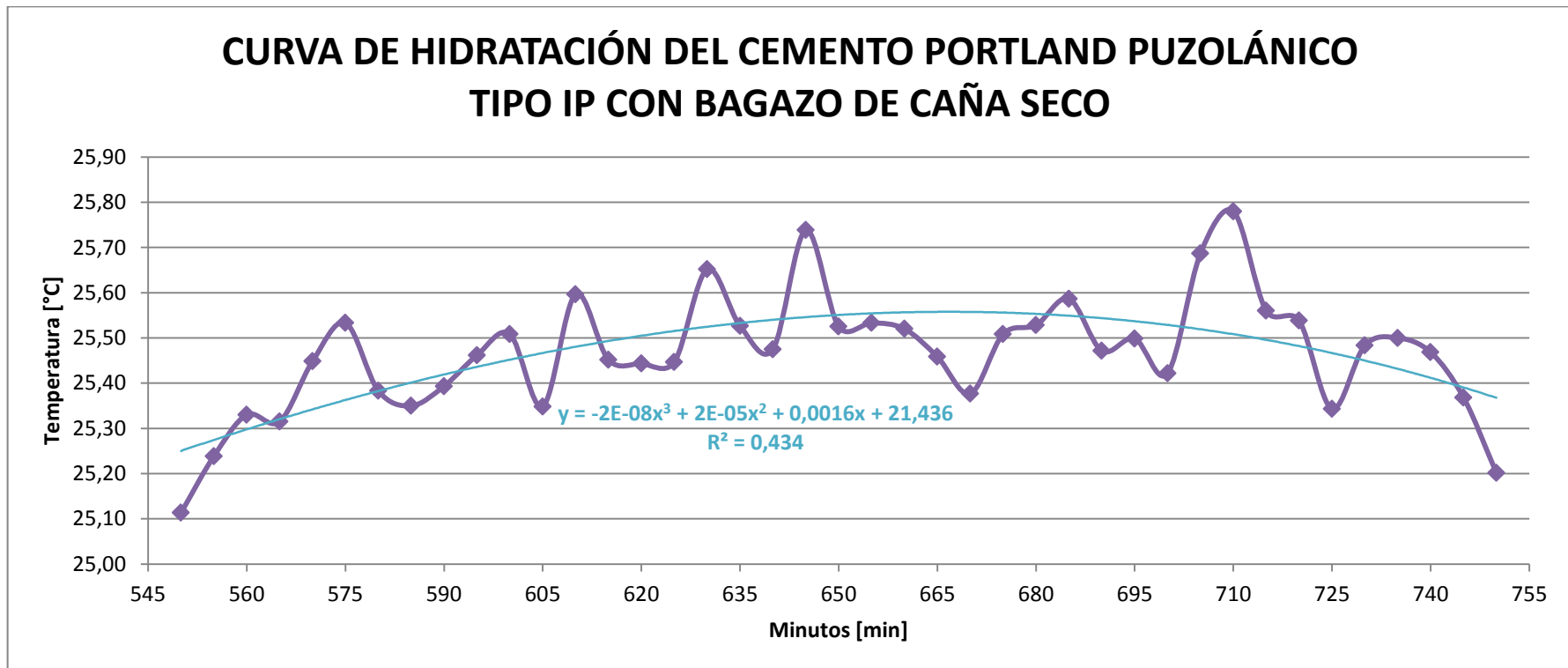


Figura 92. Curva de hidratación del Cemento Portland Pozolánico tipo IP con bagazo de caña seco

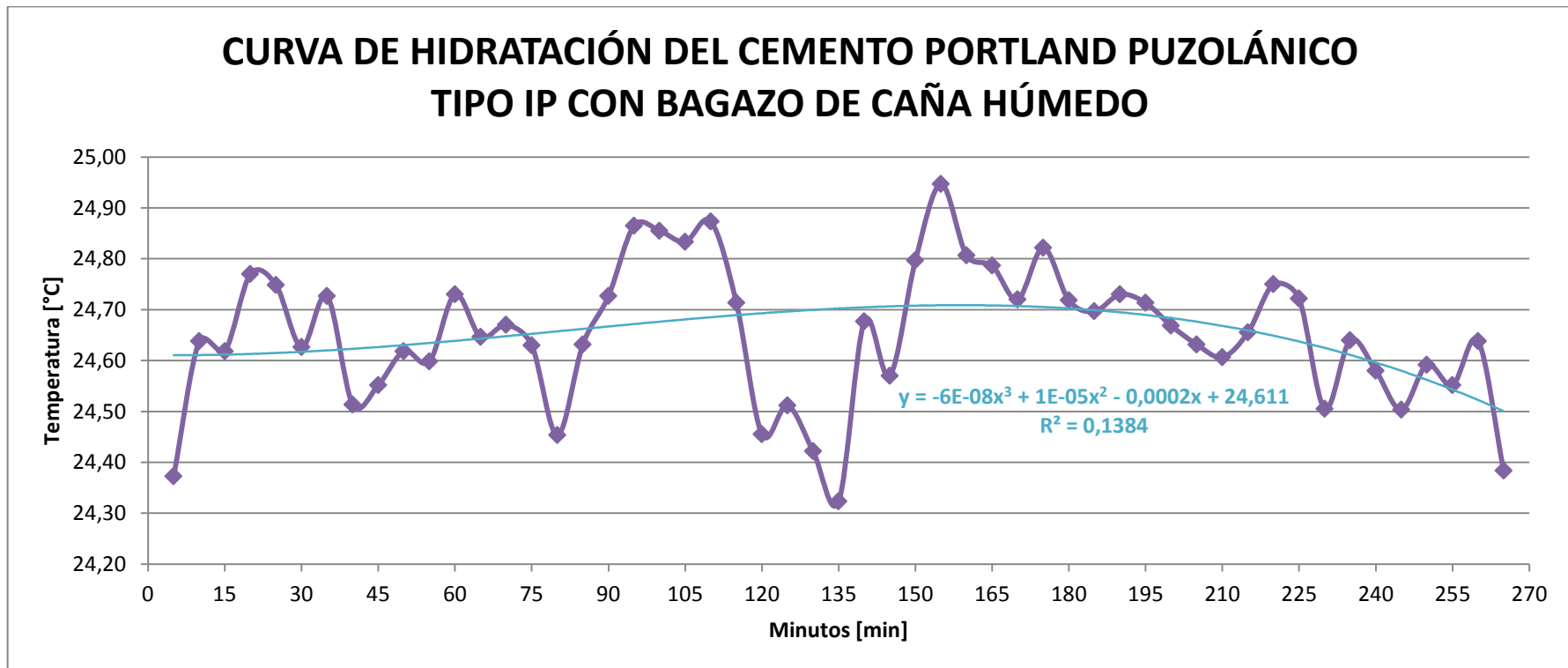


Figura 93. Curva de hidratación del Cemento Portland Pozolánico tipo IP con bagazo de caña húmedo

4.1.1.8. GUADÚA

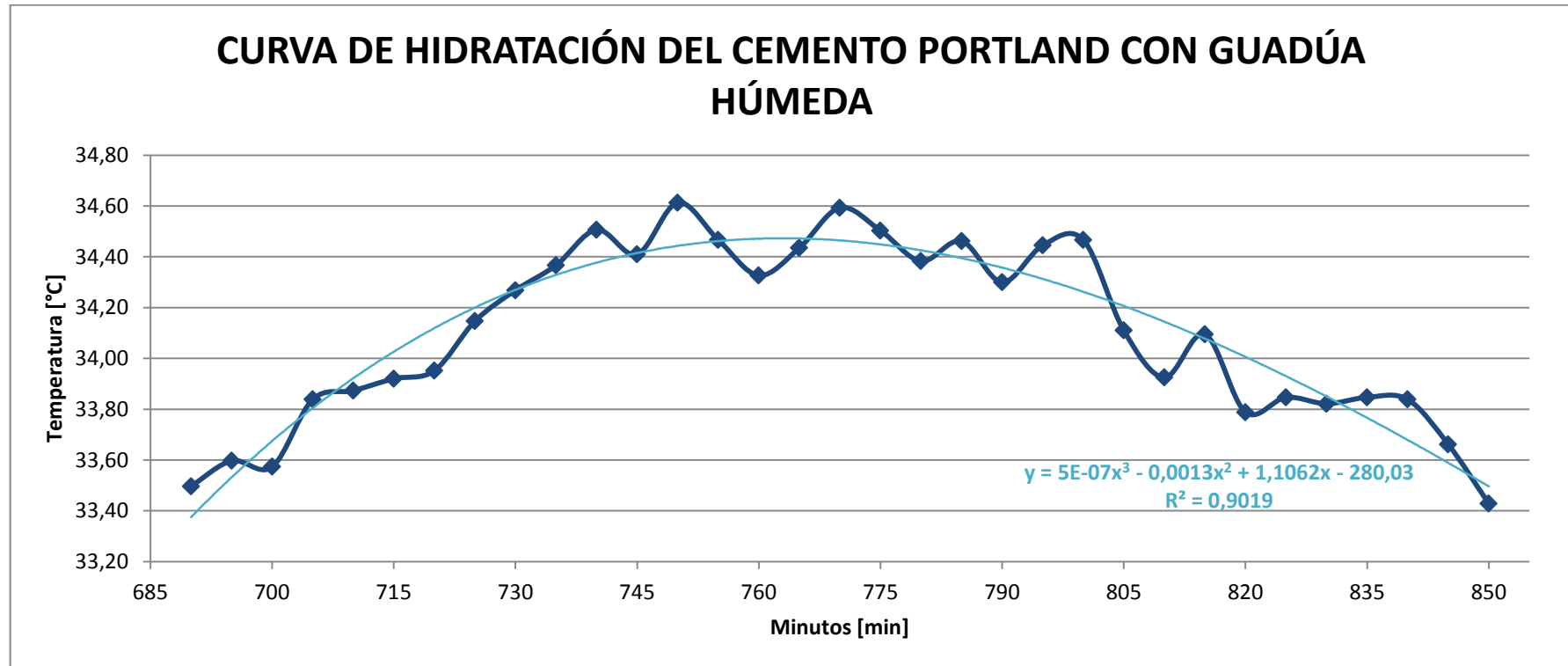


Figura 94. Curva de hidratación del Cemento Portland con guadúa húmeda

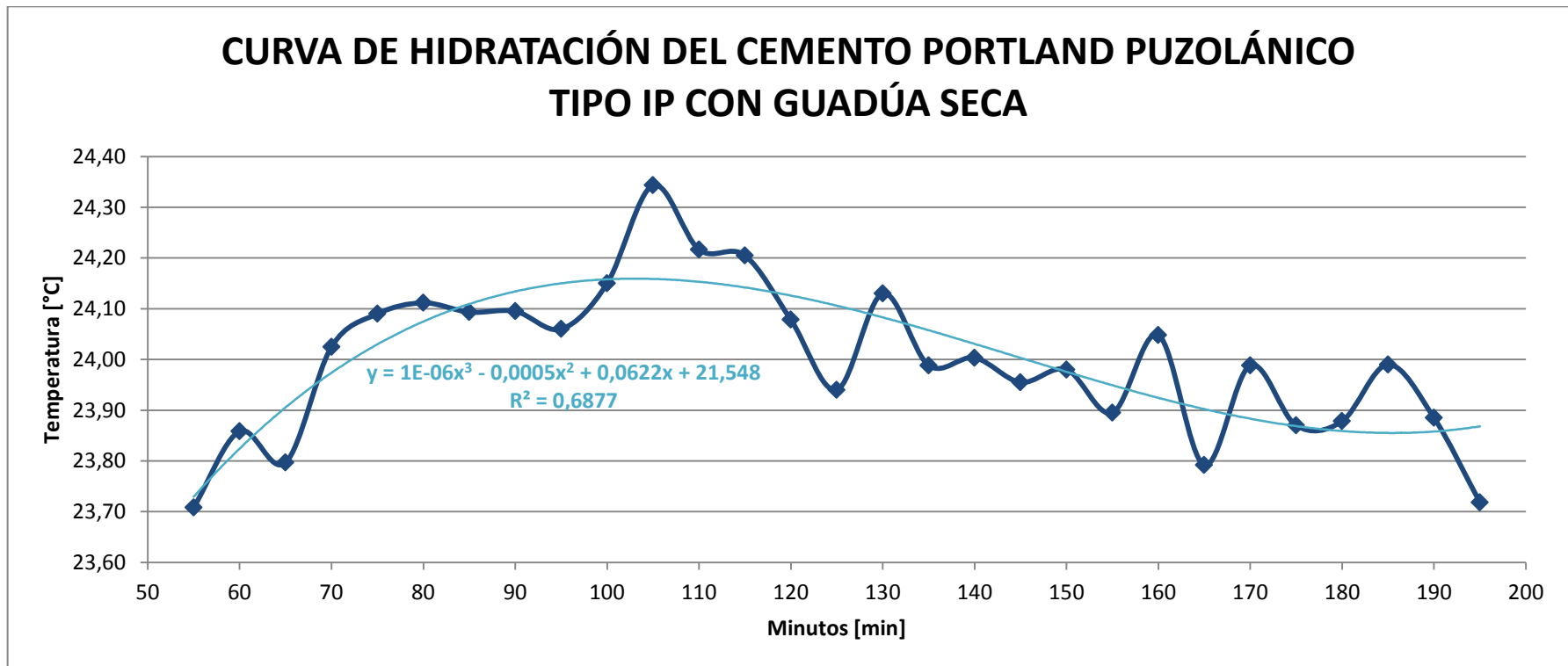


Figura 95. Curva de hidratación del Cemento Portland Pozolánico tipo IP con guadúa seca

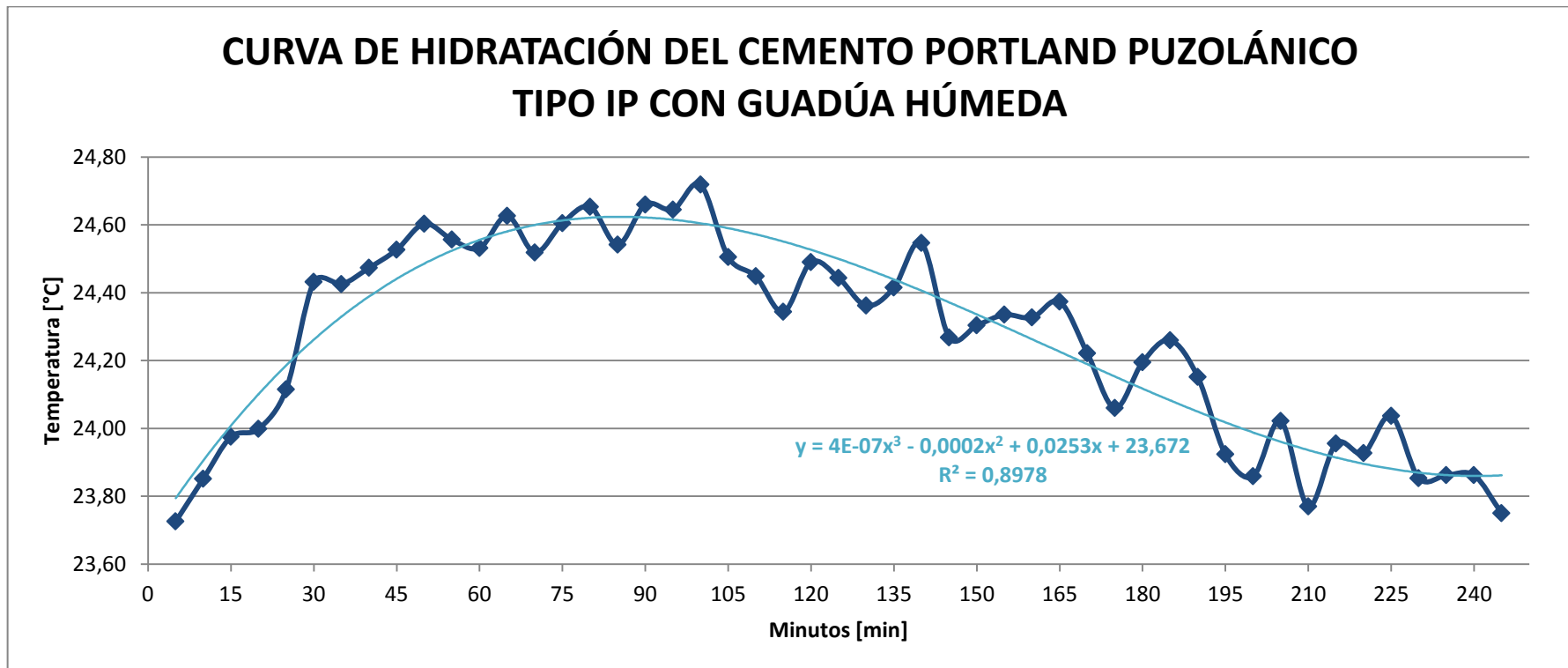


Figura 96. Curva de hidratación del Cemento Portland Pozzolánico tipo IP con guadúa húmeda

4.1.2. CURVAS DE TEMPERATURA DE AISLAMIENTO

4.1.2.1. CEMENTO PORTLAND

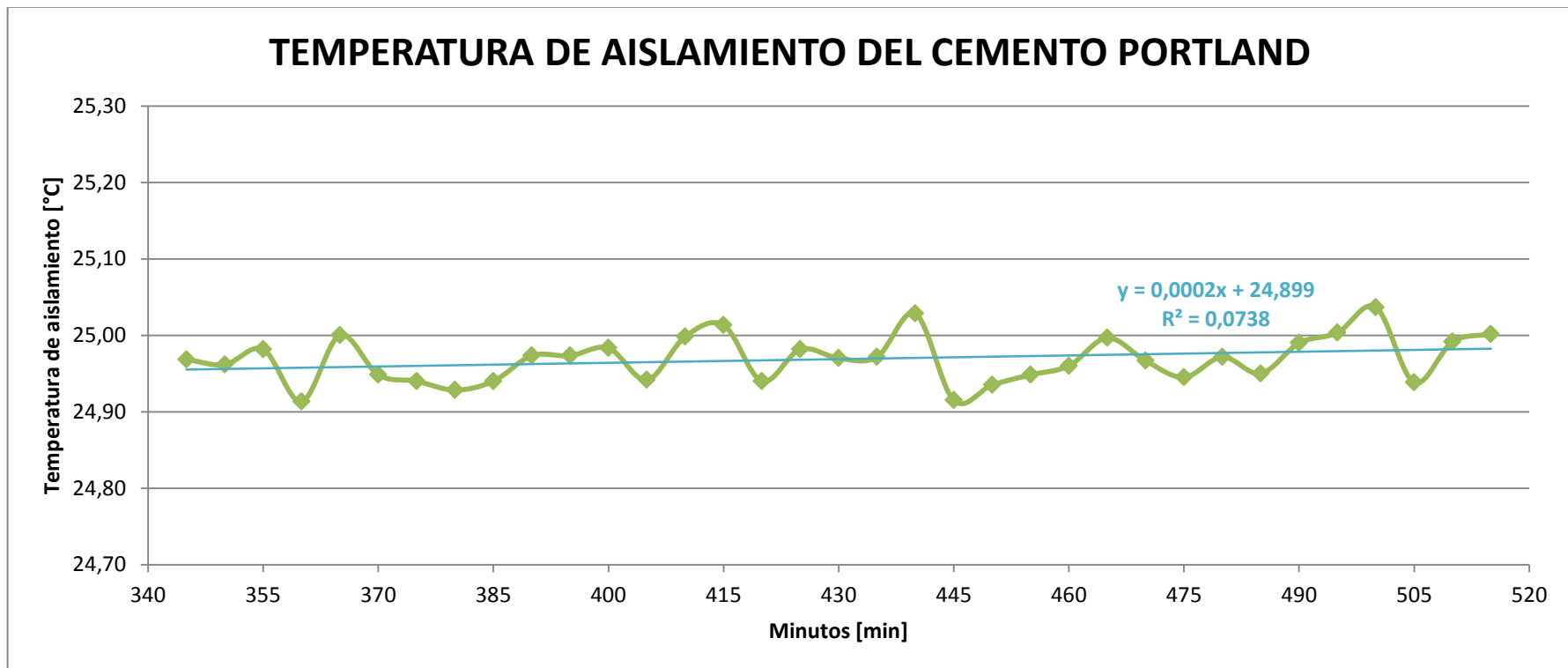


Figura 97. Curva de Temperatura de Aislamiento del Cemento Portland

4.1.2.2. CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO TIPO IP

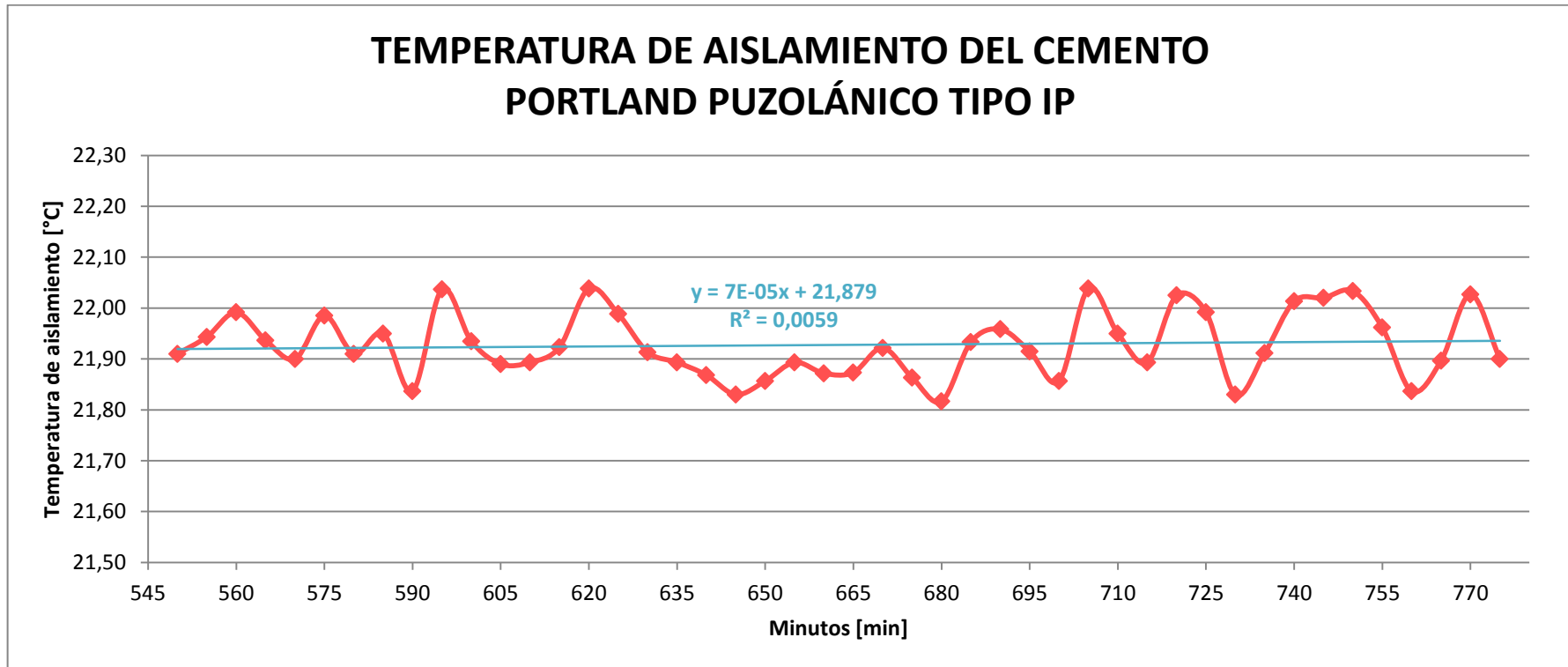


Figura 98. Curva de Temperatura de Aislamiento del Cemento Portland Pozolánico tipo IP

4.1.2.3. RAQUIS DE PALMA AFRICANA

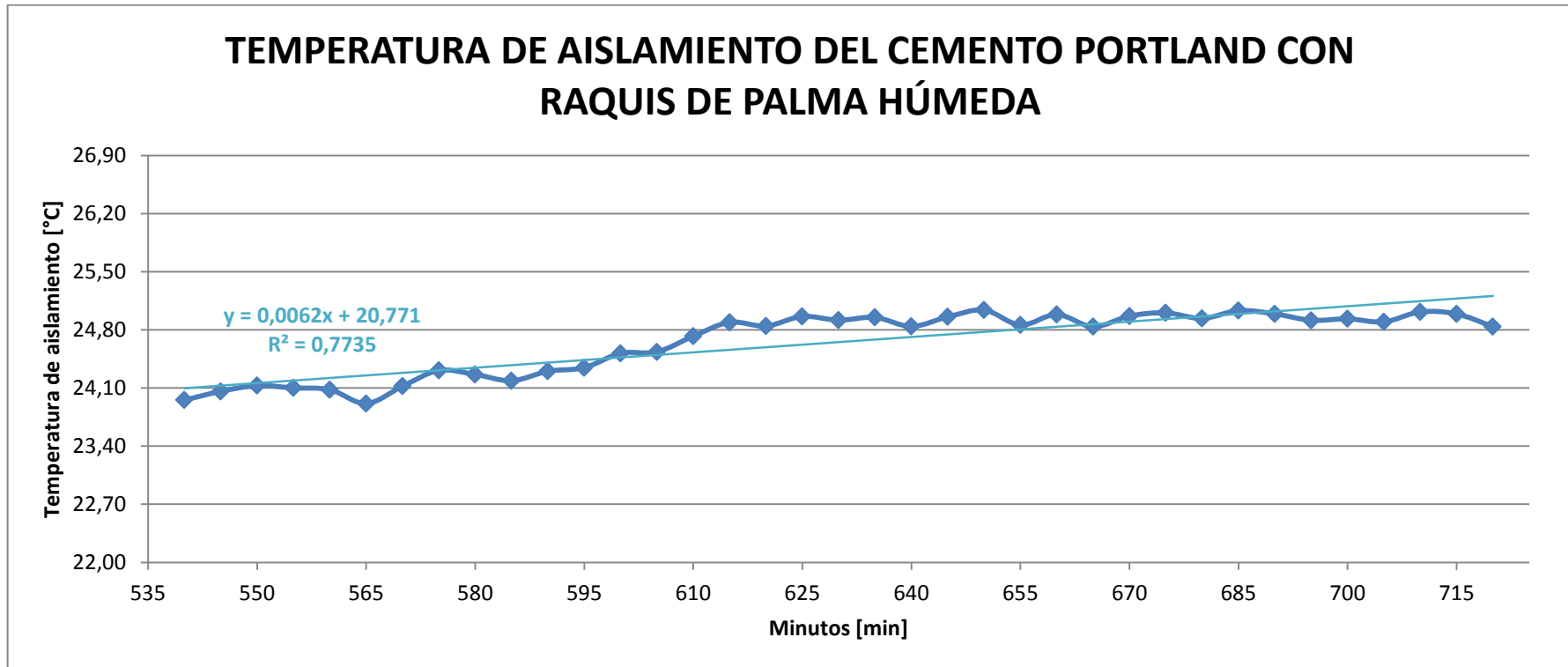


Figura 99. Curva de Temperatura de Aislamiento del Cemento Portland con raquis de palma húmeda

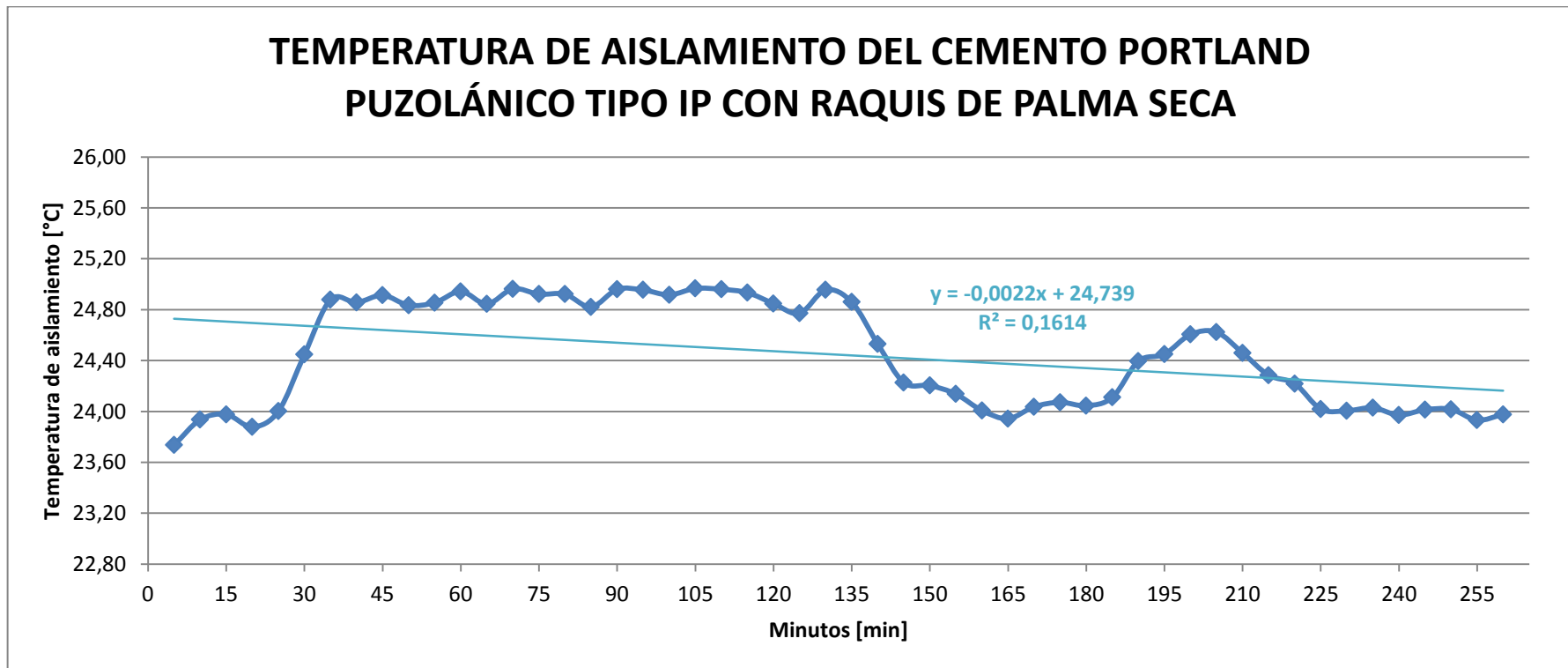


Figura 100. Curva de Temperatura de Aislamiento del Cemento Portland Puzolánico tipo IP con raquis de palma seca

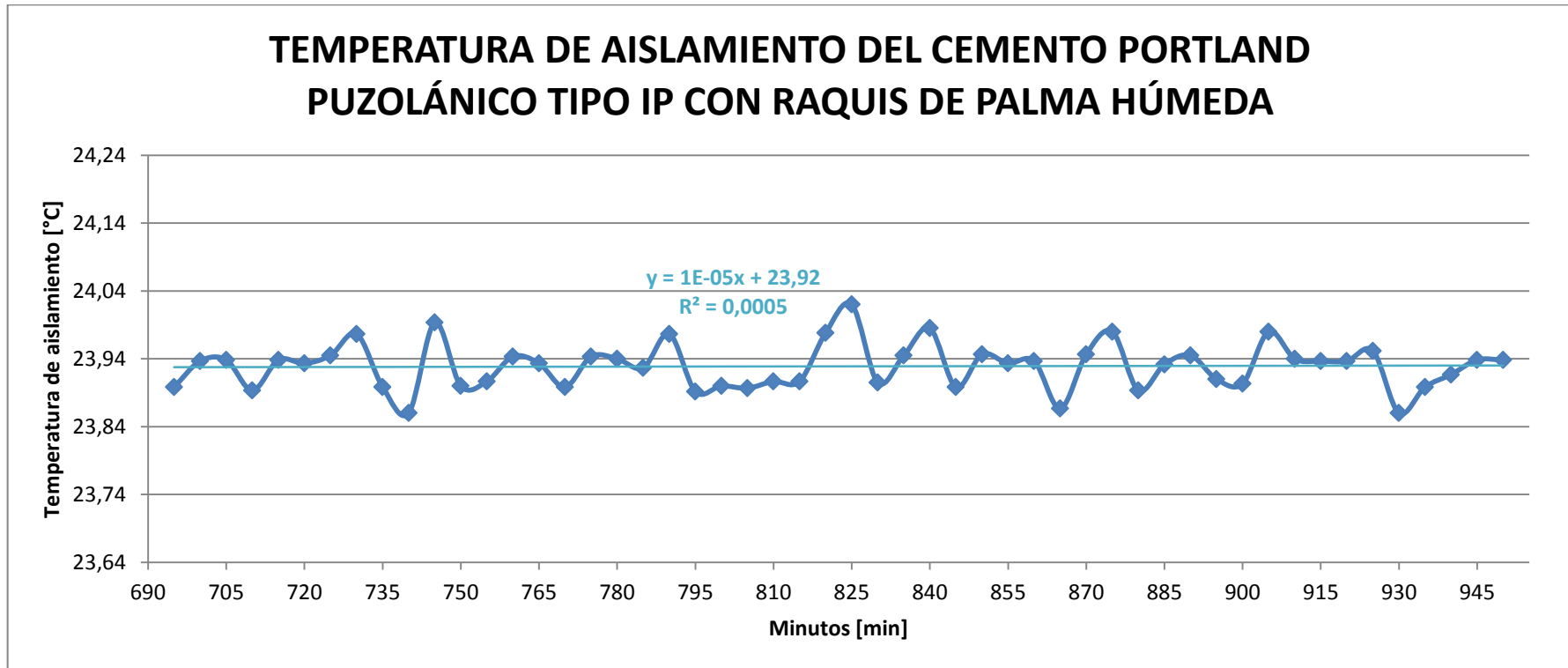


Figura 101. Curva de Temperatura de Aislamiento del Cemento Portland Puzolánico tipo IP con raquis de palma húmeda

4.1.2.4. RAQUIS DE PLÁTANO

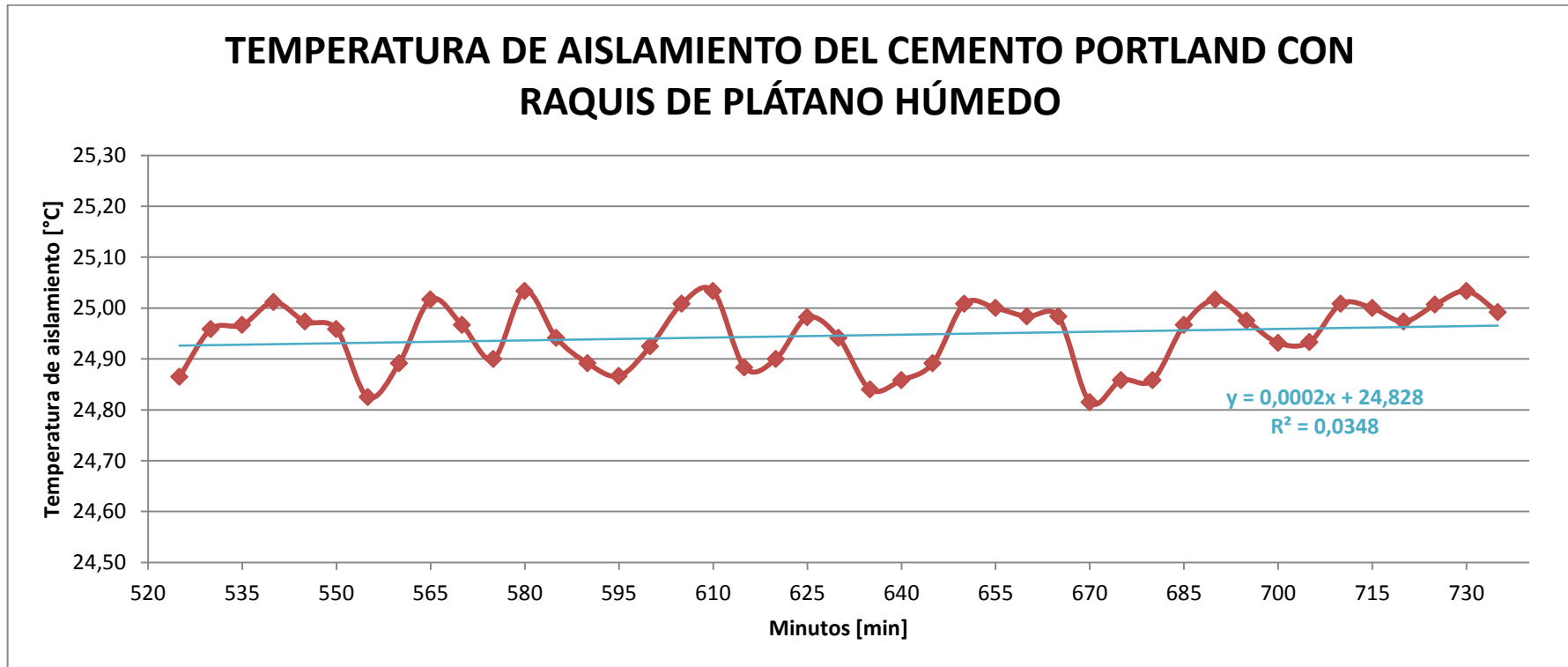


Figura 102. Curva de Temperatura de Aislamiento del Cemento Portland con raquis de plátano húmedo

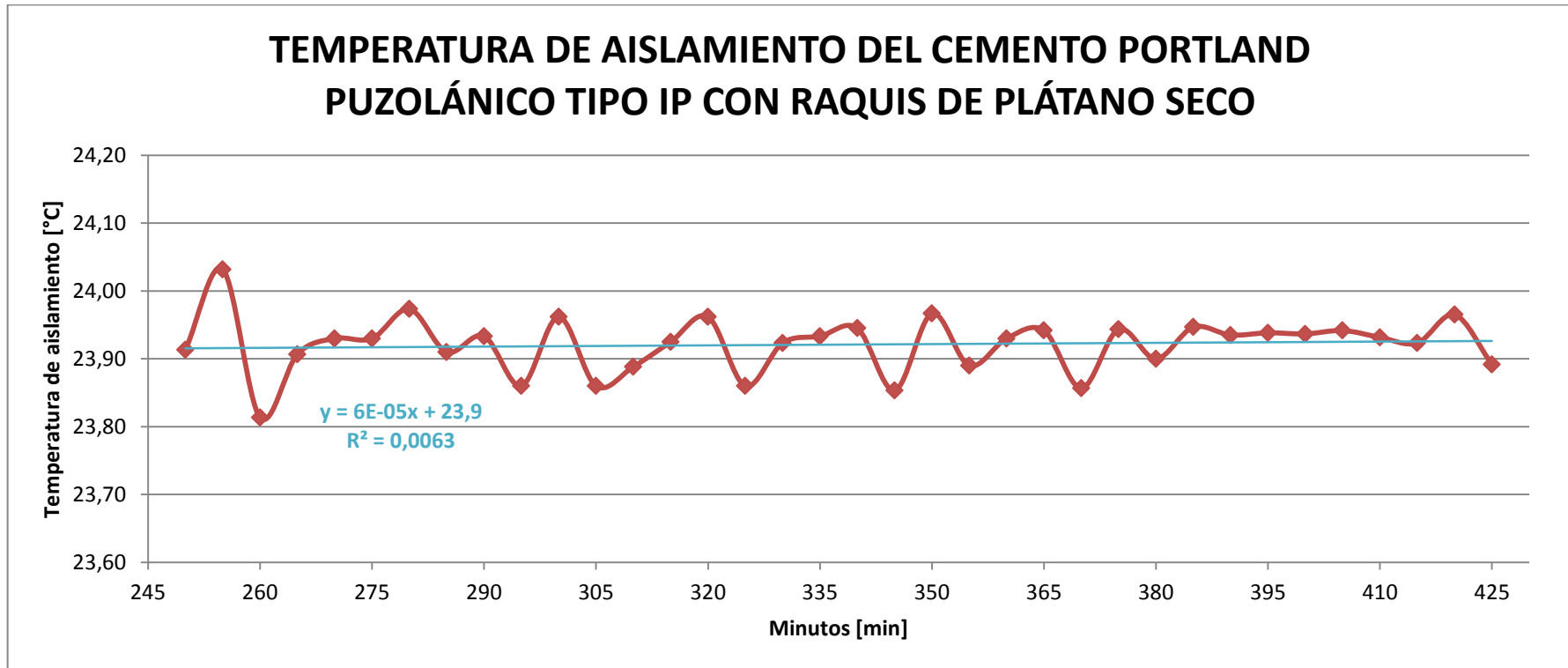


Figura 103. Curva de Temperatura de Aislamiento del Cemento Portland Puzolánico tipo IP con raquis de plátano seco

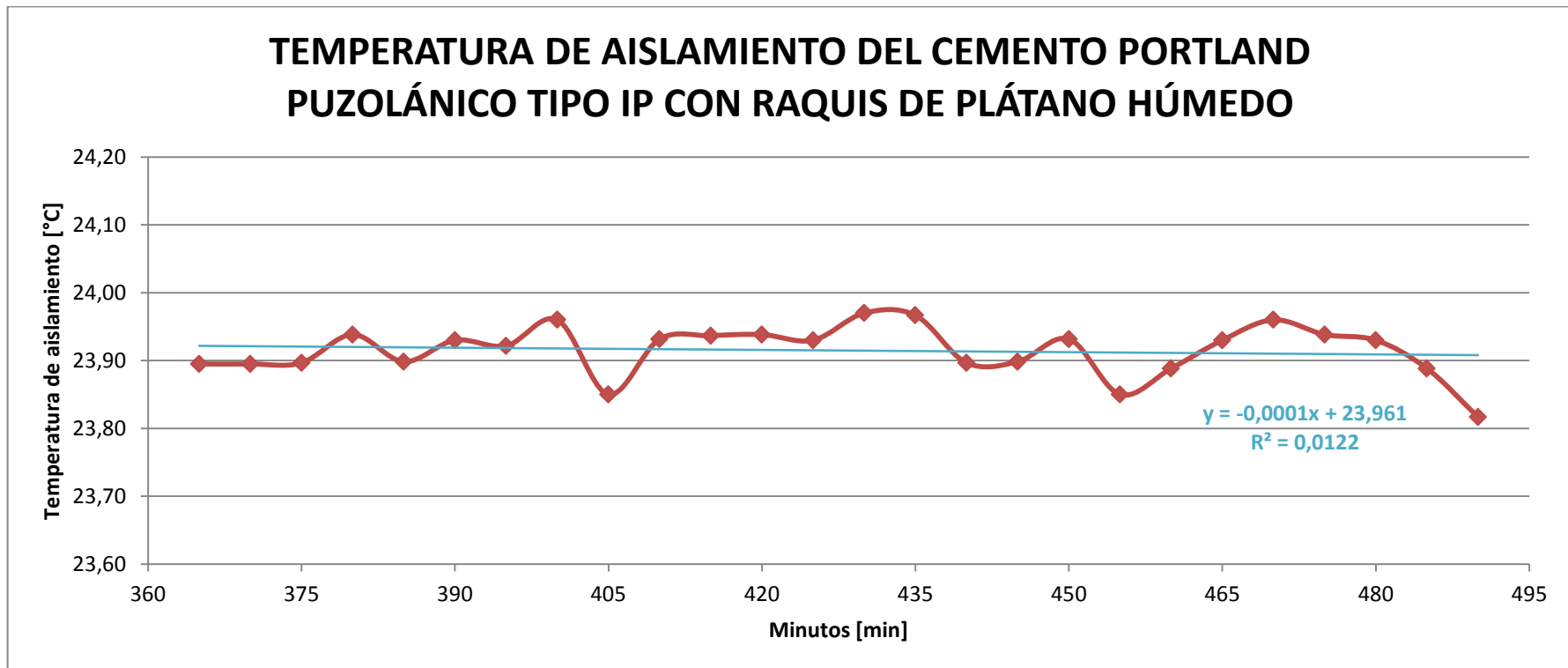


Figura 104. Curva de Temperatura de Aislamiento del Cemento Portland Puzolánico tipo IP con raquis de plátano húmedo

4.1.2.5. CASCARILLA DE CACAO

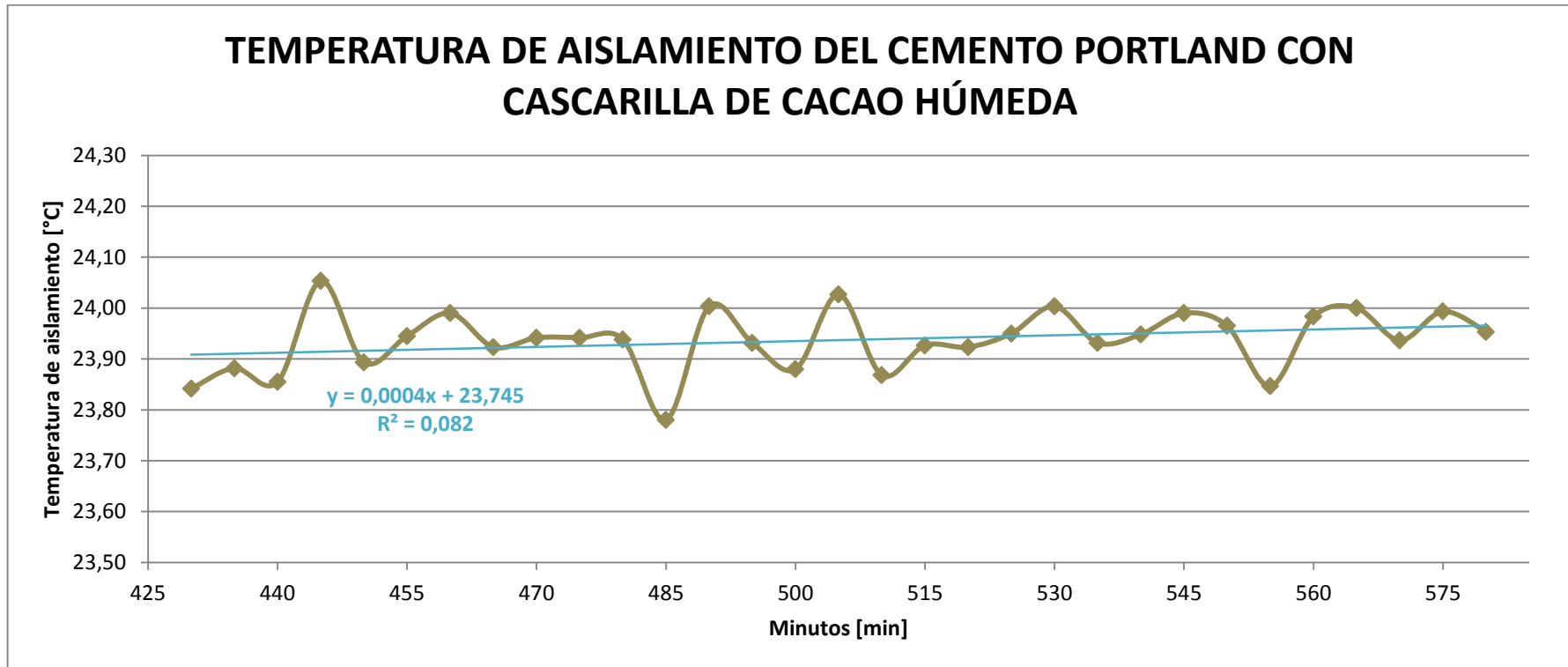


Figura 105. Curva de Temperatura de Aislamiento del Cemento Portland con cascarilla de cacao húmeda

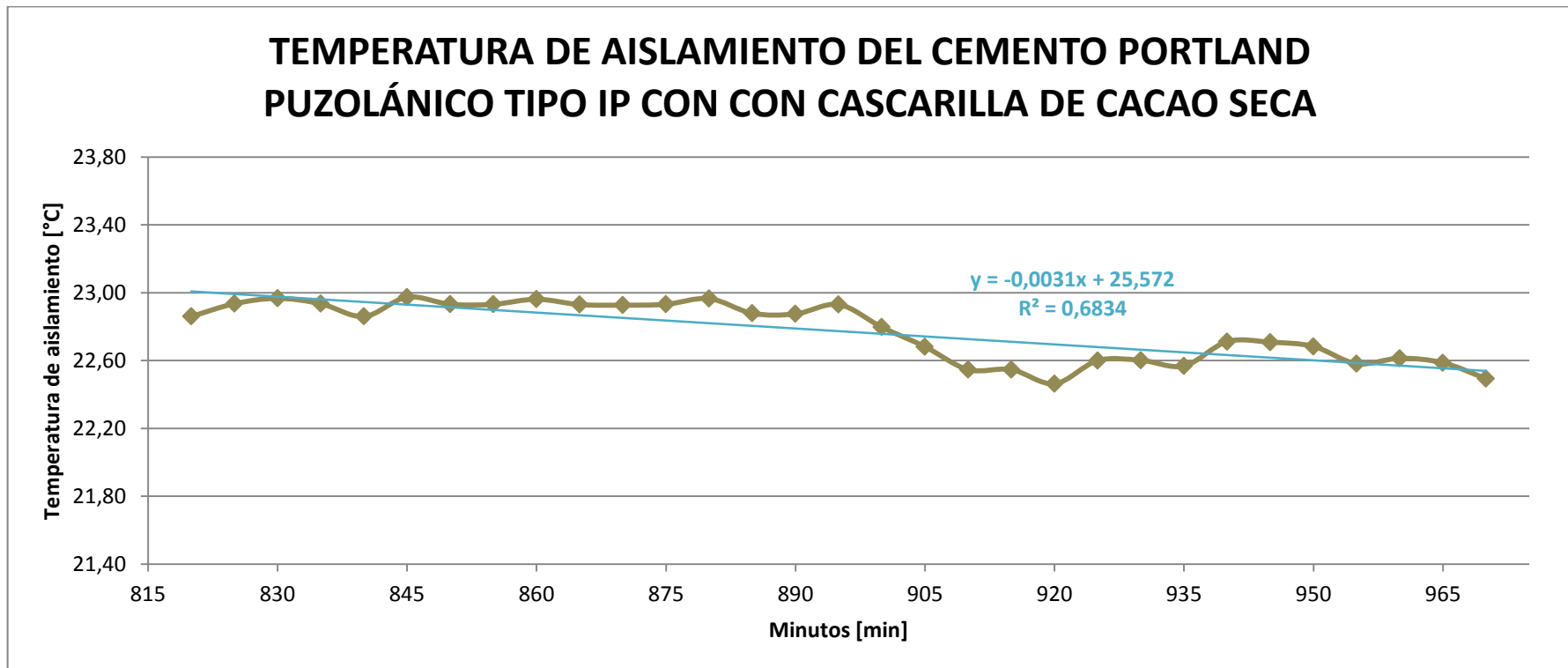


Figura 106. Curva de Temperatura de Aislamiento del Cemento Portland Puzolánico tipo IP con cascarilla de cacao seca

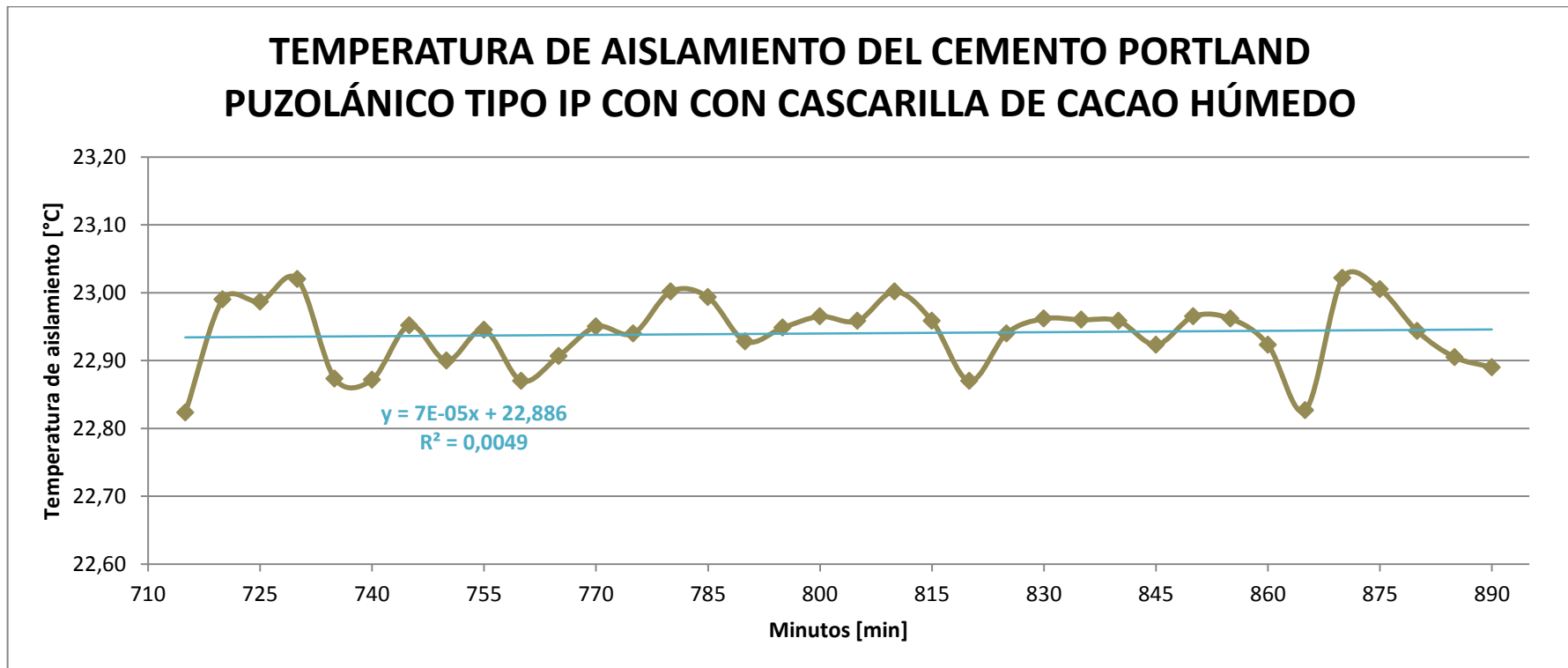


Figura 107. Curva de Temperatura de Aislamiento del Cemento Portland Puzolánico tipo IP con cascarilla de cacao húmeda

4.1.2.6. CASCARILLA DE CAFÉ

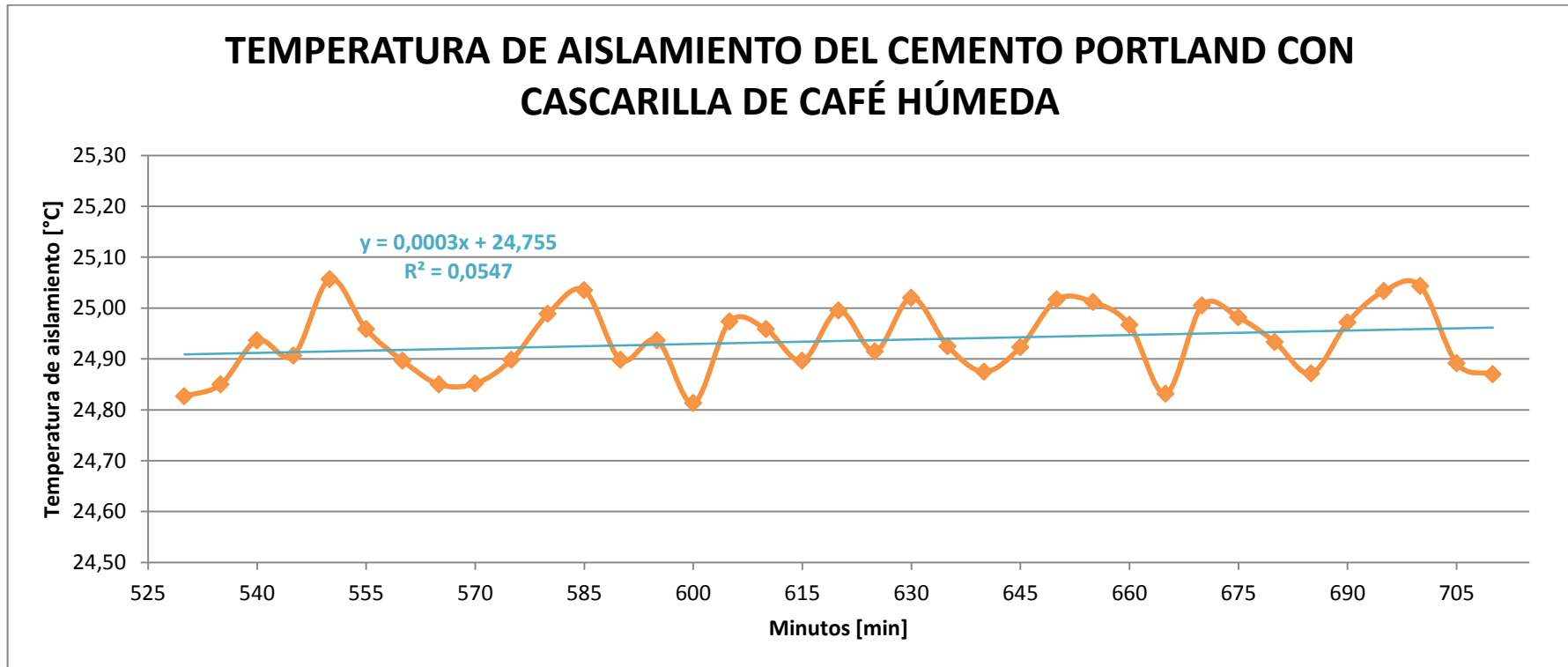


Figura 108. Curva de Temperatura de Aislamiento del Cemento Portland con cascarilla de café húmeda

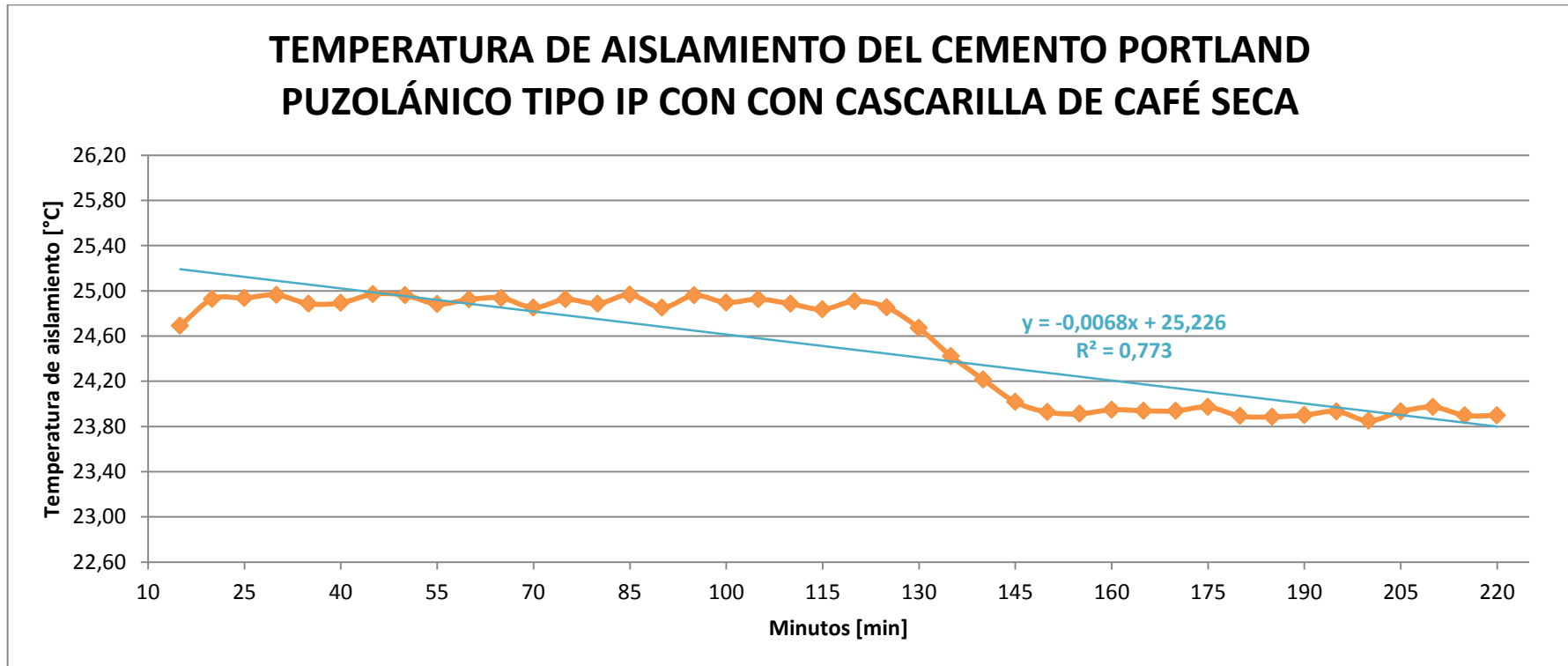


Figura 109. Curva de Temperatura de Aislamiento del Cemento Portland Puzolánico tipo IP con cascarilla de café seca

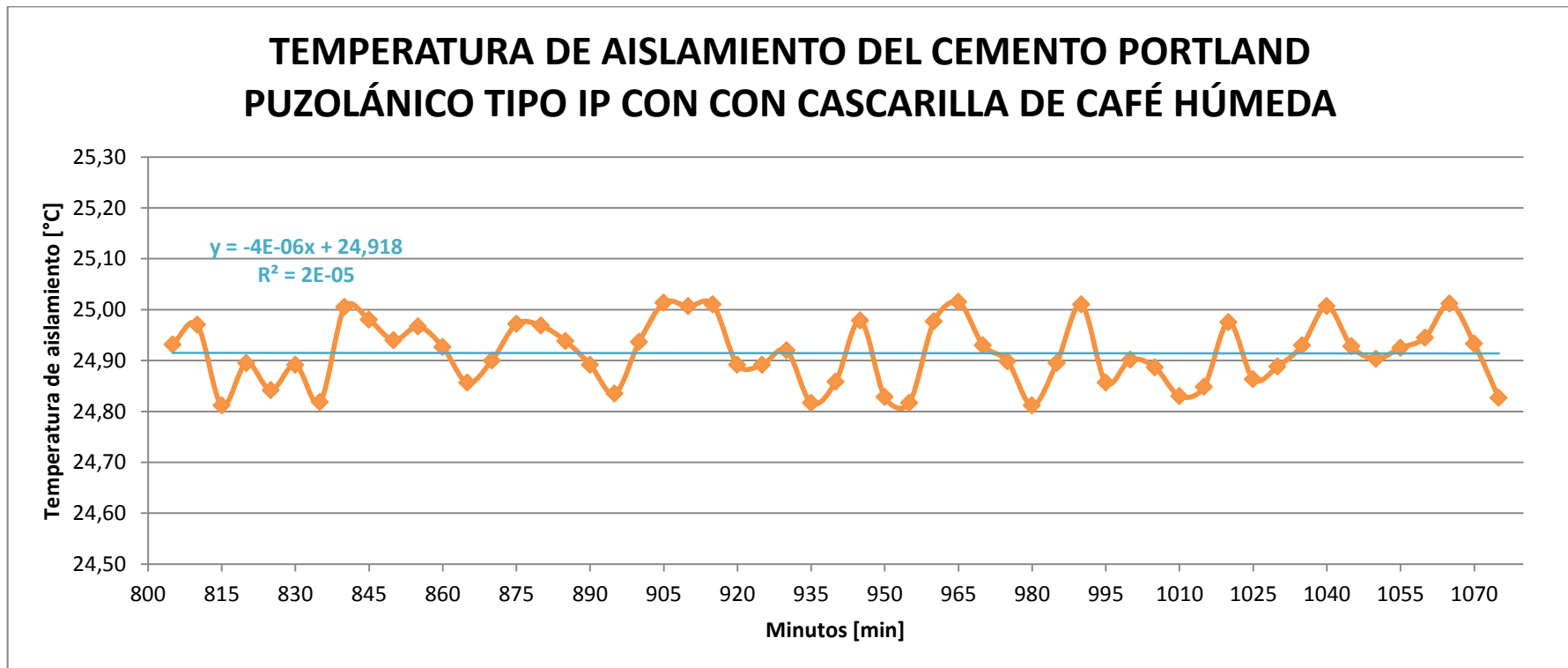


Figura 110. Curva de Temperatura de Aislamiento del Cemento Portland Puzolánico tipo IP con cascarilla de café húmeda

4.1.2.7. BAGAZO DE CAÑA

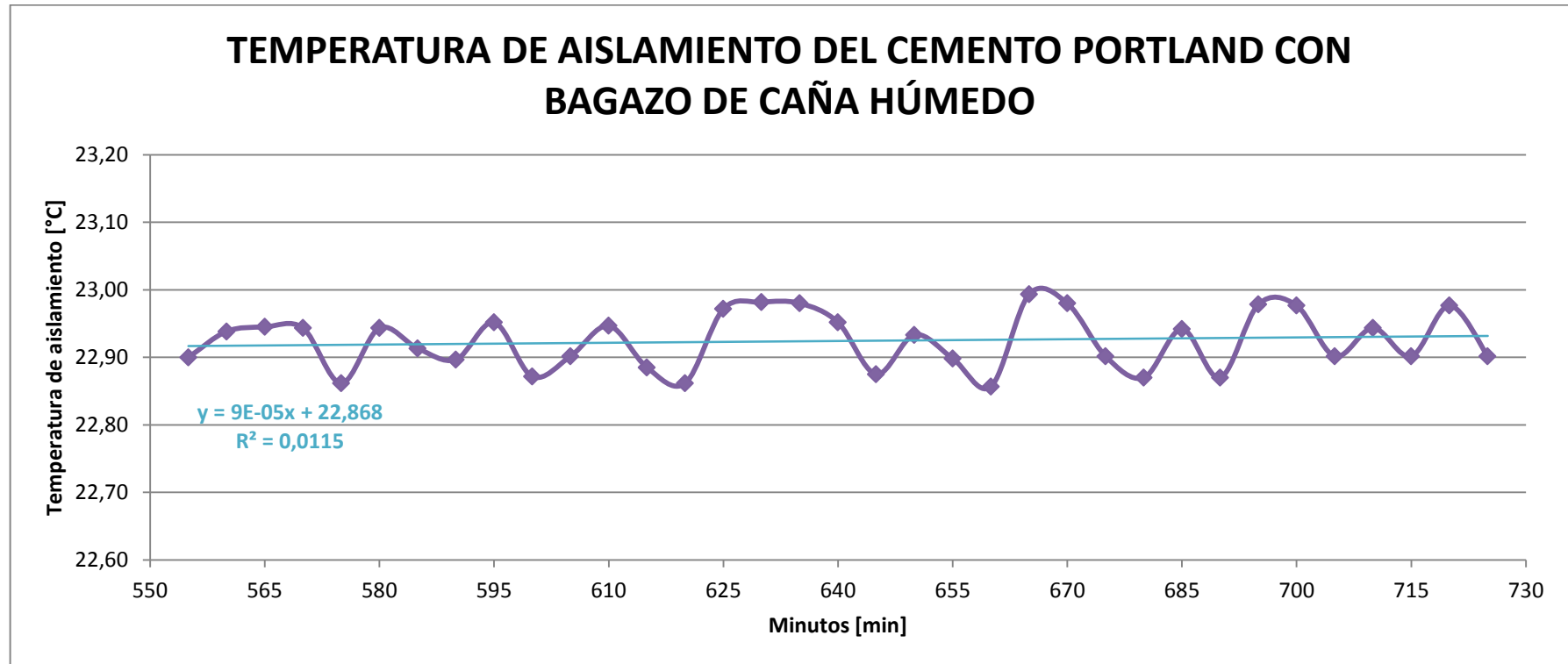


Figura 111. Curva de Temperatura de Aislamiento del Cemento Portland con bagazo de caña húmedo

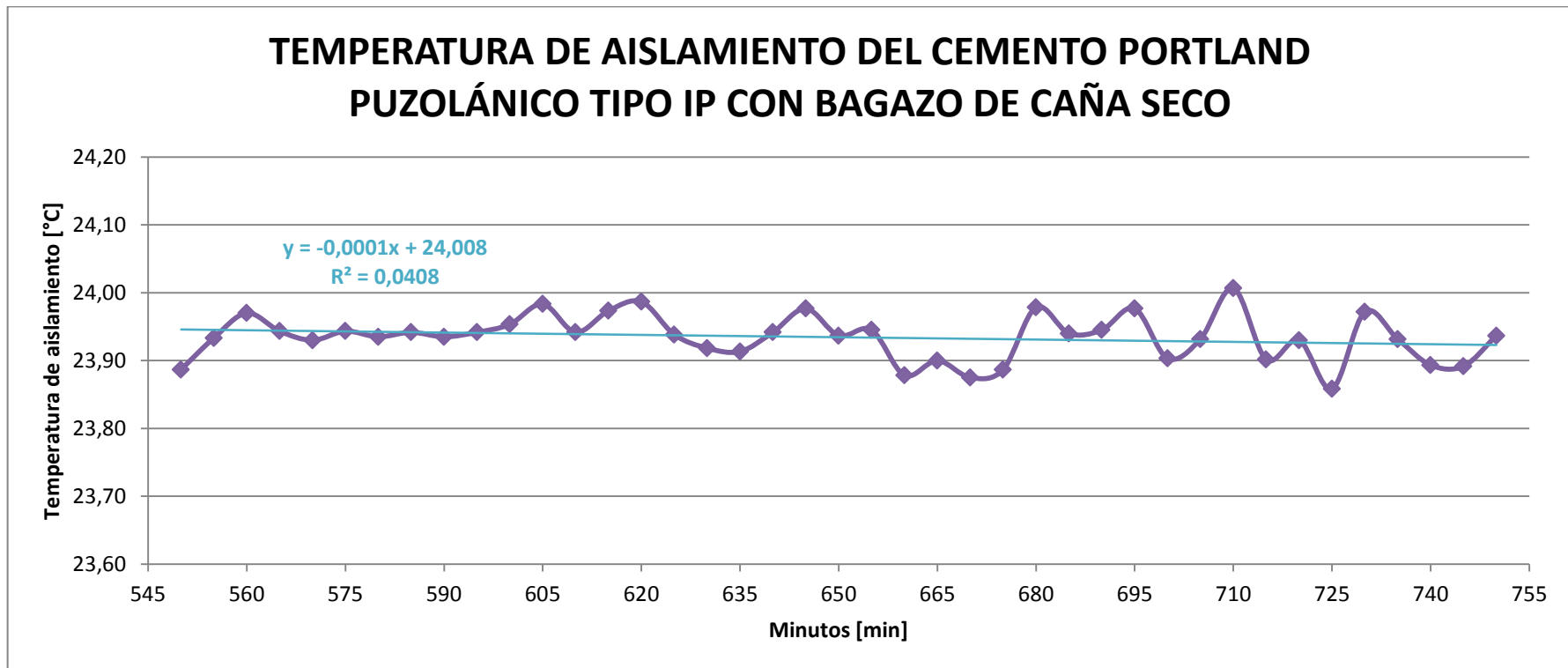


Figura 112. Curva de Temperatura de Aislamiento del Cemento Portland Puzolánico tipo IP con bagazo de caña seco

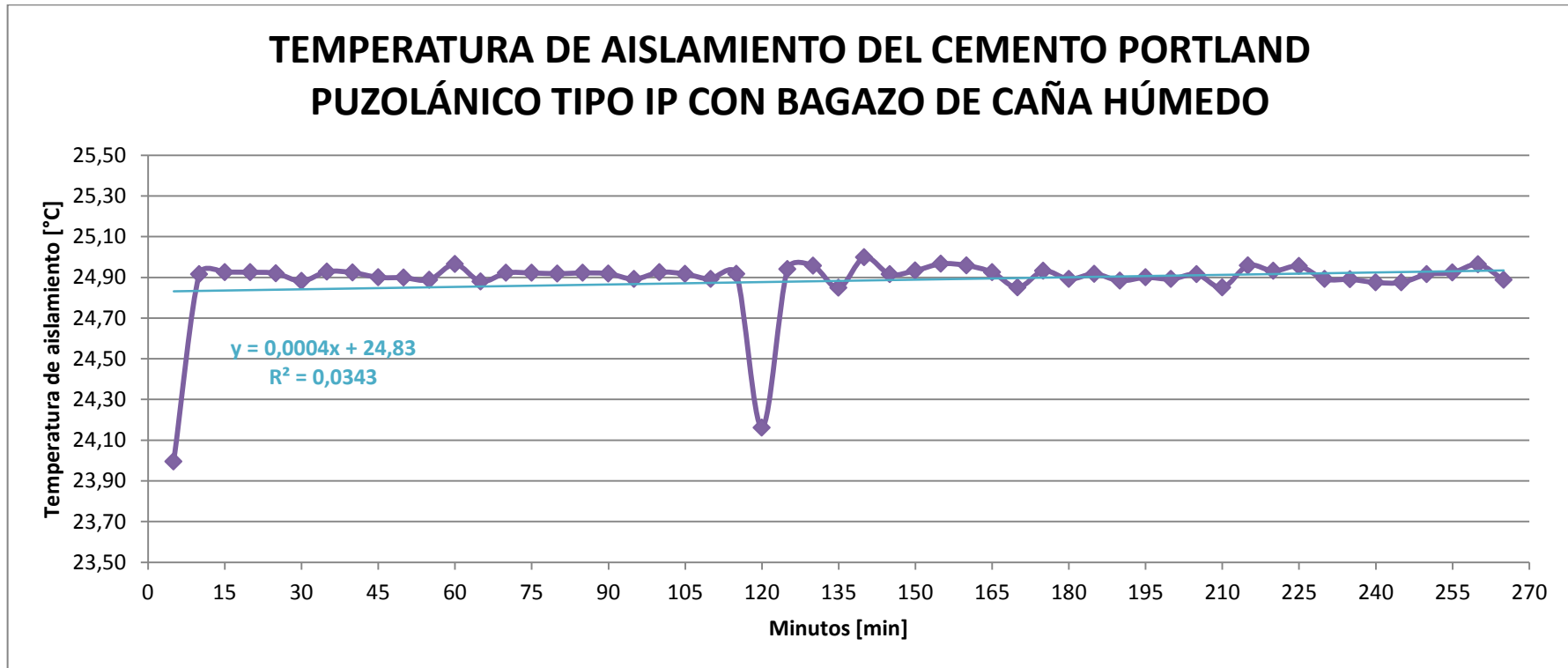


Figura 113. Curva de Temperatura de Aislamiento del Cemento Portland Puzolánico tipo IP con bagazo de caña húmedo

4.1.2.8. GUADÚA

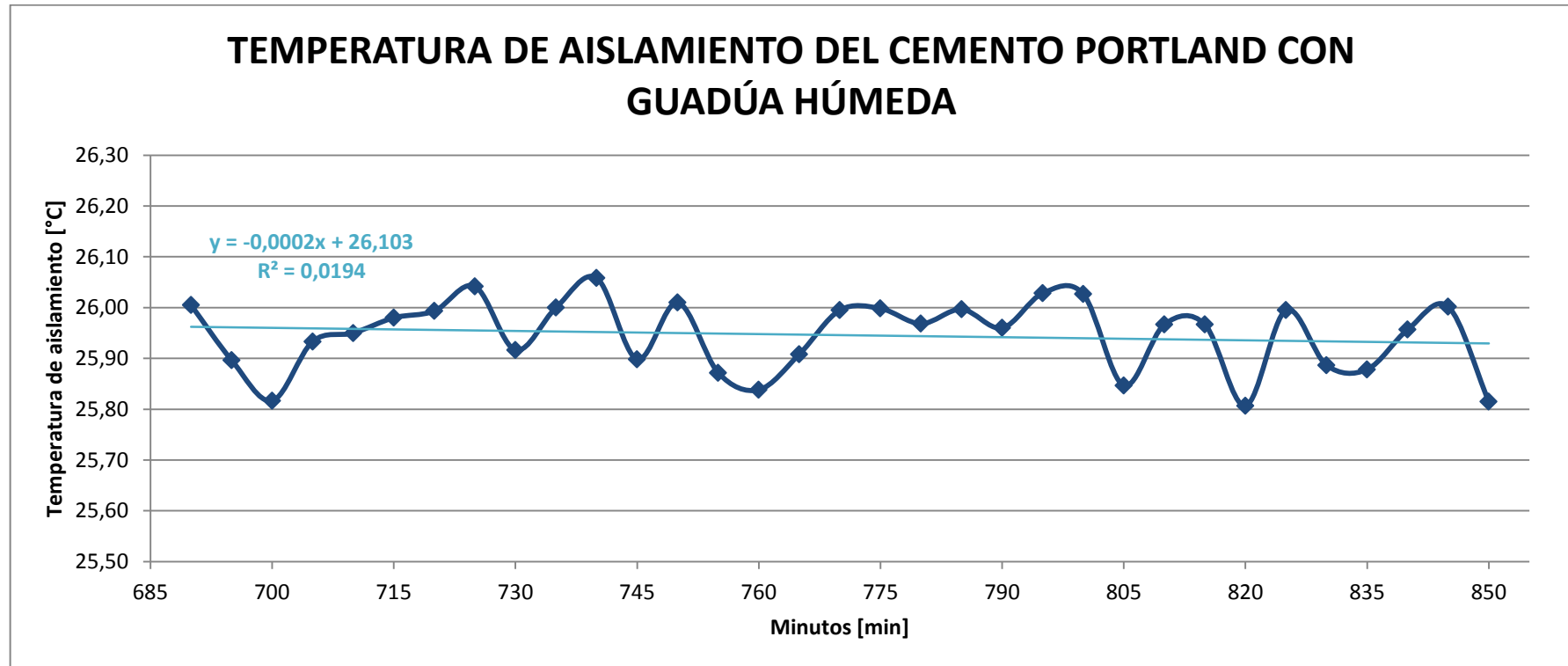


Figura 114. Curva de Temperatura de Aislamiento del Cemento Portland con guadúa húmeda

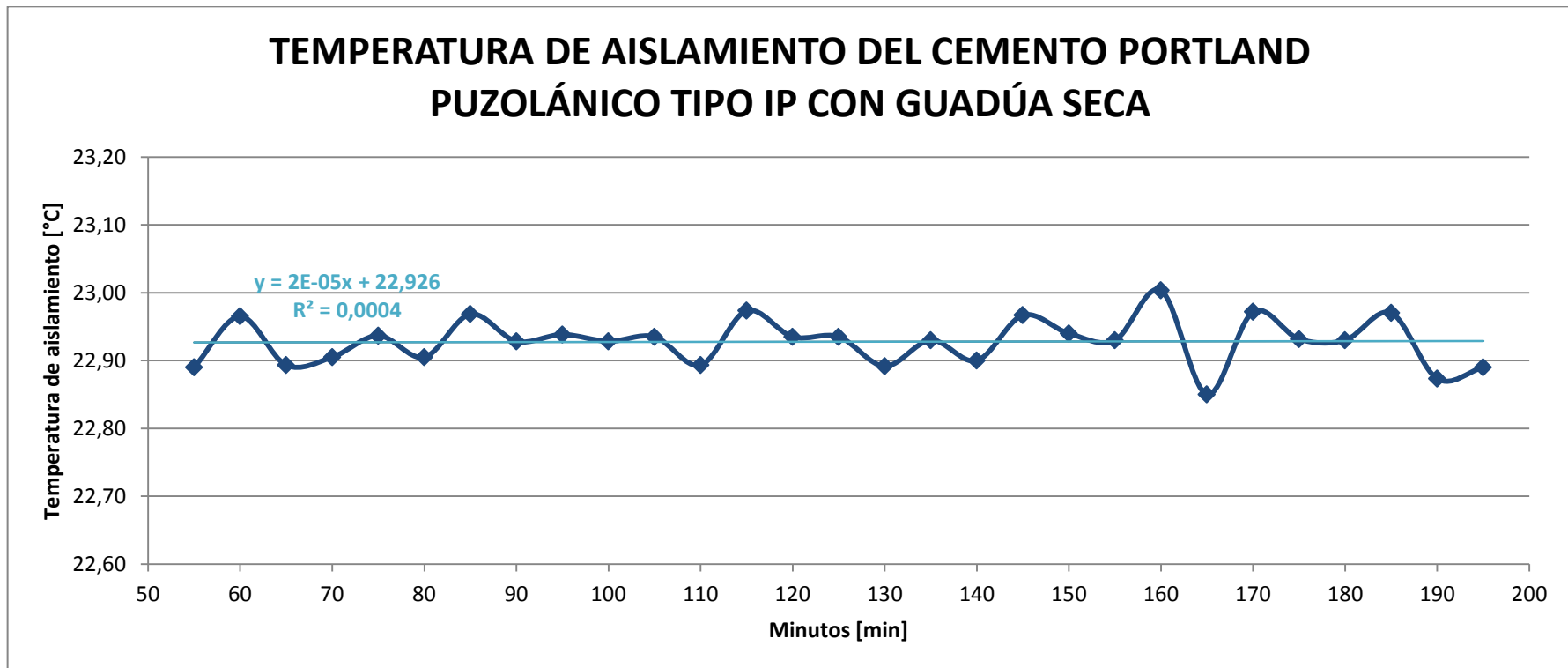


Figura 115. Curva de Temperatura de Aislamiento del Cemento Portland Puzolánico tipo IP con guadúa seca

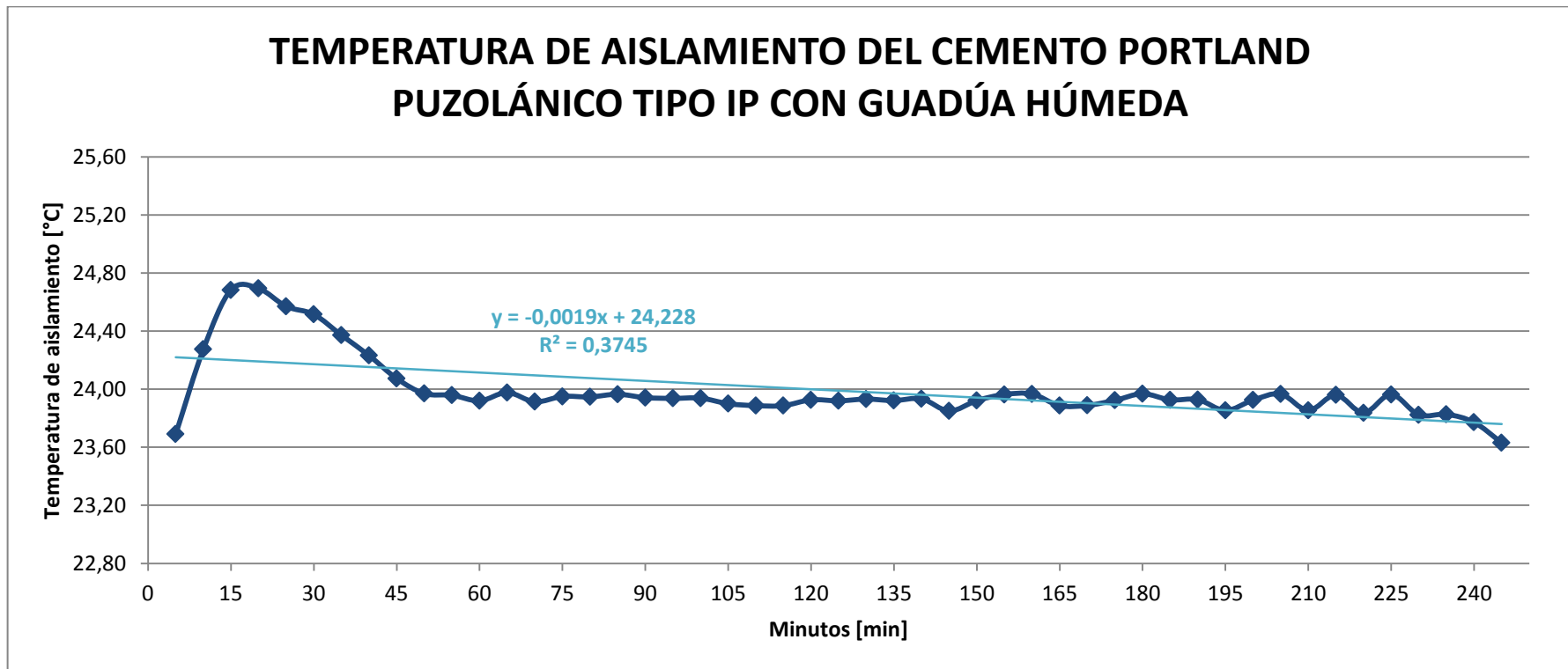


Figura 116. Curva de Temperatura de Aislamiento del Cemento Portland Puzolánico tipo IP con guadúa húmeda

4.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.2.1. CURVAS DE HIDRATACIÓN

En la gráfica 4.1., se observa que la curva de hidratación del cemento portland, muestra una curva más sensible que la del cemento puzolánico, sin muchas variaciones. Así mismo se observa que la curva posee picos donde la reacción con el silicato y aluminato toman lugar. La curva se muestra bastante bien con respecto a la descripción que proporcionan varios autores como Evans y Semple, que determinan que la temperatura de hidratación del cemento portland llega a 60°C, para éste caso el desprendimiento de calor máximo alcanza los 39,59°C, cerca de 7 horas, cabe recalcar que ello depende de las características del propio cemento, de cuan fresco esté, de cuánta agua posea la mezcla y de que si está ligado o no con arena.

Por otra parte en la gráfica 4.2., se observa que la curva de hidratación del cemento portland puzolánico tipo IP, muestra demasiadas variaciones, es decir que la presencia de puzolana hace la secuencia de reacciones más complejas y esto provoca curvas con mayores oscilaciones de temperatura. Estas oscilaciones reflejan variaciones en la reacción y el calor desprendido por las mismas a nivel local, las cuales dependen de la sensibilidad del termopar o por el uso de recipientes pequeños y tener por tanto una pequeña inercia térmica. El desprendimiento de calor máximo alcanza los 26,73°C, cerca de 12 horas.

El cemento portland en combinación con el raquis de palma africana húmeda (gráfica 4.3.), presenta un desprendimiento de calor que llega a 32,65°C en aproximadamente 9 horas, así mismo se observa ligeras variaciones. El cemento portland puzolánico tipo IP en combinación con el raquis de palma africana seca (gráfica 4.4.), produce un rápido incremento

de calor a los 50 minutos de haber ingresado al calorímetro y alcanza una temperatura de 25,25°C, para éste caso se sugiere realizar un análisis microscópico, para verificar el comportamiento de la estringita, ya que normalmente toma la formación de 0 a 30 minutos, por lo que se podría ver afectado en cuanto a la resistencia de sulfatos. Con el raquis de palma húmeda (gráfica 4.5.), llega a una temperatura de 27,77°C cerca de 15 horas.

Con el cemento portland y el raquis de plátano húmedo (gráfica 4.6.), se determina variaciones leves pero se observa la reacción del silicato y aluminato. En la gráfica 4.7., se observa que el raquis de plátano seco en combinación con el cemento portland puzolánico tipo IP posee pronunciadas variaciones, la temperatura que alcanza es de 25,86°C en aproximadamente 5 horas, de igual manera se observa en la gráfica 4.8., mayor variaciones donde la temperatura llega a 24,87°C en 7 horas.

El cemento portland en combinación con la cascarilla de cacao (gráfica 4.9.), se observa que no posee muchas variaciones y se comporta la reacción de forma pareja, se hidrata a 33,11°C en 8 horas. Por otra parte el cemento portland puzolánico tipo IP en combinación con la cascarilla de cacao seca (gráfica 4.10.), se observa que la hidratación del cemento ocurre en 24,30°C en aproximadamente 14 horas, y conforme pasa el tiempo su energía cada vez disminuye, es decir que el cacao posee algún componente que le impide que ocurra la reacción de manera pareja y uniforme. Por otro lado, con cascarilla de cacao húmeda (gráfica 4.11.), se observa que se reparte más, es decir, la temperatura alcanza los 26,54°C en 13 horas, mientras que seco alcanza los 24,30°C, es decir que cuando le estamos probando seco le falta humedad, y ésta biomasa le está quitando agua, con la cascarilla de cacao húmeda también se observa que el aluminato está reaccionando de forma pausada.

El cemento portland con la cascarilla de café húmedo (gráfica 4.12.), se observa que alcanza una temperatura de 32,60°C en 10 horas, así mismo se observa una curva pareja sin muchas alteraciones. En la gráfica 4.13., se observa la cascarilla de café seco en combinación con el cemento portland puzolánico tipo IP, la mezcla se hidrata a 25,94°C en 75 minutos, igualmente como en el caso de la palma africana, se debería realizar un análisis microscópico acerca del mismo. Con la cascarilla de café húmeda (gráfica 4.14.), la hidratación toma lugar en 26,97°C en 16 horas, igualmente las variaciones se muestran de forma pareja, y después de que existe la liberación de calor se muestra mayor variación en cuanto a la reacción con el aluminato.

En la gráfica 4.15., con el cemento portland y el bagazo de caña húmedo se observan leves alteraciones, el desprendimiento máximo de calor llega a los 26,68°C en 10 horas, posterior a ello se observa que el aluminato reacciona por partes. El cemento portland puzolánico tipo IP en combinación con el bagazo de caña seco (gráfica 4.16.), alcanza los 25,78°C en cerca de 12 horas, para lograr la hidratación se observa variaciones ligeras, esto es por el comportamiento a la acción de los azúcares residuales en el bagazo. Por otra parte, con el bagazo de caña húmedo (gráfica 4.17.), se observa mayores variaciones, y se determina que algún componente está entorpeciendo la reacción, la hidratación llega a 24,95°C en 2 horas.

Con el cemento portland y la guadúa húmeda (gráfica 4.18.), alcanza una temperatura de 34,61°C en 12 horas, con variaciones algo notorias. En la gráfica 4.19., se observa la guadúa seca en combinación con el cemento portland puzolánico donde alcanza una temperatura de hidratación de 24,34°C en cerca de 2 horas, similar ocurre con la guadúa húmeda (gráfica 4.20.), donde llega a 24,72°C de igual manera en 2 horas, la guadúa húmeda muestra menores variaciones que la seca.

4.2.2. CURVAS DE TEMPERATURA DE AISLAMIENTO

Las curvas de temperatura de aislamiento son analizadas gracias al sensor DHT11, el mismo que se encuentra entre el segundo y tercer recipiente. Las curvas sirven de comprobación para verificar si el sistema posee un comportamiento adiabático, por consiguiente y en general, el comportamiento que se obtuvo es lineal con tendencia constante y ascendente, es decir que existe un incremento de temperatura en el recipiente externo mientras se desprendía calor en la muestra, por lo que se determina que el calorímetro es cuasi adiabático.

4.2.3. ÍNDICE DEL RETARDO RELATIVO DEL TIEMPO

El índice proporcionado por Weatherwax y Tarkow del retardo relativo del tiempo, es expresado bajo la siguiente fórmula:

$$I_{ti} = \frac{t_m - t_c}{t_c} \quad [7]$$

donde:

I_{ti} : Índice del retardo relativo del tiempo.

t_m : Tiempo máximo en alcanzar la temperatura máxima de hidratación de la mezcla.

t_c : Tiempo máximo en alcanzar la temperatura máxima de hidratación del cemento.

Para el cemento portland, se muestra a continuación los siguientes resultados:

Tabla 7.

Resultados del Índice del retardo relativo del tiempo para el cemento portland

	tiempo [min]	I_{ti}
CEMENTO PORTLAND	415	
RAQUIS DE PALMA HÚMEDA	575	0,39
RAQUIS DE PLÁTANO HÚMEDO	610	0,47
CASCARILLA DE CACAO HÚMEDA	505	0,22
CASCARILLA DE CAFÉ HÚMEDA	610	0,47
BAGAZO DE CAÑA HÚMEDO	625	0,51
GUADÚA HÚMEDA	750	0,81

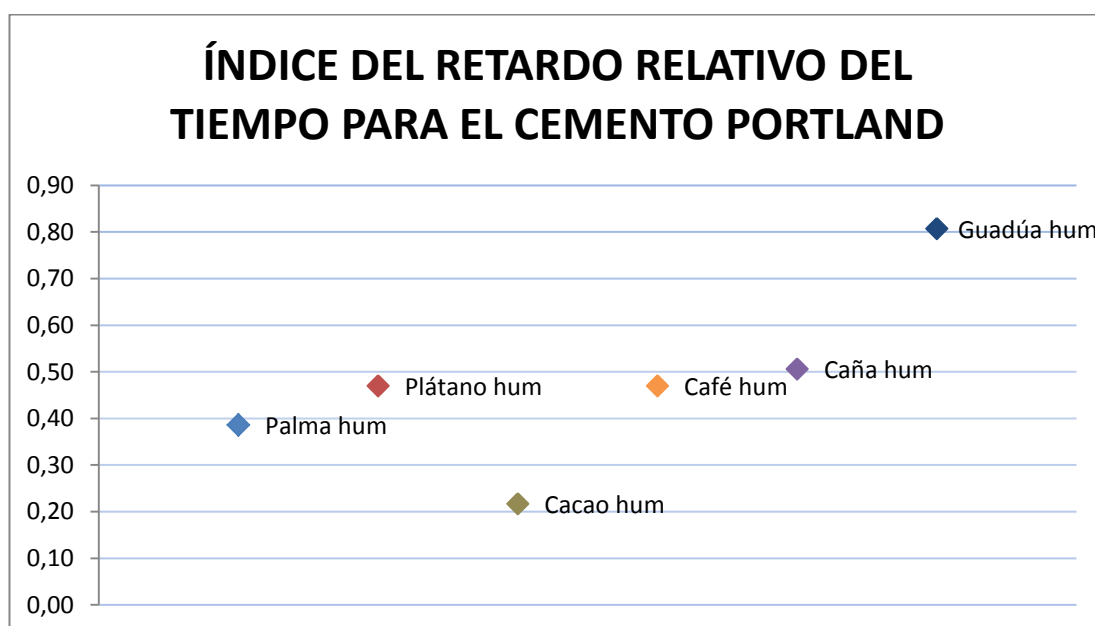


Figura 117. Resultados del Índice del retardo relativo del tiempo para el cemento portland

Con el cemento portland (gráfica 4.41.), se observa que ninguna biomasa posee un índice de retardo relativo del tiempo negativo, más bien las biomásas reaccionan en un tiempo prudente, pero la que se demora más en alcanzar la hidratación es la guadúa húmeda. Para éste caso la cascarilla de cacao húmeda dio mejores resultados.

Para el cemento portland puzolánico tipo IP, se muestran los resultados:

Tabla 8.

Resultados del Índice del retardo relativo del tiempo para el cemento portland puzolánico tipo IP

	tiempo [min]	I_{ti}
CEMENTO TIPO IP	685	
RAQUIS DE PALMA SECA	50	-0,93
RAQUIS DE PALMA HÚMEDA	885	0,29
RAQUIS DE PLÁTANO SECO	280	-0,59
RAQUIS DE PLÁTANO HÚMEDO	470	-0,31
CASCARILLA DE CACAO SECA	845	0,23
CASCARILLA DE CACAO HÚMEDA	785	0,15
CASCARILLA DE CAFÉ SECA	75	-0,89
CASCARILLA DE CAFÉ HÚMEDA	960	0,40
BAGAZO DE CAÑA SECO	710	0,04
BAGAZO DE CAÑA HÚMEDO	155	-0,77
GUADÚA SECA	105	-0,85
GUADÚA HÚMEDA	100	-0,85

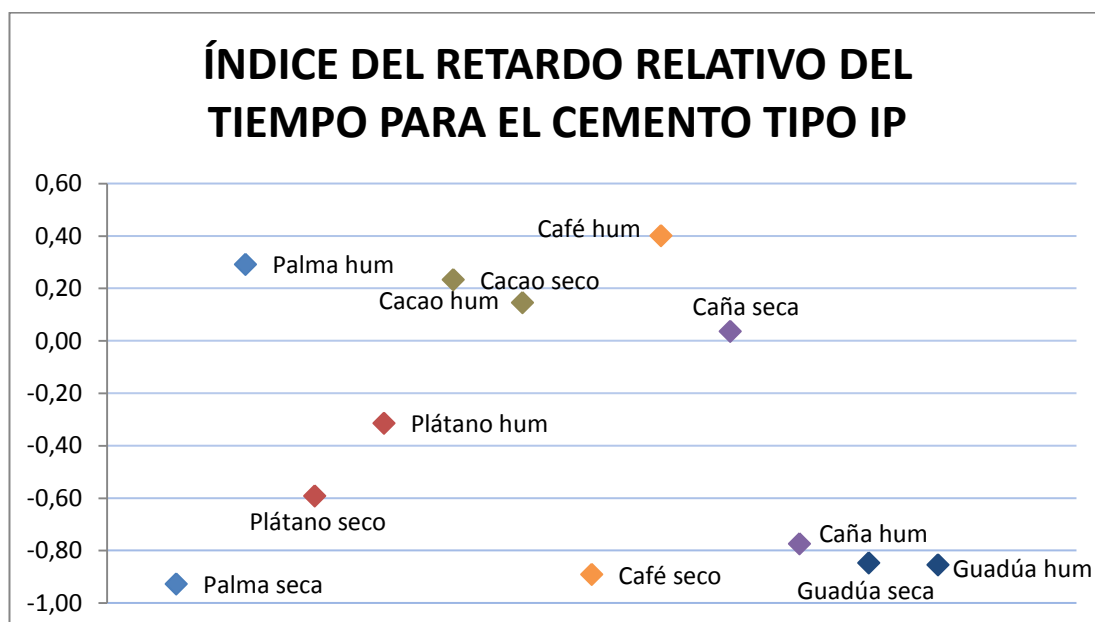


Figura 118. Resultados del Índice del retardo relativo del tiempo para el cemento portland puzolánico tipo IP

En la gráfica 4.42., se observa que las biomásas que poseen el índice del retardo relativo del tiempo negativo, alcanzan la hidratación de una manera inmediata, las biomásas que más entorpecen en la reacción son: la palma seca seguido del café seco y de la guadúa tanto seca como húmeda. Por otra parte el café húmedo, se demora más en alcanzar la hidratación que la reacción sola del cemento. Para éste caso el bagazo de caña seco dio mejores resultados.

4.2.4. ÍNDICE DE LA DISMINUCIÓN RELATIVA DE TEMPERATURA

El índice proporcionado por Weatherwax y Tarkow de la disminución relativa de temperatura, es expresado bajo la siguiente fórmula:

$$I_{Te} = \frac{T_c - T_m}{T_c} \quad [8]$$

donde:

I_{Te} : Índice de la disminución relativa de la temperatura.

T_m : Temperatura máxima de hidratación de la mezcla.

T_c : Temperatura máxima de hidratación del cemento.

Para el cemento portland, se muestra a continuación los siguientes resultados:

Tabla 9.

Resultados del Índice de la disminución relativa de temperatura para el cemento portland

	Temperatura [°C]	I_{Te}
CEMENTO PORTLAND	39,59	
RAQUIS DE PALMA HÚMEDA	32,65	0,18
RAQUIS DE PLÁTANO HÚMEDO	30,08	0,24
CASCARILLA DE CACAO HÚMEDA	33,11	0,16
CASCARILLA DE CAFÉ HÚMEDA	32,60	0,18
BAGAZO DE CAÑA HÚMEDO	26,68	0,33
GUADÚA HÚMEDA	34,61	0,13

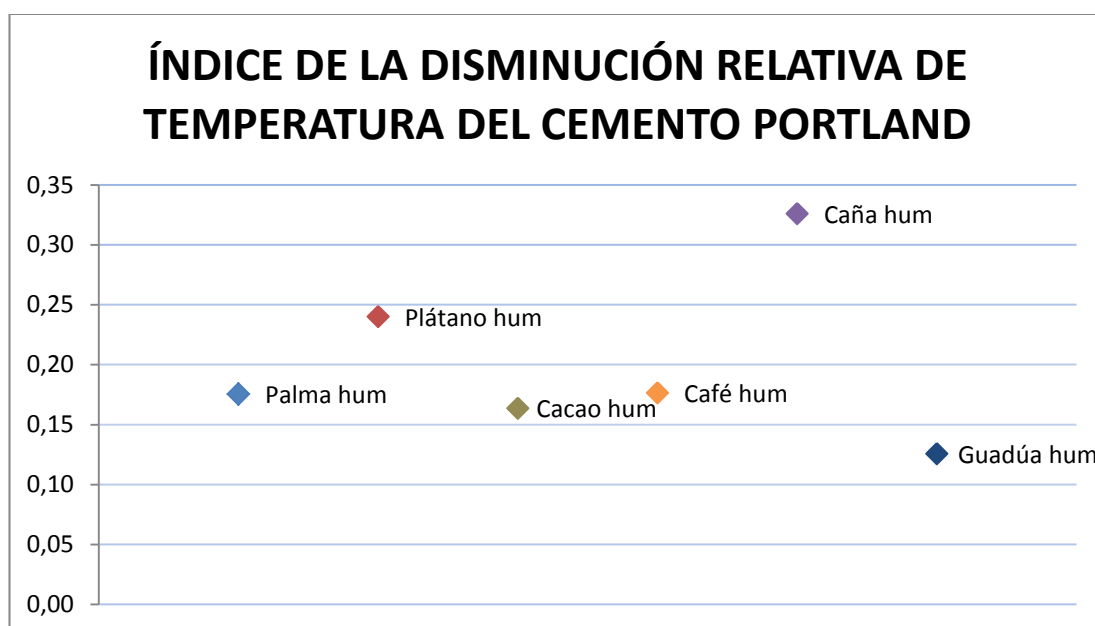


Figura 119. Resultados del Índice de la disminución relativa de temperatura del cemento portland

Con el cemento portland (gráfica 4.43.), se observa que ninguna biomasa posee un índice de disminución relativo de temperatura negativo, más bien las biomásas reaccionan y llegan a una temperatura prudente. El

bagazo de caña húmedo, alcanza la temperatura más baja. Por otra parte la guadúa húmeda posee una temperatura más cercana a la del cemento.

Para el cemento portland puzolánico tipo IP, se muestra a continuación los siguientes resultados:

Tabla 10.

Resultados del Índice de la disminución relativa de temperatura para el cemento portland puzolánico tipo IP

	Temperatura [°C]	I_{Te}
CEMENTO TIPO IP	26,73	
RAQUIS DE PALMA SECA	25,25	0,06
RAQUIS DE PALMA HÚMEDA	27,77	-0,04
RAQUIS DE PLÁTANO SECO	25,86	0,03
RAQUIS DE PLÁTANO HÚMEDO	24,87	0,07
CASCARILLA DE CACAO SECA	24,30	0,09
CASCARILLA DE CACAO HÚMEDA	26,54	0,01
CASCARILLA DE CAFÉ SECA	25,94	0,03
CASCARILLA DE CAFÉ HÚMEDA	26,97	-0,01
BAGAZO DE CAÑA SECO	25,78	0,04
BAGAZO DE CAÑA HÚMEDO	24,95	0,07
GUADÚA SECA	24,34	0,09
GUADÚA HÚMEDA	24,72	0,08

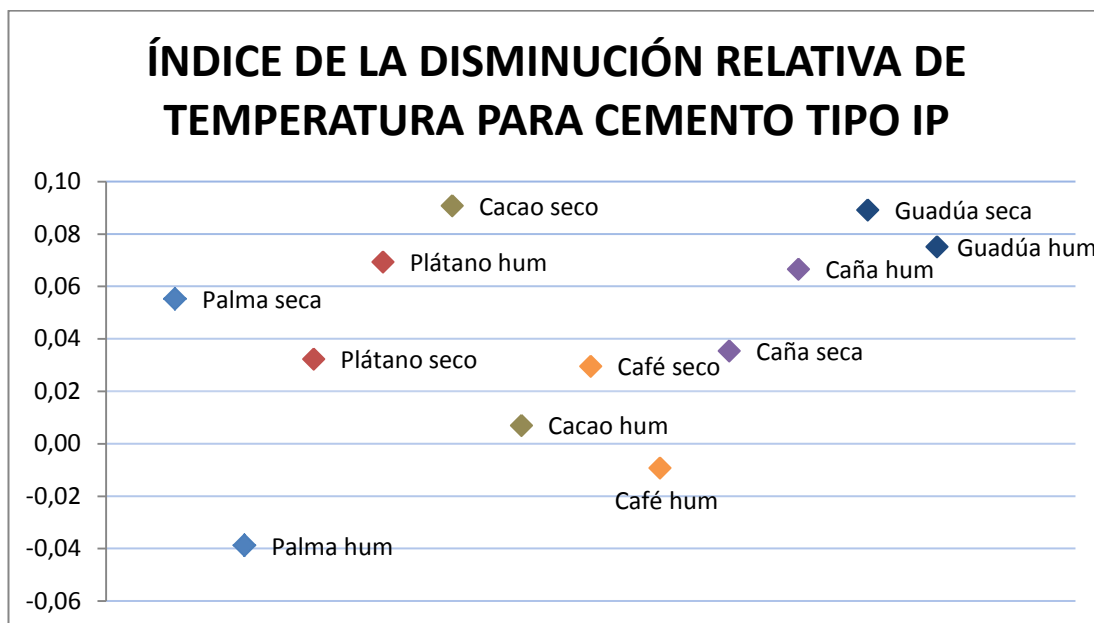


Figura 120. Resultados del Índice de la disminución relativa de temperatura para el cemento portland puzolánico tipo IP

En la gráfica 4.44., se observa que la palma húmeda alcanza una temperatura mayor que el cemento tipo IP solo, por otra parte el cacao seco y la guadúa seca no alcanzan mayores temperaturas. En éste caso la cascarilla de cacao húmeda y la cascarilla de café húmeda dan mejores resultados, y se acercan más a la temperatura que hidrata el cemento.

4.2.5. ÍNDICE DE LA PENDIENTE MÁXIMA RELATIVA

El índice de la pendiente máxima relativa, está dado por la siguiente ecuación:

$$I_p = \frac{p_c - p_m}{p_c} \quad [9]$$

donde:

I_p : Índice de la pendiente máxima relativa.

p_m : Pendiente máxima de la curva de hidratación de la mezcla.

p_c : Pendiente máxima de la curva de hidratación del cemento.

Ejemplo de cálculo de la pendiente:

La ecuación que se registra a continuación, es extraída de la línea de tendencia polinómica de tercer grado del cemento portland (gráfica 4.1.), y es analizada en función del tiempo máximo en alcanzar la temperatura máxima de hidratación del cemento.

$$y = 5E^{-6}x^3 - 0.0072x^2 + 3.2785x - 452.94$$

$$\frac{dy}{dx} = 1.5E^{-5}x^2 - 0.0144x + 3.2785$$

$$\frac{dy}{dx} = 1.5E^{-5}(415)^2 - 0.0144(415) + 3.2785 = -0.114125$$

Para el cemento portland, se muestra a continuación los siguientes resultados:

Tabla 11.

Resultados del Índice de la pendiente máxima relativa para el cemento portland

	Pendiente	I_p
CEMENTO PORTLAND	-0,114125	
RAQUIS DE PALMA HÚMEDA	2,00E-03	1,02
RAQUIS DE PLÁTANO HÚMEDO	2,63E-03	1,02
CASCARILLA DE CACAO HÚMEDA	-9,89E-03	0,91
CASCARILLA DE CAFÉ HÚMEDA	4,98E-02	1,44
BAGAZO DE CAÑA HÚMEDO	6,47E-03	1,06
GUADÚA HÚMEDA	-5,00E-05	1,00

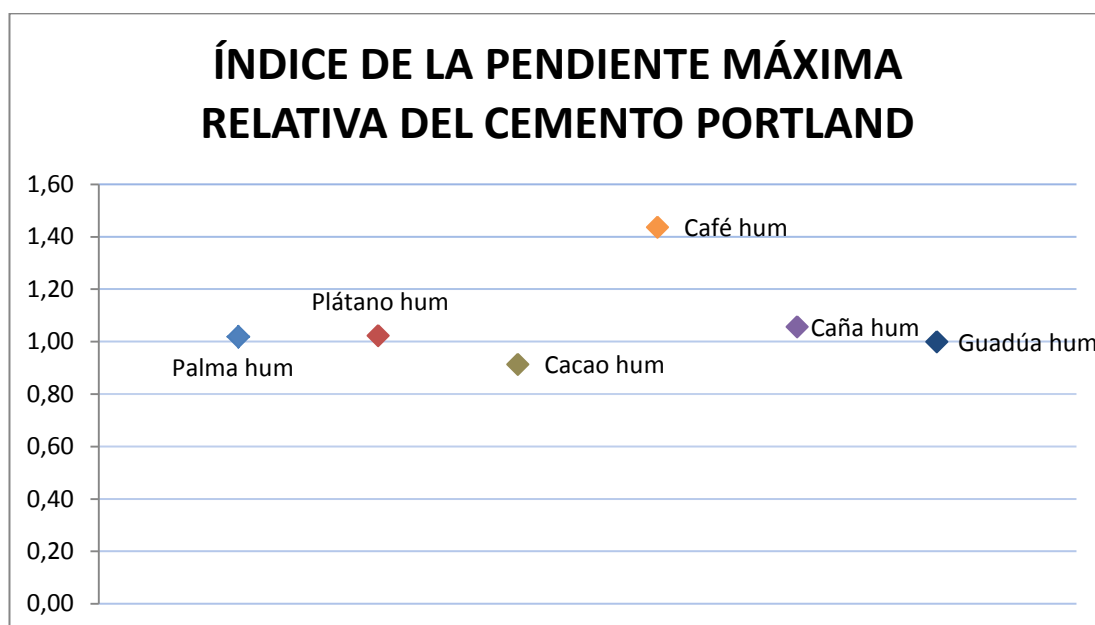


Figura 121. Resultados del Índice de la pendiente máxima relativa para el cemento portland

Con el cemento portland, se observa en la gráfica 4.45., que todas las biomásas se encuentran distantes al índice de la pendiente máxima relativa del cemento, pero la biomasa más cercana al mismo es la cascarilla de cacao húmeda.

Para el cemento portland puzolánico tipo IP, se muestra a continuación los siguientes resultados:

Tabla 12.

Resultados del Índice de la pendiente máxima relativa para el cemento portland puzolánico tipo IP

	Pendiente	I_p
CEMENTO TIPO IP	-5,08E-03	
RAQUIS DE PALMA SECA	4,90E-03	1,96
RAQUIS DE PALMA HÚMEDA	-1,21E-02	-1,38
RAQUIS DE PLÁTANO SECO	5,14E-03	2,01
RAQUIS DE PLÁTANO HÚMEDO	-5,22E-03	-0,03
CASCARILLA DE CACAO SECA	-8,27E-02	-15,26
CASCARILLA DE CACAO HÚMEDA	-3,60E-02	-6,07
CASCARILLA DE CAFÉ SECA	2,85E-03	1,56
CASCARILLA DE CAFÉ HÚMEDA	-9,50E-03	-0,87
BAGAZO DE CAÑA SECO	-2,46E-04	0,95
BAGAZO DE CAÑA HÚMEDO	-1,42E-03	0,72
GUADÚA SECA	-9,73E-03	-0,91
GUADÚA HÚMEDA	-2,70E-03	0,47

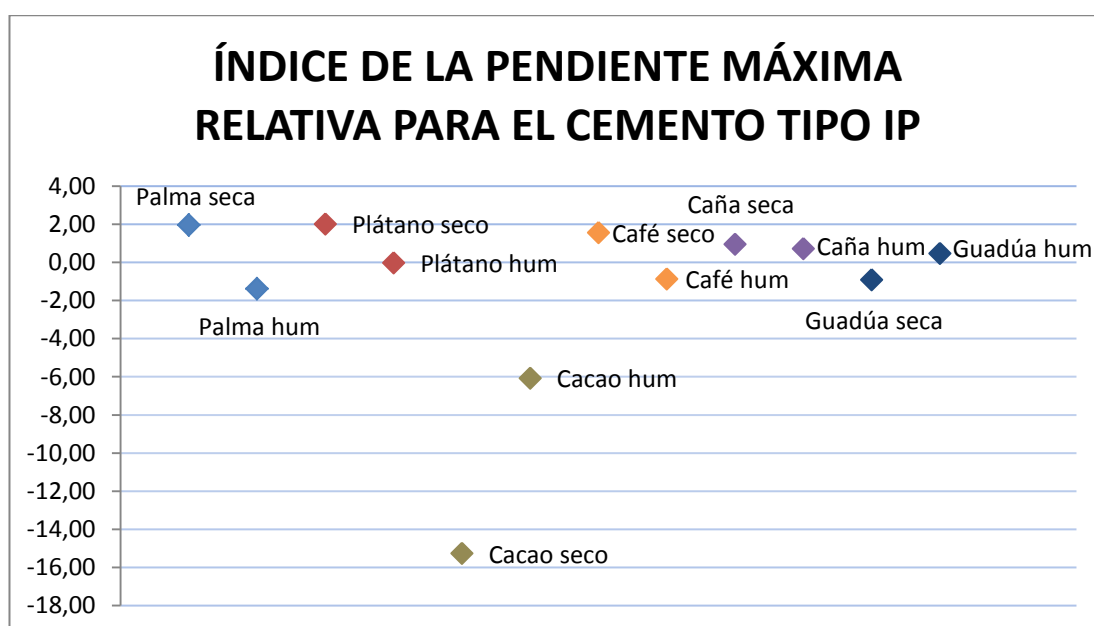


Figura 122. Resultados del Índice de la pendiente máxima relativa para el cemento portland puzolánico tipo IP

El índice de la pendiente máxima relativa es más sensible, porque hay una relativa diferencia de temperaturas muy pequeña, por lo que en la gráfica 4.46., se observa que la mayoría de biomásas cumplen con índice de pendientes o son más próximos al del cemento. Para éste caso la mejor biomasa es la combinación del cemento portland puzolánico tipo IP con la guadúa húmeda.

4.2.6. ÍNDICE DE COMPATIBILIDAD

El índice de compatibilidad, según Hofstrand, se calcula con la multiplicación de los índices calculados anteriormente. Los cuales son: índice del retardo relativo del tiempo, índice de la disminución relativa de la temperatura y el índice de la pendiente máxima relativa.

$$I_c = \left[\left(\frac{t_m - t_c}{t_c} \right) \left(\frac{T_c - T_m}{T_c} \right) \left(\frac{p_c - p_m}{p_c} \right) \right] \quad [10]$$

donde:

I_c : Índice de compatibilidad.

Para el cemento portland, se muestra a continuación los siguientes resultados:

Tabla 13.

Resultados del Índice de compatibilidad para el cemento portland

CEMENTO PORTLAND	I_{ti}	I_{Te}	I_p	I_c
RAQUIS DE PALMA HÚMEDA	0,39	0,18	1,02	0,07
RAQUIS DE PLÁTANO HÚMEDO	0,47	0,24	1,02	0,12
CASCARILLA DE CACAO HÚMEDA	0,22	0,16	0,91	0,03
CASCARILLA DE CAFÉ HÚMEDA	0,47	0,18	1,44	0,12
BAGAZO DE CAÑA HÚMEDO	0,51	0,33	1,06	0,17
GUADÚA HÚMEDA	0,81	0,13	1,00	0,10

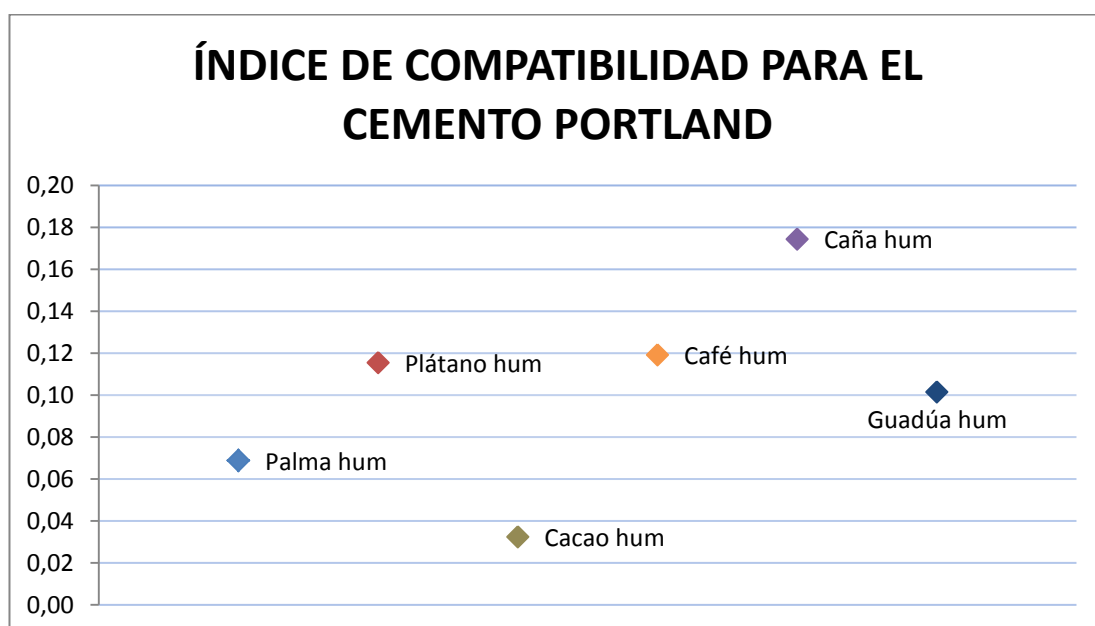


Figura 123. Resultados del Índice de compatibilidad para el cemento portland

Por otra parte con el cemento portland, se observa en la gráfica 4.47., que algún componente que posee el bagazo de caña húmeda entorpece a la reacción agua – cemento, por lo que se aleja más a ser compatible. En éste caso la cascarilla de cacao húmeda es el que mejor compatibilidad posee con el cemento.

Para el cemento portland puzolánico tipo IP, se muestra a continuación los siguientes resultados:

Tabla 14.

Resultados del Índice de compatibilidad para el cemento portland puzolánico tipo IP

CEMENTO TIPO IP	<i>I_{ti}</i>	<i>I_{Te}</i>	<i>I_p</i>	<i>I_c</i>
RAQUIS DE PALMA SECA	-0,93	0,06	1,96	-0,100
RAQUIS DE PALMA HÚMEDA	0,29	-0,04	-1,38	0,016
RAQUIS DE PLÁTANO SECO	-0,59	0,03	2,01	-0,038
RAQUIS DE PLÁTANO HÚMEDO	-0,31	0,07	-0,03	0,001
CASCARILLA DE CACAO SECA	0,23	0,09	-15,26	-0,324
CASCARILLA DE CACAO HÚMEDA	0,15	0,01	-6,07	-0,006
CASCARILLA DE CAFÉ SECA	-0,89	0,03	1,56	-0,041
CASCARILLA DE CAFÉ HÚMEDA	0,40	-0,01	-0,87	0,003
BAGAZO DE CAÑA SECO	0,04	0,04	0,95	0,001
BAGAZO DE CAÑA HÚMEDO	-0,77	0,07	0,72	-0,037
GUADÚA SECA	-0,85	0,09	-0,91	0,069
GUADÚA HÚMEDA	-0,85	0,08	0,47	-0,030

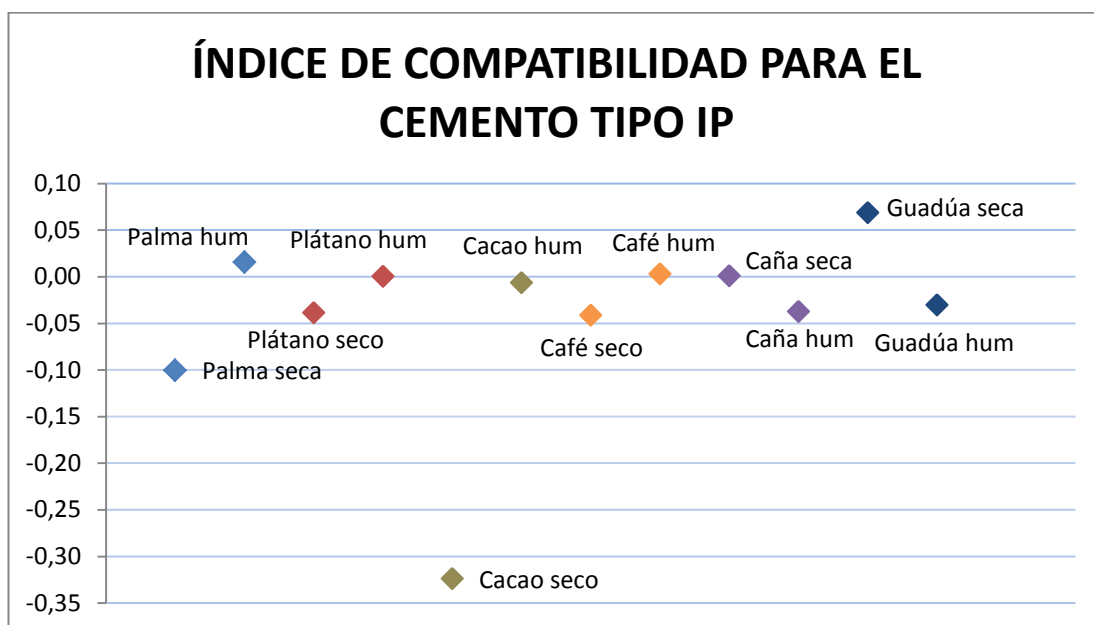


Figura 124. Resultados del Índice de compatibilidad para el cemento portland puzolánico tipo IP

En la gráfica 4.48., se muestra las biomásas más compatibles con el cemento portland puzolánico tipo IP, entre ellas son: el raquis de palma húmeda, el raquis de plátano húmedo, la cascarilla de café húmeda y el bagazo de caña seco. Por otra parte la biomasa menos compatible es la cascarilla de cacao seca.

4.3. RESUMEN DE RESULTADOS

Tabla 15.

Resumen de resultados para el cemento portland

	tiempo [min]	Temperatura [°C]	Pendiente	I_{ti}	I_{Te}	I_p	I_c
CEMENTO PORTLAND	415	39,59	-0,114125				
RAQUIS DE PALMA HÚMEDA	575	32,65	2,00E-03	0,39	0,18	1,02	0,07
RAQUIS DE PLÁTANO HÚMEDO	610	30,08	2,63E-03	0,47	0,24	1,02	0,12
CASCARILLA DE CACAO HÚMEDA	505	33,11	-9,89E-03	0,22	0,16	0,91	0,03
CASCARILLA DE CAFÉ HÚMEDA	610	32,60	4,98E-02	0,47	0,18	1,44	0,12
BAGAZO DE CAÑA HÚMEDO	625	26,68	6,47E-03	0,51	0,33	1,06	0,17
GUADÚA HÚMEDA	750	34,61	-5,00E-05	0,81	0,13	1,00	0,10

Tabla 16.

Resumen de resultados para el cemento portland puzolánico tipo IP

	tiempo [min]	Temperatura [°C]	Pendiente	I_{ti}	I_{Te}	I_p	I_c
CEMENTO TIPO IP	685	26,73	-5,08E-03				
RAQUIS DE PALMA SECA	50	25,25	4,90E-03	-0,93	0,06	1,96	-0,100
RAQUIS DE PALMA HÚMEDA	885	27,77	-1,21E-02	0,29	-0,04	-1,38	0,016
RAQUIS DE PLÁTANO SECO	280	25,86	5,14E-03	-0,59	0,03	2,01	-0,038
RAQUIS DE PLÁTANO HÚMEDO	470	24,87	-5,22E-03	-0,31	0,07	-0,03	0,001
CASCARILLA DE CACAO SECA	845	24,30	-8,27E-02	0,23	0,09	-15,26	-0,324
CASCARILLA DE CACAO HÚMEDA	785	26,54	-3,60E-02	0,15	0,01	-6,07	-0,006
CASCARILLA DE CAFÉ SECA	75	25,94	2,85E-03	-0,89	0,03	1,56	-0,041
CASCARILLA DE CAFÉ HÚMEDA	960	26,97	-9,50E-03	0,40	-0,01	-0,87	0,003
BAGAZO DE CAÑA SECO	710	25,78	-2,46E-04	0,04	0,04	0,95	0,001
BAGAZO DE CAÑA HÚMEDO	155	24,95	-1,42E-03	-0,77	0,07	0,72	-0,037
GUADÚA SECA	105	24,34	-9,73E-03	-0,85	0,09	-0,91	0,069
GUADÚA HÚMEDA	100	24,72	-2,70E-03	-0,85	0,08	0,47	-0,030

Tanto en las tablas 4.9., y 4.10., se detalla el resumen de resultados tanto para el cemento portland, como para el cemento portland puzolánico tipo IP, respectivamente. Cada biomasa es diferente y a su vez al reaccionar con la puzolana genera diferentes reacciones. En general las biomásas al ser tratadas húmedas poseen mayor compatibilidad con los cementos, en especial con el cemento portland, para éste caso la cascarilla de cacao es la mejor biomasa que presenta buenos resultados, es decir la alta presencia de carbohidratos hace que sea compatible el cemento con la biomasa, por otra parte la presencia de azúcares entorpece a la reacción con el cemento portland, caso contrario que sucede con el cemento portland puzolánico tipo IP, para éste caso la mejor biomasa compatible es el bagazo de caña seco, pero la cascarilla de café seca, es la biomasa que posee mayores alteraciones en las curvas de hidratación para el cemento puzolánico, es decir que el alto contenido de celulosa y su poder calorífico interrumpen a los principales constituyentes del cemento. En general las biomásas secas interrumpen de mayor manera que las biomásas húmedas, en cuanto a las reacciones, pero no en su totalidad.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE COSTOS


5.1. COSTOS DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

A continuación en la tabla 5.1., se detallan los costos tanto directos, es decir los que influyen de manera directa en la investigación, y los costos indirectos, que son aquellos que influyen de una manera indirecta en cuanto a la realización del proyecto de investigación.

Tabla 17.

Costos totales del proyecto de investigación

	ITEM	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	COSTO UNITARIO (\$)	COSTO TOTAL (\$)
COSTOS DIRECTOS	1	Cemento Lafarge Selva Alegre tipo IP	Quintal	1	7,85	7,85
	2	Cemento Portland	Quintal	1	15	15
	3	Cautín 40W MYKAKO	Unidad	1	8	8
	4	Pasta para soldar	Unidad	1	1,15	1,15
	5	Cable sólido 14 AW6, THHN, Incable, R100	Metro	1	0,58	0,58
	6	Vaso de precipitación de vidrio 400 ml.	Unidad	2	4,5	9
	7	Agua destilada	Galón	2	3	6
	8	Varilla de agitación de 25 cm. superior	Unidad	2	1,3	2,6
	9	Vasos térmicos de 4 onzas	Unidad	40	0,05	2
	10	Herramientas	-	-	-	100
	11	Uso del laboratorio de termodinámica	Hora	360	10	3600
	12	Palma africana	Libra	5	10	50
	13	Plátano	Racimo	5	5	25
	14	Cacao	Unidad	8	10	80
	15	Café	Libra	15	10	150

Continúa 

COSTOS DIRECTOS	16	Caña	Unidad	6	5	30
	17	Guadúa	Unidad	4	10	40
COSTOS INDIRECTOS	1	Asesoría	Hora	25	50	1250
	2	Movilización	Mes	7	20	140
	3	Misceláneos	-	-	-	1000
TOTAL						6517,18

Tabla 18.

Financiamiento del proyecto de investigación

FINANCIAMIENTO			
RESPONSABLE	DESCRIPCIÓN	COSTO (\$)	PORCENTAJE (%)
Andrea Aguilar	Materiales para la elaboración de pastas aglutinantes	1177,18	18
Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE	Laboratorios, asesoría y biomasas	5340	82
TOTAL		6517,18	100

Cabe recalcar que en un 82%, se obtuvo el financiamiento por parte de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, entre éstos se encuentran el uso de los laboratorios, la asesoría por parte de docentes del área de conocimiento relacionada con el tema de investigación y de la biomasa utilizada para la elaboración de mezclas.

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES

- Para el cemento portland puzolánico tipo IP, la mejor biomasa compatible, es decir que se aproxima a cumplir un tiempo y temperatura de hidratación relativamente próxima al del cemento es el bagazo de caña seco. Por otra parte para el cemento portland, las biomásas más compatibles son la cascarilla de cacao húmeda y el raquis de palma húmeda.
- En general las biomásas al ser tratadas húmedas poseen mayor compatibilidad con los cementos, en especial con el cemento portland, para éste caso la cascarilla de cacao es la mejor biomasa que presenta buenos resultados, es decir la alta presencia de carbohidratos hace que sea compatible el cemento con la biomasa, por otra parte la presencia de azúcares entorpece a la reacción con el cemento portland, caso contrario que sucede con el cemento portland puzolánico tipo IP, para éste caso la mejor biomasa compatible es el bagazo de caña.
- En base a los estudios realizados gracias al equipo denominado “Calorímetro para medir temperatura en un Sistema Cuasi Adiabático”, se determina, mediante las curvas de hidratación, que las biomásas más nobles al reaccionar con el cemento portland puzolánico tipo IP son la palma seca, el cacao húmedo, la cascarilla de café tanto seca como húmeda, el bagazo de caña seco y la guadúa húmeda porque poseen menos alteraciones, las demás se las considera complejas.
- Con el cemento portland, se determina mediante las curvas de hidratación que las biomásas poseen menos alteraciones que con el

cemento portland puzolánico tipo IP, por lo que se establece que todas las biomásas son compatibles, unas mejores que otras.

- Las variaciones que ocurren en las curvas de hidratación, dependen básicamente de la biomasa que se añade, puesto que todas las biomásas analizadas no son iguales, es decir poseen propiedades físicas, químicas y térmicas diferentes, que reaccionan de una forma particular con la pasta de cemento.
- El calorímetro utilizado para la determinación de las temperaturas de hidratación para cada mezcla, es cuasi adiabático, puesto que el promedio general del aumento de temperatura en el calorímetro es de aproximadamente medio grado centígrado, además las curvas de temperatura de aislamiento registradas gracias al sensor DHT11, muestran una línea de tendencia constante, es decir que la temperatura registrada entre el segundo y tercer recipiente de la mayoría de mezclas se mantuvo constante mientras se desprendía calor en la mezcla.
- La liberación de calor indica la reactividad de los materiales; por lo que en el cemento portland la temperatura de hidratación máxima alcanzada es de 39,59°C en 7 horas, por lo que se considera exotérmico, provocando el calentamiento de la pasta, por otra parte la puzolana reduce el calor de hidratación, lo que se establece para el cemento portland puzolánico tipo IP, donde la temperatura de hidratación máxima alcanzada es de 26,73°C en 12 horas.
- Con la presencia de más agua a la mezcla y de poca biomasa, así como también la adición de mayor biomasa, no existe reacción alguna, es decir el desprendimiento de calor durante un día no ocurre. Por otra parte, al incrementar más cemento a la mezcla ésta posee una mejor reacción, provocando una temperatura de hidratación de 25,90°C en 14 horas.

6.2. RECOMENDACIONES

- Para el análisis de resultados la forma más recomendable en analizar los mismos, es el índice de compatibilidad, el mismo que depende del índice del retardo relativo del tiempo, de la disminución relativa de temperatura y de la pendiente máxima relativa.
- Estudiar la influencia del tamaño de la muestra en las oscilaciones de la temperatura para así determinar el tamaño de los vasos térmicos más adecuados.
- Es importante analizar cada uno de los índices, posterior a utilizar el índice de compatibilidad, puesto que los mismos dependen de la temperatura, tiempo y de las curvas de hidratación.
- Para posteriores experimentos y análisis a realizarse, es preferible utilizar las biomasa húmedas, puesto que la puzolana necesita de mayor agua para reaccionar e hidratar con el cemento.
- Para una mejor determinación en cuanto a las curvas de hidratación, es necesario que las muestras de cemento y biomasa se encuentren en el calorímetro durante el período completo de 1 día, en algunas biomasa dependiendo del caso, es posible analizarlas en 2 días, para ver si existe reacción alguna.
- Para mejores resultados y visualización en cuanto a las curvas de hidratación, es recomendable analizarlas cada 5 minutos, realizando un promedio de los mismos, puesto que en la interfaz HMI de LabView, los datos son almacenados en archivos de texto (LVM), y se ejecutan cada medio segundo.
- Es necesario conocer y cuantificar el contenido de biomasa a ser utilizada, la relación agua/cemento a ser empleada en la mezcla, puesto que el calentamiento en la hidratación del cemento depende de la proporción de los diferentes componentes.
- Al ser ingresada la mezcla al calorímetro adiabático, tener en cuenta que la lámina de cobre se inserte de manera ligera en la mezcla,

puesto que si no existe contacto alguno, los datos en la interfaz HMI de LabView no serán correctos.

- Antes de utilizar el calorímetro verificar que los sensores de temperatura se encuentren operativos, así como la programación en Arduino y Labview. Igualmente verificar la correcta conexión de los cables a los respectivos pines de la placa de Arduino UNO, así como el cable USB que se encuentre en perfecto estado para realizar la toma de datos.

BIBLIOGRAFÍA

- Hidratación del Cemento Portland* . (15 de Enero de 2012). Recuperado el 13 de Marzo de 2015, de <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion7.HidratacionCEMENTO.pdf>
- Barriga, A. (2012). *Aplicaciones de Biomasa*. Recuperado el 28 de Julio de 2015, de <http://www.cdts.espol.edu.ec/documentos/AplicacionesdeBiomasa.pdf>
- Calleja, J. (2014). *Cementos Puzolánicos* . Recuperado el 23 de Junio de 2015, de <http://materconstrucc.revistas.csic.es>
- Comisión Federal de Electricidad, U. (2001). *Manual De Tecnología Del Concreto* . México: Limusa Noriega Editores.
- Cotera, M. G. (1 de Mayo de 2014). *Cementos Portland Puzolánicos*. Recuperado el 1 de Mayo de 2015, de http://www.asocem.org.pe/SCMRoot/bva/f_doc/cemento/adicionado/cementos_portland_MGC07.PDF
- Frederick S. Merritt, M. K. (2002). *Manual Del Ingeniero Civil* . México: McGraw-Hill.
- Gabalec, M. (2008). *Tiempo de Fraguado del Hormigón*. Recuperado el 15 de Julio de 2015, de http://lemac.frlp.utn.edu.ar/wp-content/uploads/2011/12/Tesis2008_Anabela-Gabalec_Tiempo-de-Fraguado-del-Hormigon.pdf
- García, M. (12 de Noviembre de 2013). *Elaboración del Cemento*. (J. Pérez, Entrevistador)
- Garza, G. d. (1991). *Materiales Y Construcción*. México: Trillas.
- Gomá, F. (1979). *El Cemento Portland Y Otros Aglomerantes*. Barcelona: ETA, S.A.
- González, J. A. (2009). *Centrales de Energías Renovables* . Madrid: Pearson Educación S.A.
- Hashemi, J. (2009). *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales* . México: McGraw Hill.
- Holcim, C. (1 de Agosto de 2012). *Tipos de Cementos y Normativa* . Recuperado el 6 de Mayo de 2015, de http://construyeconconfianza.com/pdfs/holcim_cementos_normativas_2014.pdf
- INECYC. (10 de Agosto de 2006). *Instituto Ecuatoriano del Cemento y del Hormigón*. Recuperado el 15 de Septiembre de 2015, de <http://www.inecyc.org.ec/>
- Izaguirre, J. R. (1976). *Características Y Correcta Aplicación De Los Diversos Tipos De Cemento*. Barcelona: ETA, S.A.

- Lafarge, C. (31 de Julio de 2009). *El Cemento Portland Puzolánico Tipo IP*. Recuperado el 16 de Marzo de 2015, de <http://www.lafarge.com.ec/Cemento%20Portland%20Puzolanico%20tipo%20IP.pdf>
- Méndez, M. T. (1 de Junio de 2014). *Construcción De Un Módulo De Adobe Reforzado Con Mallas De Junco En Cañete*. Recuperado el 15 de Mayo de 2015, de <http://www5.uva.es/grupotierra/publicaciones/digital/libro2014/341-349-mendez.pdf>
- Michael S. Mamlouk, J. P. (2009). *Materiales Para Ingeniería Civil*. Madrid: Pearson Educación, S.A.
- Negrete, C. (2012). *Evaluación del Uso de Arcilla y Puzolanas en la Etapa de Molienda de Acabado para la Fabricación de Cemento Portland Puzolánico Tipo IP*. Recuperado el 18 de Julio de 2015, de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/2389/1/tq864.pdf>
- NTE INEN 158. (2009). *Cemento Hidráulico. Determinación del Tiempo de Fraguado. Método de Vicat*. Recuperado el 20 de Septiembre de 2015, de <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.0158.2009.pdf>
- NTE INEN 159. (2010). *Cemento Hidráulico. Determinación del Tiempo de Fraguado. Método Agujas de Gillmore*. Recuperado el 20 de Octubre de 2015, de <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.0159.2010.pdf>
- NTE INEN 196. (2009). *Cemento Hidráulico. Determinación de la Finura mediante el Aparato de Permeabilidad al Aire*. Recuperado el 15 de Agosto de 2015, de <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.0196.2009.pdf>
- NTE INEN 197. (2010). *Cemento Portland. Determinación de la Finura mediante el Método del Turbidímetro*. Recuperado el 10 de Octubre de 2015, de <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.0197.2010.pdf>
- NTE INEN 490. (2011). *Cementos Hidráulicos Compuestos. Requisitos*. Recuperado el 15 de Mayo de 2015, de <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.0490.2011.pdf>
- OMPI. (20 de Mayo de 2015). *Constitución de la República del Ecuador*. Recuperado el 15 de Mayo de 2015, de http://www.wipo.int/wipolex/es/text.jsp?file_id=195600
- Rivas, R. (17 de Enero de 2013). *Cemento de Lafarge Selva Alegre. La Hora*.
- Salazar, A. (2013). *¿Qué es una puzolana?* Recuperado el 18 de Julio de 2015, de <http://www.ecoingenieria.org/docs/Puzolanas.pdf>
- Solagro. (2014). *Palma Africana*. Recuperado el 21 de Agosto de 2015, de <http://www.solagro.com.ec/en/cultivos-2/item/palma-africana.html>
- Theodore Baumeister, E. A. (1984). *Manual Del Ingeniero Mecánico*. México: McGraw-Hill.