

**DETERMINACIÓN DE UNA CORRELACION ENTRE DATOS
CALORIMÉTRICOS DE LA HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y SU
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN**

MONICA KATHERINE SALAZAR CALDERÓN

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2014

**DETERMINACIÓN DE UNA CORRELACION ENTRE DATOS
CALORIMÉTRICOS DE LA HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y SU
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN**

MONICA KATHERINE SALAZAR CALDERÓN

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniera Química

Director

Prof. ARLEX CHAVES GUERRERO

Ingeniero Químico

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2014

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	12
1. MARCO TEORICO	14
1.1. CEMENTO PÓRTLAND	14
1.1.1. Definición y clasificación	14
1.1.2. Propiedades fundamentales del cemento	15
1.1.2.1. Fraguado	15
1.1.2.2. Estabilidad de volumen	15
1.1.2.3. Resistencia a la compresión	16
1.1.2.4. Calor de hidratación	16
1.2. HIDRATACIÓN DEL CEMENTO	17
1.2.1. Etapa 1- Hidrólisis inicial	17
1.2.2. Etapa 2 - Inducción o durmiente	18
1.2.3. Etapa 3 - Endurecimiento inicial	18
1.2.4. Etapa 4 – Desaceleración	18
1.2.5. Etapa 5 – Estabilidad	19
2. DESARROLLO EXPERIMENTAL	20
2.1. ETAPA I: DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.	20
2.1.1. Problemática e hipótesis	20
2.1.2. Consulta bibliográfica	21
2.1.3. Preliminares	21
2.1.4. Datos Experimentales	21
2.2. ETAPA II: DESARROLLO DE LOS TIPOS DE ENSAYOS	21
2.2.1. Ensayo de resistencia a la compresión	21

2.2.1.1. Morteros de cemento	22
2.2.1.2. Moldes	24
2.2.1.3. Cámara húmeda y máquina de ensayos	24
2.2.2. Ensayo de Calorimetría	25
2.2.2.1. Mezcla agua/cemento	26
2.2.2.2. Curado autógeno	26
2.2.2.3. Método calorimétrico	27
2.3. ETAPA III: ESTIMACIÓN Y EVALUACIÓN DEL MODELO.	29
2.3.1. Regla de Sturges	29
2.3.3. Regresión Lineal	30
2.3.4. Preparación de datos	30
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	31
4. CONCLUSIONES	37
5. RECOMENDACIONES	39
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40
BIBLIOGRAFÍA	43
ANEXOS	46

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Evolución del calor como función del tiempo para pasta de cemento	17
Figura 2. Metodología desarrollada a lo largo del proyecto	20
Figura 3. Diagrama de proceso para ensayos de resistencia a la compresión del cemento portland tipo I	22
Figura 4. Diagrama de proceso para ensayos de calorimetría del cemento portland tipo I	26
Figura 5. Histograma con intervalos de ΔT_{\max} hallados con la Regla de Sturges	32
Figura 6. Correlación gráfica de la Resistencia a la compresión a 1 día en función del ΔT_{\max} obtenidos por ensayos calorimétricos	33
Figura 7. Correlación gráfica de la Resistencia a la compresión a 3 días en función del ΔT_{\max} obtenidos por ensayos calorimétricos	34
Figura 8. Correlación gráfica de la Resistencia a la compresión a 7 días en función del ΔT_{\max} obtenidos por ensayos calorimétricos	34
Figura 9. Correlación gráfica de la Resistencia a la compresión a 28 días en función del ΔT_{\max} obtenidos por ensayos calorimétricos	35

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Tolerancia en la edad del cubo para el ensayo	25
Tabla 2. Aplicación de la Regla de Sturges	31
Tabla 3. Frecuencia de datos divididos en intervalos	31
Tabla 4. Promedio de datos para cada intervalo	32

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Ilustración de la grafica Temperatura vs Tiempo	46
Anexo B. Resultados de ensayos de resistencia a la compresión a 1, 3, 7 y 28 días. [kg/cm ²]	47
Anexo C. Resultados de ensayos de calorimetría [°C]	48
Anexo D. Datos de resistencia a 1, 3, 7 y 28 días organizados por intervalos	49
Anexo E. Relaciones lineales con los datos obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión a diferentes edades y los cambios de temperaturas registradas en los ensayos calorimétricos	50

RESUMEN

TITULO: DETERMINACIÓN DE UNA CORRELACIÓN ENTRE DATOS CALORIMÉTRICOS DE LA HIDRATACIÓN DEL CEMENTO Y SU RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN^{*}.

AUTOR: SALAZAR CALDERÓN, MONICA KATHERINE^{**}

PALABRAS CLAVES: Calorimetría, Resistencia a la compresión, Modelo matemático, Concreto, Curado autógeno, Clinker.

CONTENIDO: La hidratación del cemento es un proceso químico y físico entre el cemento y el agua, estas reacciones son exotérmicas y de las cuales el calor generado por el concreto en un ambiente aislado térmicamente permite establecer las características calorimétricas de este por medio del incremento en la temperatura. En el presente trabajo se llevó a cabo un análisis de datos usando los resultados experimentales de los ensayos calorimétricos y los tradicionales ensayos de resistencia a la compresión en cementos del banco de muestras de la planta de cementos CEMEX Bucaramanga. A partir de esta nueva base de datos se construyeron unas correlaciones matemáticas que predicen la resistencia a la compresión en función del cambio en la temperatura durante la hidratación bajo curado autógeno.

Luego las curvas y modelos matemáticos obtenidos se consideran una herramienta predictiva a la hora de determinar la resistencia a la compresión de los cementos producidos en la planta diariamente, aumentando la confiabilidad del producto y disminuyendo la variabilidad del mismo, llegando a representar un ahorro en el consumo de clinker y previniendo posibles caídas en las resistencias. Luego las curvas y modelos matemáticos obtenidos se consideran una herramienta predictiva a la hora de determinar la resistencia a la compresión de los cementos producidos en la planta diariamente, aumentando la confiabilidad del producto y disminuyendo la variabilidad del mismo, llegando a representar un ahorro en el consumo de clinker y previniendo posibles caídas en las resistencias.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Arlex Chaves Guerrero

ABSTRACT

TITLE: DETERMINATION OF A CORRELATION BETWEEN CALORIMETRIC MEASUREMENTS OF CEMENT HYDRATION AND COMPRESSIVE STRENGTH^{*}.

AUTHOR: SALAZAR CALDERÓN, MONICA KATHERINE^{**}

KEY WORDS: Calorimetry, Compressive strength, Mathematical model, Concrete, Curing autogenous, Clinker.

CONTENT: Cement hydration is a chemical and physical process between cement and water, these reactions are exothermic and which the heat generated by the concrete in a thermally isolated environment allows for the calorimetric features of this by increasing the temperature. In this paper we conducted an analysis using the experimental results of the calorimetric tests and traditional tests of compressive strength in cement bank samples CEMEX cement plant Bucaramanga. From this database were built a new mathematical correlations that predict the compressive strength as a function of temperature change during hydration under autogenous curing

Then the curves and mathematical models derived are considered a predictive tool for determining the compressive strength of the cements produced in the plant daily, increasing the reliability of the product and reducing process variability, accounting savings in clinker consumption and preventing possible falls in the resistors. Then the curves and mathematical models derived are considered a predictive tool for determining the compressive strength of the cements produced in the plant daily, increasing the reliability of the product and reducing process variability, accounting savings in clinker consumption and preventing possible falls in the resistors.

* Undergraduate work

** Physico-Chemical Engineering Faculty. Chemical Engineering School. Director: Arlex Chaves Guerrero

INTRODUCCIÓN

El cemento es el principal material utilizado para la construcción y mantenimiento de la infraestructura civil (carreteras, puentes, túneles, viviendas, etc.), las cuales están directamente relacionadas con el desarrollo económico y social de un país. En Colombia actualmente se producen 11,18 millones de toneladas métricas al año [1] de cemento tipo I, las cuales deben ser sometidas a un estricto control de calidad. Dentro de los ensayos a los cuales es sometido el cemento se puede mencionar la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión, ensayo de calorimetría y resistencia a la tensión indirecta, entre otros. No obstante una de las más importantes pruebas de calidad es la resistencia a la compresión a cualquier edad considerada como el índice general de calidad [2], por lo que esta debe ser diariamente monitoreada durante el proceso de producción del cemento.

Actualmente en la planta CEMEX de Bucaramanga llevan a cabo los ensayos de resistencia a la compresión usando morteros de cementos en forma de cubo siguiendo los lineamientos de la Norma NTC220 [ICONTEC, 2004]. Dichos morteros son sometidos a pruebas de resistencia después de transcurrir tiempos de 1, 3,7 y 28 días después de preparados. Sin embargo, estos largos tiempos se convierten en una desventaja a la hora de tomar decisiones para asegurar la confiabilidad del producto durante el proceso de producción.

Por otro lado se ha comprobado que existe una correlación directa entre los resultados de los ensayos de calorimetría (ΔT_{\max}) y la evolución de resistencias [ASTM, 1998] [3]. Este hecho permitiría determinar la resistencia a la compresión a partir de ensayos calorimétricos en las muestras de cemento, en un menor tiempo que el empleado en la técnica tradicional, contribuyendo al ajuste de

variables, confiabilidad del producto, ahorros en el consumo de Clinker y previniendo posibles caídas en las resistencias.

Los ensayos calorimétricos se pueden realizar gracias a la hidratación del cemento, siendo esta una reacción exotérmica entre el cemento y el agua. El calor generado se puede estimar por medio del cambio en la entalpia total de la reacción, que en un ambiente térmicamente aislado está relacionado con el incremento de temperatura que es el dato de interés de este estudio, por medio de la relación $Q=mC_p\Delta T=\Delta H$.

El presente trabajo fue desarrollado en el área de Aseguramiento de Calidad de la planta de CEMEX Bucaramanga y tuvo como ***objetivo realizar los ensayos tanto de resistencia a la compresión como de calorimetría necesarios para la determinación de una correlación capaz de predecir la resistencia a la compresión, a partir del cambio de temperatura máximo (ΔT_{max}) registrado en cada prueba.***

1. MARCO TEORICO

1.1. CEMENTO PÓRTLAND

1.1.1. Definición y clasificación El cemento pórtland es el producto que se obtiene por la pulverización del Clinker (caliza y arcilla) constituido principalmente por silicatos, aluminatos y ferroaluminatos de calcio [4], quien por adición de una cantidad de agua apropiada forma una pasta conglomerante capaz de endurecer sin importar el ambiente al que este expuesta.

Pórtland es el cemento más antiguo, fabricado con clinker y adición de yeso que sirve para retardar el tiempo de fraguado permitiendo una mezcla homogénea entre el cemento, el agua y los agregados (concreto fresco), para luego ser transportada hasta el lugar de la obra.

Según la Norma Técnica Colombiana NTC30 [ICONTEC, 1966] el cemento pórtland es considerado el cemento aglomerante hidráulico por excelencia y se clasifica en:

- Cemento Pórtland Tipo 1: Destinado a obras de hormigón en general y al que no se le exigen propiedades especiales. (Cemento de uso general).
- Cemento Pórtland Tipo 1M: Destinado a obras de hormigón en general al que no se le exigen propiedades especiales pero tiene resistencias superiores a las del tipo 1.
- Cemento Pórtland Tipo 2: Destinado a obras de hormigón expuestas a la acción moderada de sulfatos y a obras donde se requiera moderado calor de hidratación.
- Cemento Pórtland Tipo 3: Desarrolla altas resistencias iniciales.
- Cemento Pórtland Tipo 4: Desarrolla bajo calor de hidratación.

- Cemento Pórtland Tipo 5: Ofrece alta resistencia a la acción de los sulfatos.
- Cemento Pórtland Blanco: Se obtiene con materiales debidamente seleccionados que le confieren una coloración blanca. [5]

1.1.2. Propiedades fundamentales del cemento En su uso final (concreto), el cemento tiene propiedades que lo caracterizan y determinan su vida útil. Dentro de las más importantes se tienen:

1.1.2.1. Fraguado. [1] Se denomina fraguado, al desarrollo que tiene la pasta de cemento cuando pierde plasticidad y empieza a adquirir algo de resistencia. Se deben distinguir dos fases conocidas como principio de fraguado (inicio de rigidez de la pasta) y fin de fraguado (pérdida de plasticidad).

Las pruebas de fraguado se pueden realizar por medio de la aguja de Vicat o de la aguja Gilmore, métodos basados en la penetración de una aguja en la pasta de cemento para determinar una consistencia normal entre 9 y 11mm de penetración durante los 30 primeros segundos después de amasada la mezcla agua-cemento. Si la penetración no está en este rango se debe repetir el ensayo con más o menos agua según sea el caso.

1.1.2.2. Estabilidad de volumen La expansión y/o contracción del cemento portland cuando se hidrata con agua, puede generar tensiones, agrietamiento y fallas que son importantes monitorear para asegurar la calidad del producto.

En la planta CEMEX Bucaramanga se realiza el ensayo de autoclave que registra el porcentaje de dilatación o contracción de una unidad de mortero de cemento con sección cuadrada de una pulgada de lado por 10 pulgadas de longitud, almacenada durante 24 horas con una humedad de 90% y luego por tres horas sometida a presiones de vapor de agua hasta de $2033,9 \pm 68,94\text{kPa}$.

Finalmente, en el transcurso de una hora y media se espera a que enfrié el autoclave y disminuya su presión interna hasta menos de 68,94kPa para poder medir el cambio en la longitud de la probeta causado por el tratamiento y compararlo con la altura inicial.

Cambios mayores a 1% de dilatación o contracción se considera inseguros, por lo tanto se permite un cambio máximo en la longitud de 0.8% según la NTC 121 [ICONTEC, 1982].

1.1.2.3. Resistencia a la compresión La resistencia a la compresión es la propiedad más interesante ya que la finalidad del cemento es la fabricación de morteros y hormigones destinados a todo tipo de construcción. El cemento, mezclado con los áridos y amasados con agua da lugar a pastas que endurecen y tienen gran cohesión, cuya porosidad va disminuyendo a la vez que las resistencias mecánicas van creciendo con el paso del tiempo [6].

El esfuerzo máximo que pueden soportar las pastas de cemento generalmente es expresado en kilogramos por centímetro cuadrado [kg/cm^2] a edades de 1, 3, 7 y 28 días.

1.1.2.4. Calor de hidratación El calor de hidratación es el desprendido durante la reacción entre el agua y el cemento al estar en contacto. El calor de hidratación que se produce en un cemento normal es del orden de 355,64 a 418.4 J/g.

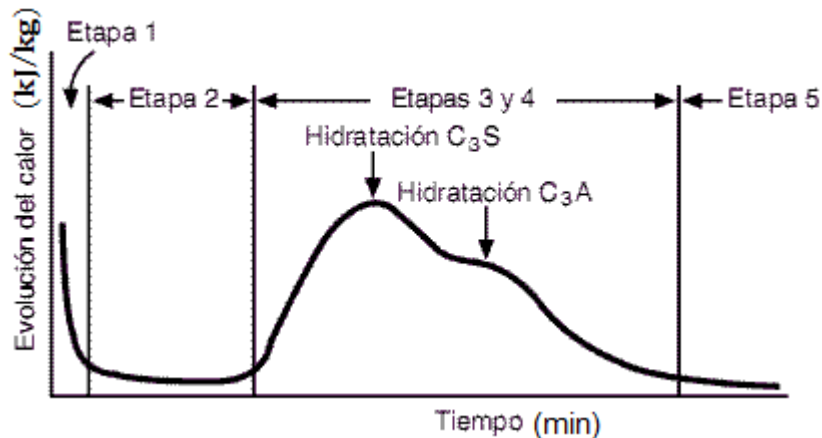
Al generarse grandes gradientes térmicos resultado de la reacción exotérmica de hidratación del cemento se pueden presentar problemas como tensiones mecánicas formando hendiduras, fisuras y/o grietas.

1.2. HIDRATACIÓN DEL CEMENTO

Durante el proceso de hidratación se da una reacción exotérmica, la cuál puede ser monitoreada a través del incremento de temperatura en el mortero.

En este proceso el calor se libera en varias etapas que se ilustran en la Figura 1 y que son explicadas en más detalle a continuación.

Figura 1. Evolución del calor como función del tiempo para pasta de cemento



Fuente: VILLANUEVA, Hope R. CARRASQUILLO, Ramon L. The effect of fly ash on temperature and rise hydration in portland cement concrete. Informe de investigación. Universidad de Texas. Austin. P. 14.

1.2.1. Etapa 1- Hidrólisis inicial [7] Inicia con la hidratación del cemento. En esta etapa, el silicato tricalcico C_3S reacciona con el agua generando una rápida evolución de calor durante el proceso de mezclado. El calor en esta primera etapa no es medido con exactitud pero es influente en la temperatura inicial registrada durante la prueba calorimétrica, T_0 .

Se puede observar en la Figura 1 que el calor en esta etapa es absorbido, efecto dado por el proceso inicial de humedecimiento de la muestra de cemento con agua y contacto con los demás materiales involucrados en el ensayo calorimétrico.

Por este motivo, el ensayo de calorimetría se empieza registrando el calor generado a partir del momento en que el equipo está térmicamente aislado.

1.2.2. Etapa 2 - Inducción o durmiente [8] En esta etapa no se libera calor y el consumo de agua es muy pequeño permitiendo al concreto quedar en un estado plástico donde se puede manejar y transportar fácilmente, permaneciendo así solo hasta que se inicia el fraguado (aprox. 2 a 4 horas).

Prolongar o disminuir esta etapa durmiente depende de las especificaciones con las que se requiera el producto, ya sea un cemento retardado, en donde su estado plástico debe durar más de lo común o por el contrario obtener un fraguado en un tiempo más corto ayudado con aditivos acelerantes.

1.2.3. Etapa 3 - Endurecimiento inicial El silicato tricalcico C3S se hidrata nuevamente pero esta vez con mayor rapidez, liberando la máxima cantidad de calor aprovechado para los ensayos calorimétricos por ser medido con facilidad.

En esta etapa ocurre el fraguado final conocido como el tiempo al que se inicia significativamente la resistencia mecánica, y registrado por los métodos de penetración de la aguja de Vicat o de Gilmore.

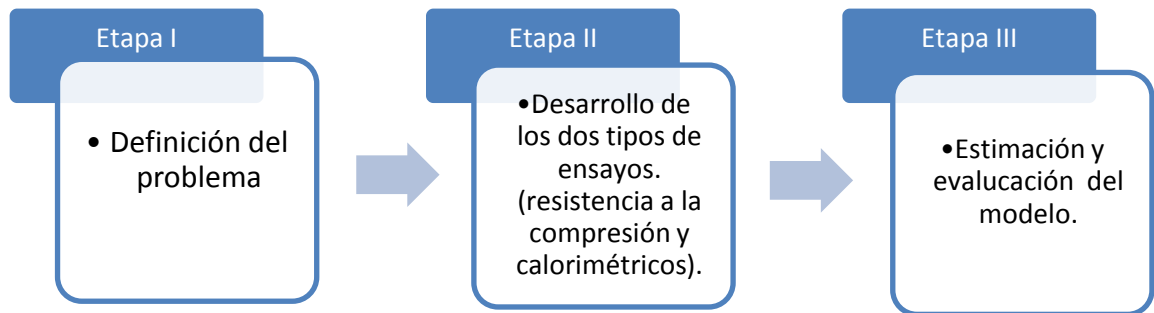
1.2.4. Etapa 4 – Desaceleración La hidratación sucede pero de manera lenta, la generación de calor empieza a decrecer y la velocidad de reacción disminuye hasta llegar a estar estable.

1.2.5. Etapa 5 – Estabilidad Proceso lento de formación de productos de hidratación controlados completamente por difusión, disminuyendo significativamente el calor generado por la reacción que ya no es tan sensible con respecto a la temperatura.

2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

La Figura 2, ilustra la metodología usada durante el desarrollo de la práctica empresarial con el fin de alcanzar el objetivo del proyecto. En esta se distinguen tres etapas que involucran: la definición del problema, el trabajo en campo para la obtención experimental de los datos de resistencia y pruebas calorimétricas, el análisis de resultados y obtención de la correlación matemática entre los datos calorimétricos de la hidratación del cemento y su resistencia a la compresión.

Figura 2. Metodología desarrollada a lo largo del proyecto



Fuente: Autor

2.1. ETAPA I: DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.

2.1.1. Problemática e hipótesis Actualmente la planta CEMEX Bucaramanga sigue los lineamientos establecidos en la Norma NTC220 [10] “Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50mm o 50,8mm de lado” para determinar la resistencia a la compresión, y sobre la cual se toman decisiones pasados de 3 a 7 días. Por otro lado, con la técnica calorimétrica

será posible tomar decisiones rápidas a un día, contribuyendo al ajuste de variables, confiabilidad del producto y disminución de la variabilidad del mismo, representando ahorros en el consumo de Clinker y previniendo posibles caídas en las resistencias.

2.1.2. Consulta bibliográfica Se realizó a lo largo de este trabajo la consulta en libros, artículos, y material bibliográfico proporcionado por la planta CEMEX Bucaramanga, la biblioteca y base de datos de la Universidad Industrial de Santander, sede principal.

2.1.3. Preliminares A partir de la revisión bibliográfica y las Normas Técnicas Colombianas (NTC) se establecieron las variables, las cantidades de las materias a utilizar (agua, cemento, arena) y los equipos necesarios para cada ensayo.

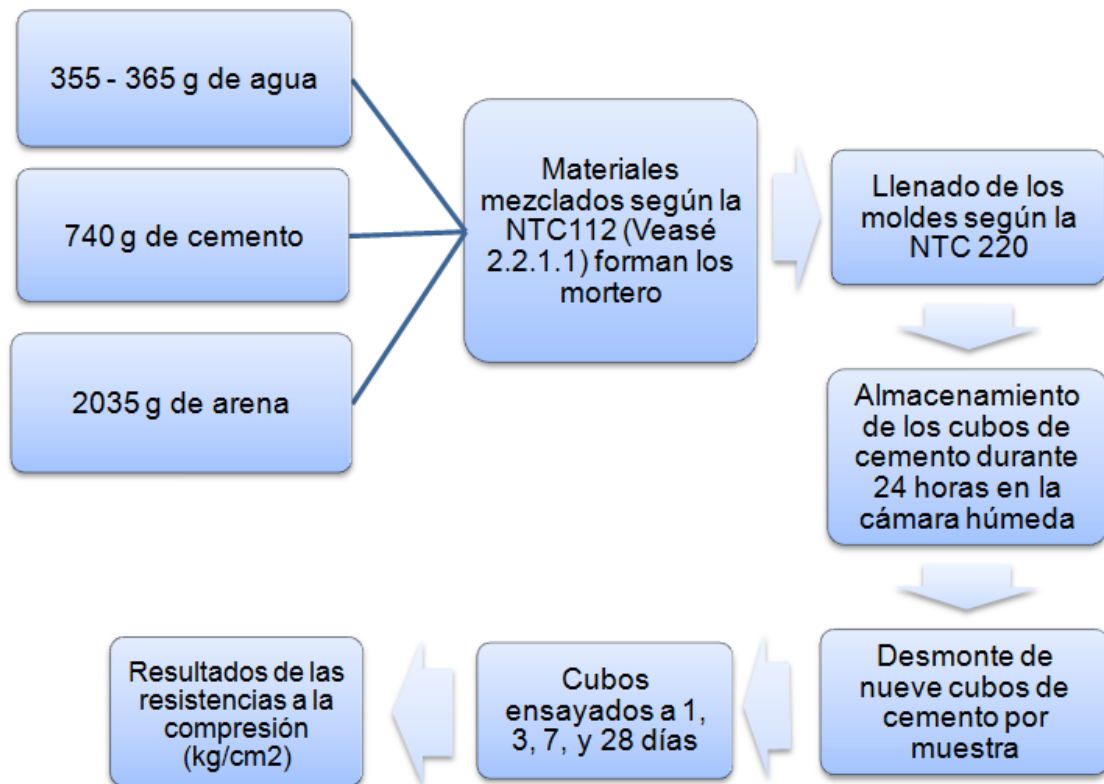
2.1.4. Datos Experimentales Los datos experimentales de la resistencia a la compresión y los ΔT_{max} fueron obtenidos de los ensayos de resistencia a la compresión y de calorimetría respectivamente, realizados en el laboratorio a los lotes de cemento Tipo I durante el periodo de tiempo comprendido entre el 29 de Noviembre de 2013 y el 28 de Diciembre de 2013.

2.2. ETAPA II: DESARROLLO DE LOS TIPOS DE ENSAYOS

2.2.1. Ensayo de resistencia a la compresión En este estudio se realizaron pruebas de cementos tipo I de uso general producido por la planta CEMEX Bucaramanga sin ninguna clase de aditivos para los ensayos de resistencia, siguiendo los lineamientos establecidos en la NTC112 [9] para la formación de morteros de cemento.

El procedimiento que se siguió en los ensayos de resistencia a la compresión se explica en los próximos numerales e ilustrado brevemente en el diagrama de la figura 3.

Figura 3. Diagrama de proceso para ensayos de resistencia a la compresión del cemento portland tipo I



Fuente: Autor

2.2.1.1. Morteros de cemento Diariamente se realizaron morteros con muestras de lotes de cemento tipo I de la planta CEMEX Bucaramanga cuya mezcla debía tener una fluidez requerida de 110 ± 5 mm, determinada por la suma de los diámetros del mortero a lo largo de las líneas señaladas en la plataforma de la mesa de flujo [21], de lo contrario se debía volver a realizar la mezcla variando la cantidad de agua entre 355-365g.

Las pruebas se realizaron mezclando 2035 g de arena, 740 g de cemento y según la relación agua/cemento de 0.485 una cantidad de agua entre 355-365g, con lo que se crearon nueve morteros de las mismas dimensiones con cada muestra diaria.

El proceso realizado en este estudio para la formación de la mezcla de los cubos de cemento se realizó siguiendo los parámetros establecidos en la NTC112 [9] “Mezcla mecánica de pastas de cemento hidráulico y morteros de consistencia plástica” junto a la guía técnica de CEMEX. Los pasos para cada muestra de cemento fueron los siguientes:

I. Estando la paleta mezcladora y el recipiente de mezclado completamente secos se vierte la cantidad de agua de amasado determinada en el recipiente.

II. Luego se agrega el cemento al agua y se enciende la mezcladora en velocidad baja (140 ± 5 rpm) [9] durante 30 segundos.

III. Sin apagar la mezcladora se añade lentamente la cantidad anteriormente pesada de arena en un periodo de 30 segundos.

IV. Se detiene la mezcladora para cambiar de velocidad baja a media (285 ± 10 rpm) [9] y durante 30 segundos más.

V. Posteriormente se apaga la mezcladora para raspar las paredes y el fondo con una cuchara. Esta acción no debe superar un tiempo máximo de 15 segundos. Luego, la mezcla obtenida es cubierta con un trapo húmedo dejándola reposar durante un minuto y 15 segundos.

VI. Por último se vuelve a encender la mezcladora en velocidad media durante un minuto.

2.2.1.2. Moldes Por otra parte, los moldes deben estar engrasados y limpios de cualquier exceso de grasa antes de realizar el procedimiento anterior para ser llenados en un tiempo no mayor a 150 segundos contados desde la terminación de la mezcla de mortero [10].

En cada compartimiento de los moldes se deposita mezcla hasta la mitad y se apisona con 32 golpes del compactador en 4 etapas de 8 golpes adyacentes tratándose que se realicen todos con una misma fuerza.

Luego se llenan completamente los compartimientos de los moldes y se repite las cuatro etapas de compactación en cada uno de ellos, para finalmente retirar los excesos de mortero de la superficie con la ayuda del palustre moviéndolo en forma de vaivén a lo largo de la longitud del molde con el fin de dejar la superficie lisa para una mejor presentación y facilidad al momento de retirarlos.

2.2.1.3. Cámara húmeda y máquina de ensayos Esta cámara es un sistema cerrado capaz de mantener una atmosfera saturada de humedad bajo condiciones estables de temperatura. Para el desarrollo de este ensayo por cada muestra se realizaron 9 cubos, es decir, tres moldes con 3 compartimientos cada uno; llevados a dicha cámara húmeda durante 24 horas para luego ser desmontados y dos de ellos ensayados inmediatamente.

Los demás cubos son sumergidos en tanques de almacenamiento construidos con material no corrosivo que contienen agua saturada con cal apagada, para ser fallados a 3, 7, y 28 días en la máquina de ensayos. Por otro lado las pruebas deben realizarse dentro del rango de tolerancia ilustrado en la tabla 1.

Tabla 1. Tolerancia en la edad del cubo para el ensayo

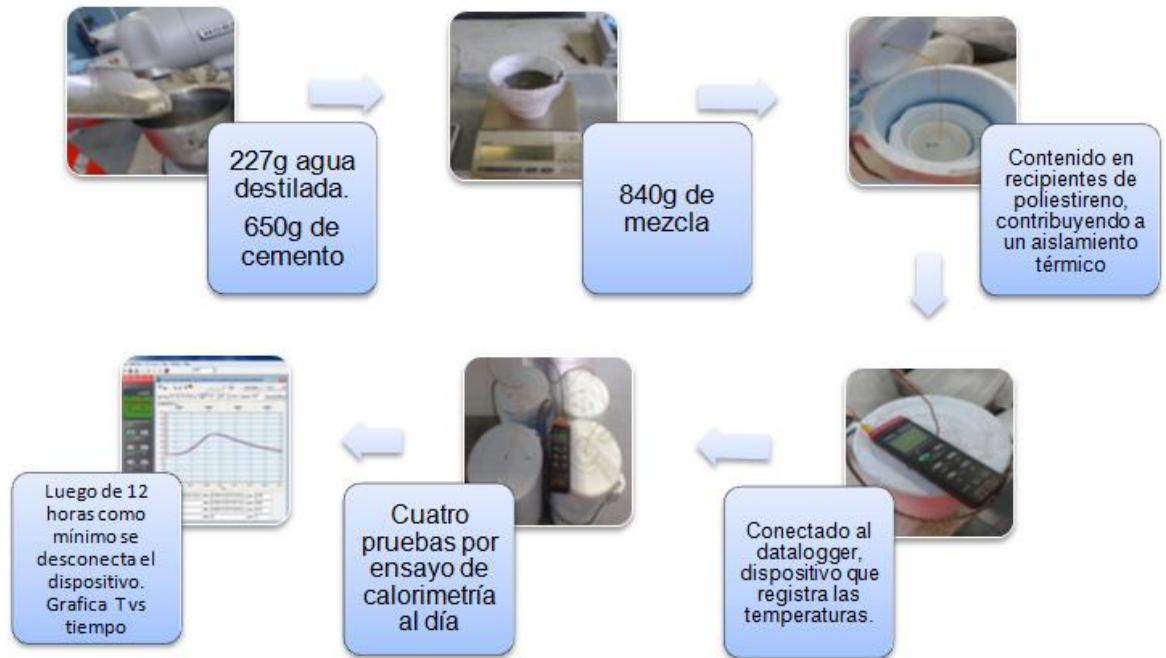
EDAD DEL ENSAYO	TOLERANCIA PERMISIBLE
24horas	± 1/2 hora
3 días	± 1 hora
7 días	± 3horas
28 días	± 12 horas

Fuente: NTC 220 [ICONTEC, 2004] “Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50mm o 50,8mm de lado”

2.2.2. Ensayo de Calorimetría En este parte del estudio se realizaron pruebas calorimétricas para las mismas muestras usadas en los ensayos de resistencia a la compresión de cemento portland tipo I producido diariamente en la planta CEMEX Bucaramanga sin ninguna clase de aditivos.

El procedimiento que se siguió para esta clase de ensayos se explica en los próximos párrafos e ilustrado en el diagrama de la figura 4.

Figura 4. Diagrama de proceso para ensayos de calorimetría del cemento portland tipo I



Fuente: Autor

2.2.2.1. Mezcla agua/cemento La mezcla utilizada para estos ensayos es únicamente de agua y cemento en una proporción de 0,35 en peso respectivamente obtenida después de varios ensayos.

Esta relación agua/cemento se tomó inicialmente de 0,25 la cual se utiliza para los ensayos de fraguado normalmente en la planta, pero en las primeras pruebas se determinó que la mezcla resultante no tenía la fluidez necesaria ya que era muy compacta y se endurecía antes de introducirla al vaso de poliestireno.

2.2.2.2. Curado autógeno El término curado es el proceso que busca mantener saturado el concreto hasta que los espacios de cemento fresco, que originalmente estaban llenos de agua sean reemplazados por los productos de la hidratación del cemento [11].

Esto se puede lograr manteniendo controlada la temperatura, la humedad ambiental, la proporción agua/cemento y el tipo de concreto [12] en el lugar donde se desarrolla la reacción de hidratación. Según este concepto para este trabajo se realiza un curado autógeno que consiste básicamente en un aislamiento térmico entre la muestra y el medio ambiente para ser curada con su propio calor.

El calor generado por la muestra está dado por la ecuación

$$Q_{gen} = m c_p \Delta T = \Delta H$$

Donde, m es la masa de la mezcla agua/cemento, c_p es el calor específico promedio a presión constante y ΔT es el cambio en la temperatura.

Es importante resaltar que para el desarrollo de este trabajo se debe mantener constante la masa agua/cemento para disminuir el número de variables y así obtener la correlación directa entre ΔT_{max} de cada muestra y la evolución de resistencia. [3]

2.2.2.3. Método calorimétrico El método utilizado para los ensayos de calorimetría siguió los parámetros establecidos por el protocolo de ensayos de calorimetría de CEMEX Colombia [13] que consistía en los siguientes pasos para cada muestra diaria de cemento portland tipo I:

- I. Se vierten 227g de agua destilada en el recipiente de mezclado (agua/cemento=0,35).
- II. Al recipiente de mezclado se agrega 650g de cemento al agua, dejando reposar 30 segundos.

III. Luego se enciende la mezcladora en velocidad baja (140 ± 5 rpm) durante 30 segundos.

IV. Se detiene la mezcladora por 15 segundos para arrastrar hacia el fondo la mezcla adherida a las paredes y remover la del fondo del recipiente de mezcla evitando que queden grumos de cemento sin mezclar.

V. Durante 60 segundos se mezcla a velocidad media (285 ± 10 rpm).

VI. Se apaga la mezcladora, se pesan 840g de mezcla y se vierten en la bolsa plástica colocada con anterioridad dentro del envase de poliestireno de 0,71L.

VII. Posteriormente se ubica dentro de la nevera cilíndrica de 2,3 litros y, a su vez, en la nevera cilíndrica de 8,1 litros.

Nota: Antes de poner en contacto la termocupla tipo K con la muestra se debe tener un pitillo puesto en la termocupla con uno de los extremos sellados para evitar el contacto directo y así poderla sacarla más fácilmente después de terminado el ensayo.

VIII. La termocupla debe atravesar la mezcla quedando lo más centrada posible para una mayor uniformidad en la lectura de temperaturas, luego se procede a cerrar la bolsa plástica, y cada uno de los recipientes con sus tapas respectivas.

Nota: La bolsa plástica y las tapas de los recipientes deben permitir el paso de la termocupla hasta la muestra sin dejar que escape calor y cuidando de no dejar espacios por donde se pueda escapar el agua al evaporarse.

IX. Cerrados los recipientes se puede conectar la termocupla al dispositivo (datalogger tecpel 319) para empezar el registro de temperaturas. Finalmente

pasadas como mínimo 12 horas de hidratación, se descarga la información y con la ayuda del programa se obtiene la grafica temperatura vs tiempo (Anexo A).

El anterior procedimiento se realizó en 4 calorímetros conectados a un dispositivo para la medición de temperatura (datalogger tecpel 319 de 4 canales).

2.3. ETAPA III: ESTIMACIÓN Y EVALUACIÓN DEL MODELO.

Antes de analizar los resultados se verificó que las temperaturas iniciales reportadas en los datos experimentales fueran mayores a 23 °C esto debido a que el agua de amasado fue utilizada a una temperatura de $23\pm 1^{\circ}\text{C}$ y la reacción de hidratación es exotérmica, al presentarse esta situación era necesario repetir la prueba hasta lograr registrar una temperatura inicial mayor o igual a 23°C.

2.3.1. Regla de Sturges[14] La regla de Sturges nos permitió establecer el número de clases o intervalos óptimo en los cuales se pueden discretizar los datos de temperatura. Esta regla se define a través de la siguiente expresión [14];

$$\# \text{ Intervalos} = 1 + 3,322\log(N)$$

Donde,

El logaritmo está en base 10, N es el número de muestras y el número de intervalos comúnmente se redondea al entero más cercano.

Por otra parte la amplitud del intervalo se determina calculando el cociente entre el rango R y el número de intervalos.

$$\text{Amplitud} = \frac{\text{Rango}}{\# \text{ Intervalos}}$$

$$Rango = X_{max} - X_{min}$$

2.3.3. Regresión Lineal [15] El coeficiente de determinación R^2 es uno de los valores más significativos al momento de realizar una regresión, ya que expresa la proporción de varianza de la variable dependiente respecto a la variable independiente siendo su valor máximo 1.

Por otro lado, el error típico también hallado en la estadística de la regresión tiene propiedades análogas a la de la desviación típica, por lo tanto, cuanto mejor es el ajuste, más pequeño es el error típico.

2.3.4. Preparación de datos Los ensayos de resistencia a la compresión y de calorimetría para este trabajo de grado se realizaron en muestras de Cemento Portland Tipo I que fueron producidas por la planta CEMEX Bucaramanga desde el 29 de Noviembre de 2013 hasta el 28 de Diciembre de 2013.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Dando como resultados los datos de las Anexo B y C respectivamente.

Luego a los datos resultantes de los ensayos de resistencia a la compresión se les calculó la media para reducirlos a un solo valor por día ensayado (Anexo D). Posteriormente, se utilizó la regla de Sturges para determinar el número de intervalos y amplitud correspondiente (Tabla 2).

Tabla 2. Aplicación de la Regla de Sturges

Rango	24,70
#intervalos	5,90699681 6
Amplitud	4,2

Fuente: Autor

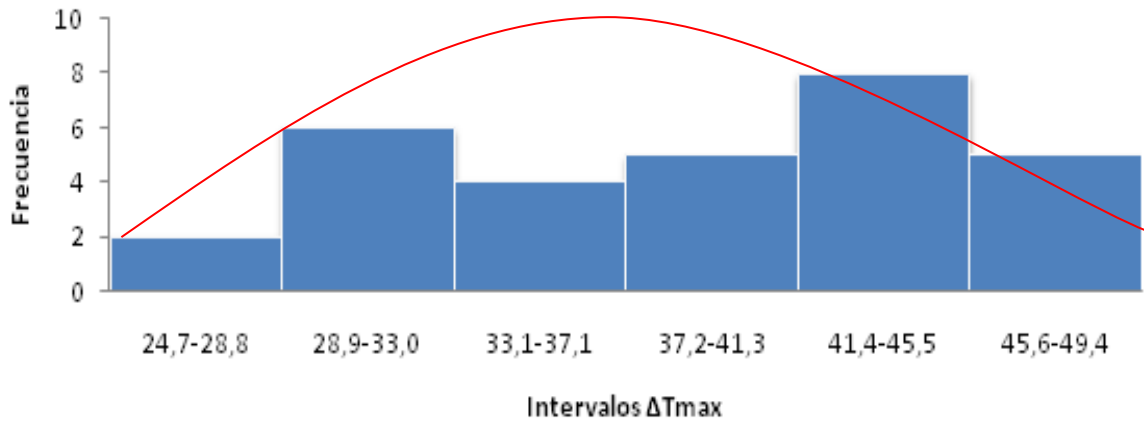
Los intervalos fueron definidos (Tabla 3) y graficados en un histograma (Figura 5) con el fin de representar la distribución de frecuencias.

Tabla 3. Frecuencia de datos divididos en intervalos

Intervalos ΔT_{\max}	Frecuencia
24,7-28,8	2
28,9-33,0	6
33,1-37,1	4
37,2-41,3	5
41,4-45,5	8
45,6-49,4	5

Fuente: Autor

Figura 5. Histograma con intervalos de ΔT_{max} hallados con la Regla de Sturges



Fuente: Autor

En el histograma de la Figura 5 se puede observar que los intervalos de temperatura no se acoplan a una distribución normal por ende se puede decir que los datos siempre están en constante cambio y no precisamente tienden a acercarse a la media, debiéndose esto al cambio en la composición del cemento gracias a la calidad de las materias primas que diariamente llegan a la planta.

Finalmente, el promedio de los datos de cada intervalo (Tabla 4) fue el utilizado para la representación gráfica y búsqueda de la mejor correlación para predecir la resistencia a determinado cambio de temperatura (ΔT_{max}).

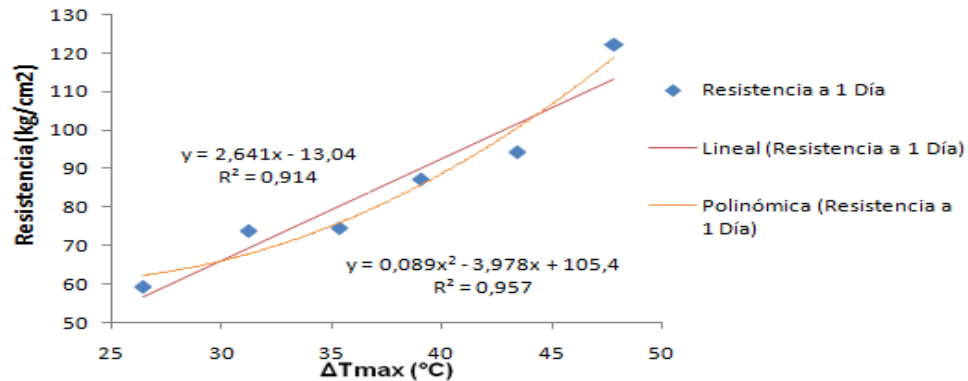
Tabla 4. Promedio de datos para cada intervalo

ΔT_{max} prom	R1prom	R3prom	R7prom	R28prom
26,45	59,397	116,796	134,122	186,684
31,25	74,011	135,278	163,113	204,535
35,375	74,622	140,595	160,880	198,203
39,08	87,306	155,109	185,365	219,347
43,4625	94,385	159,807	179,228	230,207
47,86	122,348	181,979	198,730	251,997

Fuente: Autor

Los datos se relacionaron teniendo en cuenta el coeficiente de determinación de regresiones lineales. Las graficas de correlación entre ΔT_{\max} y Resistencia a la compresión se observan a continuación.

Figura 6. Correlación gráfica de la Resistencia a la compresión a 1 día en función del ΔT_{\max} obtenidos por ensayos calorimétricos

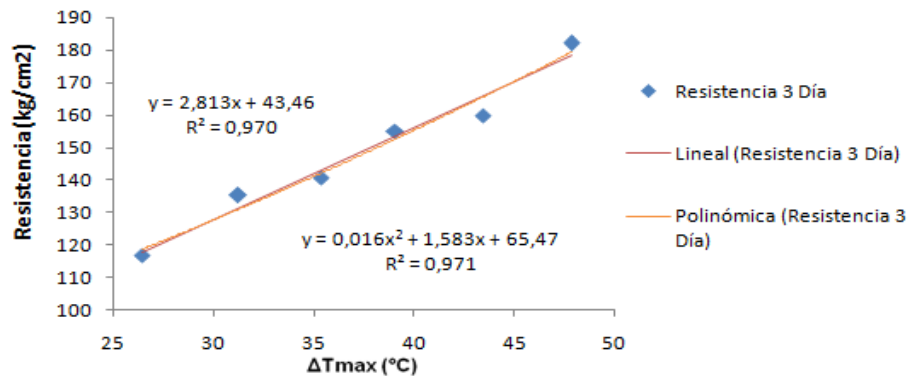


Fuente: Autor

En la figura 6 se graficaron las líneas de tendencias para la curva resultante entre el ΔT_{\max} promedio y resistencia a la compresión promedio a 1 día.

En primer lugar se aplicó una regresión lineal dando un coeficiente de determinación $R^2=0.914$ dando un nivel de confianza aceptable para pronosticar las resistencias con base a los resultados calorimétricos. Luego, se agregó una línea de tendencia polinómica de segundo orden que reflejó un coeficiente mucho mayor al obtenido con la regresión lineal, obteniendo un mejor modelo matemático.

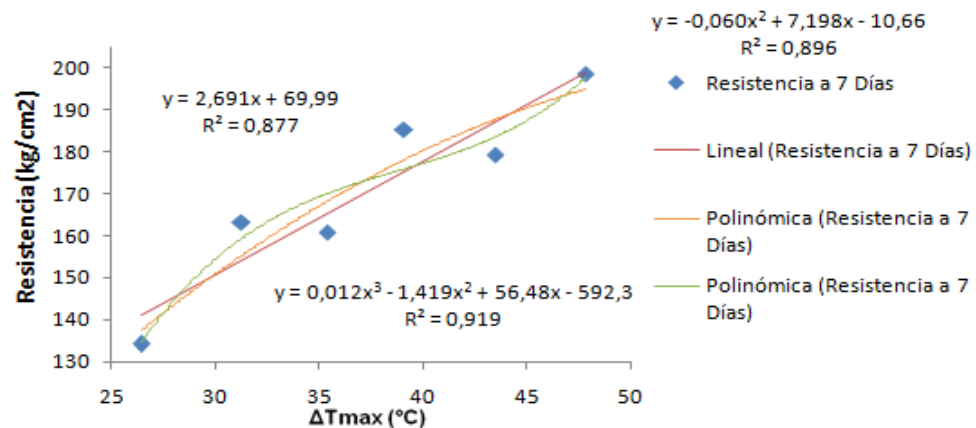
Figura 7. Correlación gráfica de la Resistencia a la compresión a 3 días en función del ΔT_{max} obtenidos por ensayos calorimétricos



Fuente: Autor

La función que mejor muestra la tendencia de la resistencia a la compresión a la edad de 3 días, a partir de los cálculos del ΔT_{max} , es de tipo lineal ya que no se tiene una diferencia significativa en su coeficiente de determinación al compararlo con la ecuación polinómica de segundo orden.

Figura 8. Correlación gráfica de la Resistencia a la compresión a 7 días en función del ΔT_{max} obtenidos por ensayos calorimétricos

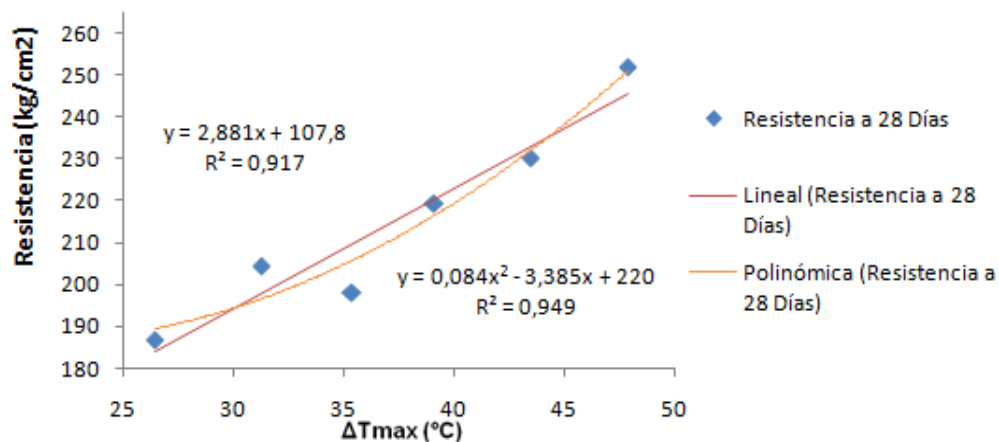


Fuente: Autor

La tendencia que mejor representa la resistencia a la compresión a la edad de 7 días en función del ΔT_{max} es polinómica de tercer grado ya que genera un

coeficiente de determinación mucho mayor con respecto al observado en las líneas de tendencias lineal y polinómica de segundo orden, lo que determina un nivel de confianza alto.

Figura 9. Correlación gráfica de la Resistencia a la compresión a 28 días en función del ΔT_{\max} obtenidos por ensayos calorimétricos



Fuente: Autor

En la figura 9 se puede observar que la ecuación que mejor representa la resistencia a la compresión a la edad de 28 días en función del ΔT_{\max} es polinómica de segundo grado, dando un coeficiente de determinación aceptable en comparación al dado por una regresión lineal.

Finalmente, las expresiones con las que se puede calcular anticipadamente, la resistencia a la compresión a la edad de 1, 3,7 y 28 del cemento portland Tipo I con una evaluación de su historial térmico de mínimo 12 horas son;

- $R_1 = 0,089 \Delta T_{\max}^2 - 3,978 \Delta T_{\max} + 105,4$
- $R_3 = 2,813\Delta T_{\max} + 43,46$
- $R_7 = 0,012 \Delta T_{\max}^3 - 1,419 \Delta T_{\max}^2 + 56,48\Delta T_{\max} - 592,3$
- $R_{28} = 0,084 \Delta T_{\max}^2 - 3,385 \Delta T_{\max} + 220$

Por otro lado, se puede observar en el Anexo E la determinación de unas relaciones lineales con los 30 datos de resistencias a todas las edades y los cambios de temperaturas registradas.

En las estadísticas de la regresión de estas gráficas se identifican coeficientes de determinación más bajos que los obtenidos con el arreglo de datos anterior, pero con la diferencia que estas ecuaciones si abarcan todas las desviaciones y datos obtenidos de cada ensayo.

Resultando como expresiones para la determinación de la resistencia a la compresión en base a cambios en la temperatura máxima registrados en ensayos calorimétricos las siguientes expresiones;

- $R_1 = 2,502\Delta T_{\max} \pm 8,28$
- $R_3 = 2,625\Delta T_{\max} + 50,48$
- $R_7 = 2,262\Delta T_{\max} + 87,03$
- $R_{28} = 2,783\Delta T_{\max} + 111,6$

Cabe resaltar que el presente trabajo es realizado experimentalmente, dando la mejor relación entre los datos con sencillas ecuaciones que pueden ser mejoradas con un estudio más detallado y específico en la parte estadística y evaluación de los datos resultantes..

4. CONCLUSIONES

- Las expresiones lineales realizadas teniendo en cuenta todos los datos tanto de resistencias como de cambio de temperatura máxima pueden proporcionar mejores resultados de resistencia a la compresión porque toma en cuenta todas las desviaciones generando un solo grupo de datos y no varios intervalos como las ecuaciones polinómicas determinadas anteriormente.
- Con la ayuda de las expresiones lineales propuestas con todos los datos obtenidos de los ensayos realizados en este trabajo se puede determinar la resistencia a la compresión a edades de 1, 3, 7 y 28 días para cemento portland Tipo I a partir de cambios de temperatura máxima registrados de ensayos calorimétricos.
- Los modelos planteados son netamente experimentales y son exclusivos para cemento portland tipo I con una masa de cemento de 840g, relación agua/cemento igual a 0,35 y ensayos calorimétricos realizados en calorímetros cilíndricos con recipientes de poliestireno; esto debido a que cada tipo de cemento necesita un modelo específico para predecir la resistencia a la compresión con base en la calorimetría.
- Es necesario realizar más ensayos con el fin de recolectar una mayor cantidad de datos y así tener una mejor certeza de la relación que puede existir entre ellos, para luego verificar las ecuaciones resultantes con una nueva serie de experimentos.

- Los ensayos calorimétricos si contribuyen a determinar la resistencia a la compresión del cemento a diferentes edades en un menor tiempo al usado con la técnica tradicional.

5. RECOMENDACIONES

- Los equipos y materiales antes de las pruebas calorimétricas deben estar completamente secos.
- Los orificios de los calorímetros y recipientes deben ser tan grandes justamente como el grosor de la termocupla evitando cualquier pérdida de calor, se deben cambiar los calorímetros y recipientes con orificios muy grandes, deformaciones o tapas deterioradas.
- Los ensayos deben realizarse en condiciones ambientales estables de laboratorio ($20 \pm 2^\circ\text{C}$) y la temperatura del agua de mezcla debe ser de 23°C .
- Se sugiere revisar como mínimo cada mes la lubricación de la mezcladora, verificar continuamente el estado de la batería del datalogger y terminales de los termopares.
- Se recomienda realizar una experimentación mucho más amplia y continúa para hacerla estadística y experimentalmente más representativa.
- Realizar manuales de protocolo para el desarrollo de la técnica de calorimetría por curado autógeno, especificando los modelos resultantes de dichas pruebas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] PERFETTI del Corral, Mauricio. SILVA Ardila Diego. FREIRE DELGADO, Eduardo Efraín. Estadísticas de Cemento Gris Noviembre 2013.[En línea].DANE Departamento Administrativo Nacional de Estadística. [Fecha de consulta: 30 de Enero de 2014]. Disponible en: http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/Boletin_prensa_Noviembre.pdf

[2] GONZALEZ De La Cotera, M. Características físicas y mecánicas del cemento. Asociación de productores de cemento. ASOCEM. Perú. p. 3, 12.

[3] DÍAZ, Jorge C, BAUTISTA, Luisa, SÁNCHEZ, Adrián, RUÍZ, Daniel. Caracterización de mezclas de concreto utilizadas en sistemas industrializados de construcción de edificaciones. Revista de Ingeniería. Universidad de los Andes, Bogotá 2004.p. 66-67.

[4] NTC 31 [ICONTEC, 1982] “Ingeniería civil y arquitectura. Cemento. Definiciones”

[5] NTC 1362 [ICONTEC, 2003] “Cemento Pórtland Blanco

[6] BLANCO, Francisco. Propiedades de los cementos. [En línea]. Universidad de Oviedo. España. [Fecha de consulta: 10 de Enero de 2014]. Disponible en: <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion6.PropiedadesCEMENTOS.pdf>

[7] RODRIGUEZ, Laura Catalina. Aplicación de la calorimetría para la determinación de la madurez y las resistencias del cemento. Trabajo de grado. Bogotá. Universidad de América. Facultad de Ingeniería Química, 2002.

[8] BLANCO, Francisco. Hidratación del cemento portland. [En línea] Universidad de Oviedo. España. [Fecha de consulta: 08 de Enero de 2014]. Disponible: <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion7.HidratacionCEMENTO.pdf>

[9] NTC 112 [ICONTEC, 2009] “Mezcla mecánica de pastas de cemento hidráulico y morteros de consistencia plástica”

[10] NTC 220 [ICONTEC, 2004] “Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50mm o 50,8mm de lado”

[11] HARMSEN, Teodoro E. Diseño de estructuras de concreto 4ta ed., Fondo editorial de la pontificia Universidad Católica, Perú 2005, p. 18

[12] NEWMAN John. CHOO Ban Seng Advanced Concrete Technology. Concrete Properties. Bryan Marsh. Research and Development, London. Curing. Elsevier Ltd. 2003.

[13] CEMEX Colombia. Método de calorimetría para pastas de cemento con adición de aditivo TDAJ de Grace.

[14] LLINÁS, Humberto, ROJAS, Carlos. Estadística descriptiva y distribuciones de probabilidad. Ediciones Uninorte, 2006. p 16, 48

[15] Análisis de regresión lineal: El procedimiento Regresión Lineal. [En línea] Universidad Complutense. Madrid [Fecha de consulta: 15 de Enero de 2014]. Disponible: http://pendientedemigracion.ucm.es/info/socivmyt/paginas/D_departamento/materiales/analisis_datosyMultivariable/18reglin_SPSS.pdf

[16] Métodos de Análisis de datos en Ecología. Prácticas de Ecología. Licenciatura de Biología y Ciencias Ambientales. [En línea] Universidad de Alcalá. Madrid - España. [Fecha de consulta: 16 de Enero de 2014]. Disponible en: <http://www.uah.es/>

[17] FRITZ, Keil. Cemento-Fabricación-Propiedades-Aplicaciones. Editores Técnicos Asociados S.A. España 1973. P. 110-112,159.

[18] NTC 3512[ICONTEC, 2009] “Cementos. Cuartos de mezclado, cámaras y cuartos húmedos y tanques para el almacenamiento de agua, empleados en los ensayos de cementos hidráulicos y concretos.

[19] NTC 321[ICONTEC, 1982]. “Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento pórtland. Especificaciones Químicas”.

[20] NTC 121[ICONTEC, 1982] “Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Pórtland. Especificaciones Físicas y Mecánicas”.

[21] NTC 111[ICONTEC, 2008] “Especificaciones para la mesa de flujo usada en ensayos de cementos hidráulico”

[22] NTC 110[ICONTEC, 2008]. “Método para determinar la consistencia normal del cemento hidráulico”.

[23] VILLANUEVA, Hope R. CARRASQUILLO, Ramon L. The effect of fly ash on temperature and rise hydration in portland cement concrete. Informe de investigación. Universidad de Texas. Austin. P. 14.

BIBLIOGRAFÍA

Análisis de regresión lineal: El procedimiento Regresión Lineal. [En línea] Universidad Complutense. Madrid [Fecha de consulta: 15 de Enero de 2014]. Disponible:

http://pendientedemigracion.ucm.es/info/socivmyt/paginas/D_departamento/materiales/analisis_datosyMultivariable/18reglin_SPSS.pdf

BLANCO, Francisco. Hidratación del cemento portland. [En línea] Universidad de Oviedo. España. [Fecha de consulta: 08 de Enero de 2014]. Disponible: <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion7.HidratacionCEMENTO.pdf>

BLANCO, Francisco. Propiedades de los cementos. [En línea]. Universidad de Oviedo. España. [Fecha de consulta: 10 de Enero de 2014]. Disponible en: <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion6.PropiedadesCEMENTOS.pdf>

CEMEX Colombia. Método de calorimetría para pastas de cemento con adición de aditivo TDAJ de Grace.

DÍAZ, Jorge C, BAUTISTA, Luisa, SÁNCHEZ, Adrián, RUÍZ, Daniel. Caracterización de mezclas de concreto utilizadas en sistemas industrializados de construcción de edificaciones. Revista de Ingeniería. Universidad de los Andes, Bogotá 2004.p. 66-67.

FRITZ, Keil. Cemento-Fabricación-Propiedades-Aplicaciones. Editores Técnicos Asociados S.A. España 1973. P. 110-112,159.

GONZALEZ De La Coteria, M. Características físicas y mecánicas del cemento. Asociación de productores de cemento. ASOCEM. Perú. p. 3, 12.

HARMSEN, Teodoro E. Diseño de estructuras de concreto 4ta ed., Fondo editorial de la pontificia Universidad Católica, Perú 2005, p. 18

LLINÁS, Humberto, ROJAS, Carlos. Estadística descriptiva y distribuciones de probabilidad. Ediciones Uninorte, 2006. p 16, 48

Métodos de Análisis de datos en Ecología. Prácticas de Ecología. Licenciatura de Biología y Ciencias Ambientales. [En línea] Universidad de Alcalá. Madrid - España. [Fecha de consulta: 16 de Enero de 2014]. Disponible en: <http://www.uah.es/>

NEWMAN John. CHOO Ban Seng Advanced Concrete Technology. Concrete Properties. Bryan Marsh. Research and Development, London. Curing. Elsevier Ltd. 2003.

NTC 110 [ICONTEC, 2008]. “Método para determinar la consistencia normal del cemento hidráulico”.

NTC 111 [ICONTEC, 2008] “Especificaciones para la mesa de flujo usada en ensayos de cementos hidráulico”

NTC 112 [ICONTEC, 2009] “Mezcla mecánica de pastas de cemento hidráulico y morteros de consistencia plástica”

NTC 121 [ICONTEC, 1982] “Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento Pórtland. Especificaciones Físicas y Mecánicas”.

NTC 1362 [ICONTEC, 2003] “Cemento Pórtland Blanco

NTC 220 [ICONTEC, 2004] “Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico usando cubos de 50mm o 50,8mm de lado”

NTC 31 [ICONTEC, 1982] “Ingeniería civil y arquitectura. Cemento. Definiciones”

NTC 321[ICONTEC, 1982]. “Ingeniería Civil y Arquitectura. Cemento pórtland. Especificaciones Químicas”.

NTC 3512[ICONTEC, 2009] “Cementos. Cuartos de mezclado, cámaras y cuartos húmedos y tanques para el almacenamiento de agua, empleados en los ensayos de cementos hidráulicos y concretos.

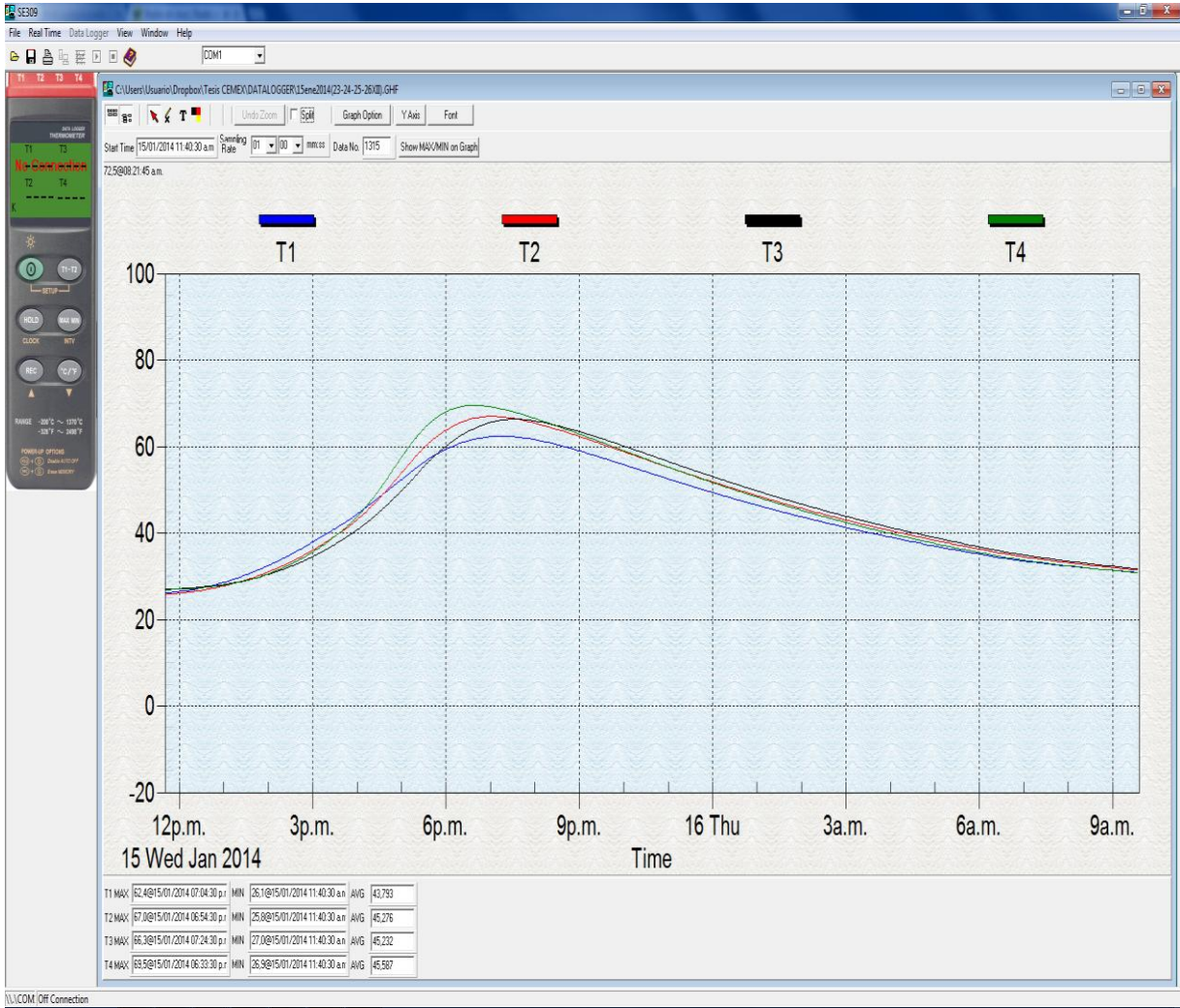
PERFETTI del Corral, Mauricio. SILVA Ardila Diego. FREIRE DELGADO, Eduardo Efraín. Estadísticas de Cemento Gris Noviembre 2013.[En línea].DANE Departamento Administrativo Nacional de Estadística. [Fecha de consulta: 30 de Enero de 2014]. Disponible en: http://www.dane.gov.co/files/investigaciones/Boletin_prensa_Noviembre.pdf

RODRIGUEZ, Laura Catalina. Aplicación de la calorimetría para la determinación de la madurez y las resistencias del cemento. Trabajo de grado. Bogotá. Universidad de América. Facultad de Ingeniería Química, 2002.

VILLANUEVA, Hope R. CARRASQUILLO, Ramon L. The effect of fly ash on temperature and rise hydration in portland cement concrete. Informe de investigación. Universidad de Texas. Austin. P. 14.

ANEXOS

Anexo A. Ilustración de la grafica Temperatura vs Tiempo



Fuente: Software Datalogger tecpel 319

Anexo B. Resultados de ensayos de resistencia a la compresión a 1, 3, 7 y 28 días. [kg/cm²]

FECHA	DIA 1		DIA 3		DIA 7		DIA 28		
29XI	78.988	82.631	130.073	144.584	148.217	156.411	161.825	203.720	206.547
30XI	74.051	73.051	135.099	131.831	169.825	171.481	208.986	200.598	189.575
01XII	63.391	66.663	129.782	129.148	149.191	154.361	205.035	203.280	211.717
02XII	73.726	70.034	132.317	146.645	164.752	184.930	241.610	224.170	211.190
03XII	52.916	54.619	109.297	98.958	112.271	120.663	176.120	158.290	165.660
04XII	68.226	77.279	144.850	152.021	146.557	176.164	174.180	222.230	204.790
05XII	73.527	76.181	136.852	121.686	141.779	153.483	202.743	208.985	195.670
06XII	74.349	64.728	112.117	130.416	142.561	155.681	187.430	205.865	183.283
07XII	75.382	76.338	147.584	144.901	173.384	168.604	208.302	221.096	224.885
08XII	64.953	69.264	122.370	129.389	174.472	150.022	172.065	209.083	-
09XII	82.492	83.631	159.142	157.483	178.015	196.697	231.128	214.985	228.300
10XII	90.321	82.255	157.387	137.683	185.186	188.362	247.405	219.685	216.691
11XII	121.296	117.637	171.500	172.320	201.135	195.381	240.189	259.805	236.249
12XII	94.057	105.738	169.620	171.236	183.177	179.137	247.906	222.984	238.393
13XII	70.490	75.780	141.390	127.344	136.170	155.191	174.797	201.817	149.632
14XII	91.407	91.054	147.241	156.655	126.075	174.505	231.762	216.204	233.712
15XII	78.882	75.188	139.292	131.979	170.604	161.240	187.479	201.719	174.067
16XII	111.055	115.004	168.018	171.676	191.380	191.379	238.298	242.540	240.785
17XII	101.299	107.930	188.209	178.991	211.374	176.406	274.824	263.462	272.716
18XII	121.831	128.270	200.352	194.890	209.328	214.360	261,609	232,788	249,661
19XII	128.172	129.977	198.060	184.015	211.755	212.206	276,583	245,417	225,521
20XII	133.535	133.537	176.552	154.899	217.133	138.219	273,948	223,569	243,612
21XII	81.955	85.154	147.094	153.435	147.876	189.037	227,567	211,474	205,450
22XII	85.624	89.037	161.386	170.067	201.768	191.086	243,029	251,904	248,833
23XII	81.786	95.486	157.876	143.682	195.690	206.920	204,156	214,691	212,204
24XII	89.385	94.566	153.581	147.242	183.090	160.230	218,643	207,913	200,354
25XII	102.907	97.037	168.504	177.772	189.290	200.140	231,763	240,980	234,884
26XII	105.496	107.446	171.237	171.777	186.893	188.013	240,588	222,238	220,934
27XII	84.853	92.724	178.250	-	189.157	184.453	222,398	217,620	246,979
28XII	76.720	78.080	134.460	142.600	179.723	176.894	233,176	273,120	224,642

Fuente: Autor

Anexo C. Resultados de ensayos de calorimetría [°C]

FECHA	To	Tmax	ΔT_{\max}
29XI	26.3	57	30.7
30XI	25.2	55.4	30.2
01XII	25.3	50	24.7
02XII	24	55.1	31.1
03XII	24	52.2	28.2
04XII	24.2	58.4	34.2
05XII	24	54.3	30.3
06XII	23.4	56.7	33.3
07XII	25.2	57.6	32.4
08XII	25.4	58.2	32.8
09XII	25.5	62.4	36.9
10XII	25.5	67.6	42.1
11XII	26	73.5	47.5
12XII	25.2	70	44.8
13XII	25.2	62.3	37.1
14XII	26.2	67.6	41.4
15XII	27.7	65.9	38.2
16XII	28.2	73.4	45.2
17XII	28	77.4	49.4
18XII	28.3	76.6	48.3
19XII	28.2	74.9	46.7
20XII	28.1	75.5	47.4
21XII	28.8	69.8	41
22XII	25.4	62.9	37.5
23XII	24.3	62.4	38.1
24XII	23.9	67	43.1
25XII	25.7	66.3	40.6
26XII	25.8	69.5	43.7
27XII	24.8	67.2	42.4
28XII	24.7	69.7	45

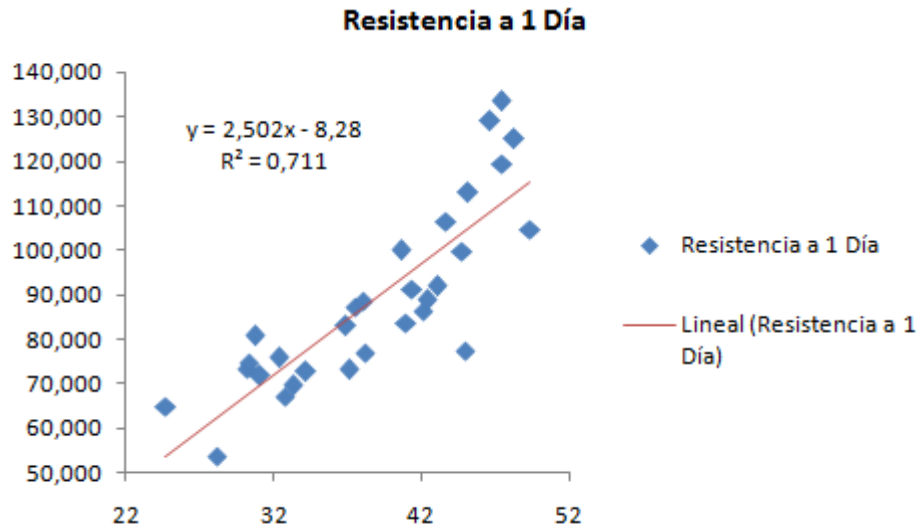
Fuente: Autor

Anexo D. Datos de resistencia a 1, 3, 7 y 28 días organizados por intervalos

INTERVALOS	R1	R3	R7	R28	ΔT_{max}
1	65,027	129,465	151,776	206,677	24,7
	53,768	104,128	116,467	166,690	28,2
2	73,551	133,465	170,653	199,720	30,2
	74,854	129,269	147,631	202,466	30,3
	80,810	137,329	152,314	190,697	30,7
	71,880	139,481	174,841	225,657	31,1
	75,860	146,243	170,994	218,094	32,4
	67,109	125,880	162,247	190,574	32,8
3	69,539	121,267	149,121	192,193	33,3
	72,753	148,436	161,361	200,400	34,2
	83,062	158,313	187,356	224,804	36,9
	73,135	134,367	145,681	175,415	37,1
4	87,331	165,727	196,427	247,922	37,5
	88,636	150,779	201,305	210,350	38,1
	77,035	135,636	165,922	187,755	38,2
	99,972	173,138	194,715	235,876	40,6
	83,555	150,265	168,457	214,830	41
5	91,231	151,948	150,290	227,226	41,4
	86,288	147,535	186,774	227,927	42,1
	88,789	178,250	186,805	228,999	42,4
	91,976	150,412	171,660	208,970	43,1
	106,471	171,507	187,453	227,920	43,7
	99,898	170,428	181,157	236,428	44,8
	77,400	138,530	178,309	243,646	45
	113,030	169,847	191,380	240,541	45,2
6	129,075	191,038	211,981	249,174	46,7
	133,536	165,726	177,676	247,043	47,4
	119,467	171,910	198,258	245,414	47,5
	125,051	197,621	211,844	248,019	48,3
	104,615	183,600	193,890	270,334	49,4
Total de Muestras	30	30	30	30	30
Promedio	88,823	152,384	174,825	219,725	38,810
Mínimo	53,768	104,128	116,467	166,690	24,7
Máximo	133,536	197,621	211,981	270,334	49,4
Desviación Estándar	20,094	22,033	21,941	24,937	6,774

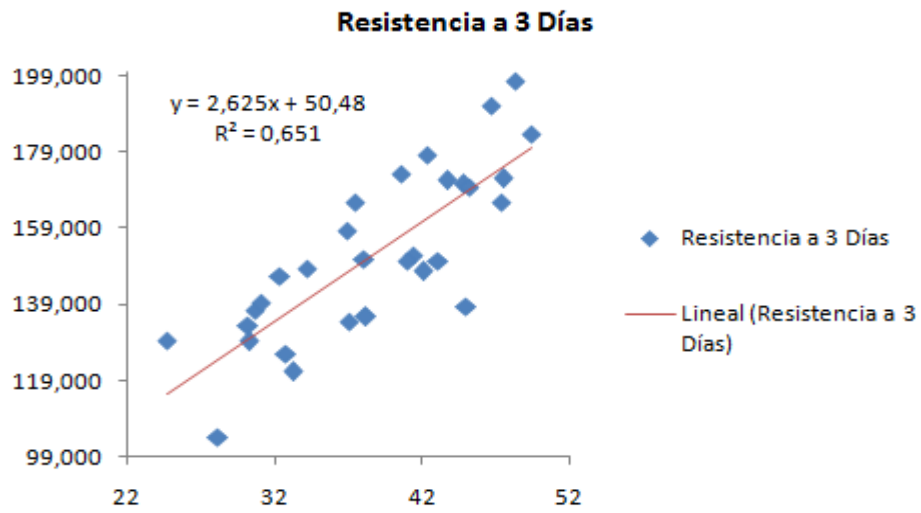
Fuente: Autor

Anexo E. Relaciones lineales con los datos obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión a diferentes edades y los cambios de temperaturas registradas en los ensayos calorimétricos



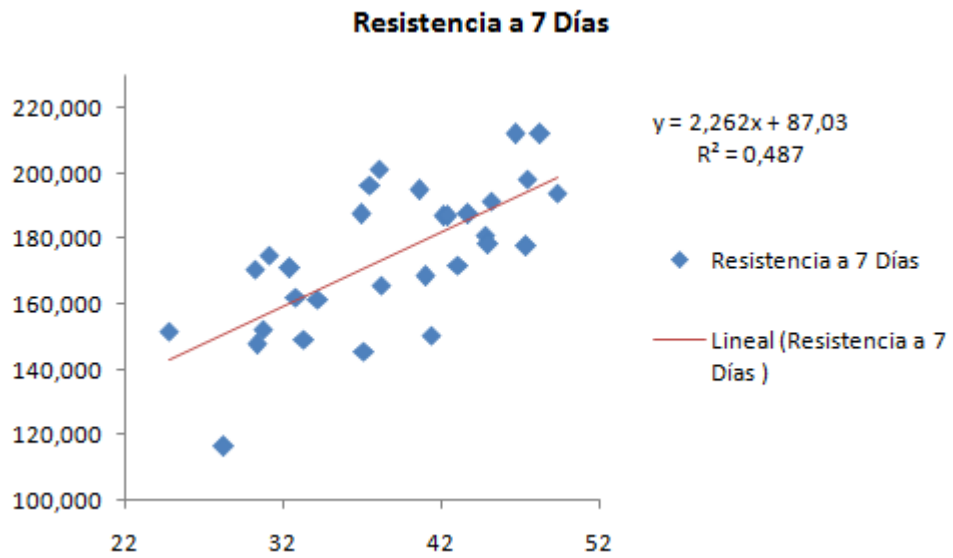
Estadísticas de la regresión

Coeficiente de correlación	
múltiple	0,84351175
Coeficiente de determinación	
R ²	0,71151208
R ² ajustado	0,70120893
Error típico	10,9840894
Observaciones	30



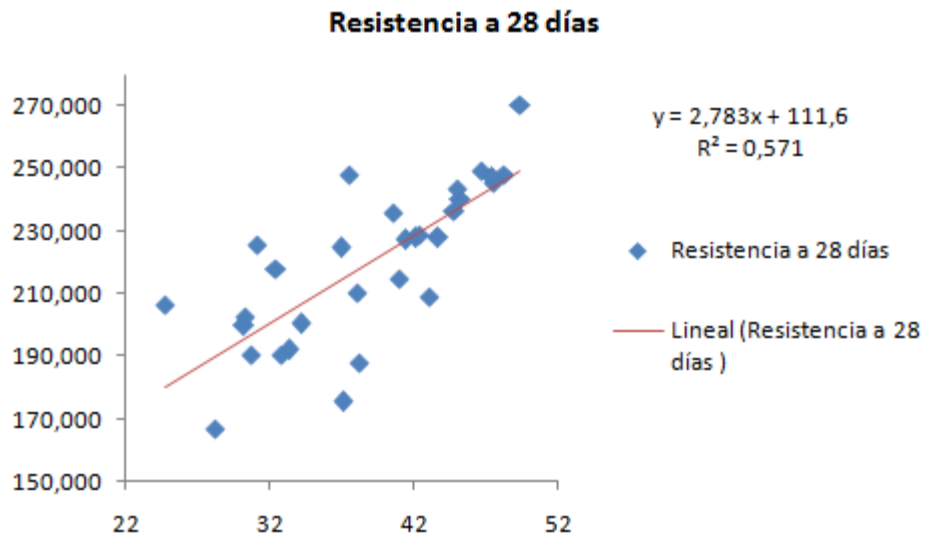
Estadísticas de la regresión

Coeficiente de correlación múltiple		0,80731594
Coeficiente de determinación R^2		0,65175902
R^2 ajustado		0,63932184
Error típico		13,2324296
Observaciones		30



Estadísticas de la regresión

Coeficiente de correlación	
múltiple	0,69842892
Coeficiente de determinación	
R ²	0,48780296
R ² ajustado	0,46951021
Error típico	15,9806704
Observaciones	30



Estadísticas de la regresión

Coeficiente de correlación	
múltiple	0,75624887
Coeficiente de determinación	
R ²	0,57191236
R ² ajustado	0,55662351
Error típico	16,6047382
Observaciones	30
