



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE
FACULTAD DE INGENIERIA

PROYECTO INTEGRADOR PROFESIONAL
CARRERA INGENIERÍA CIVIL

“ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE MAMPUESTOS DE HORMIGÓN CON
INCORPORACIÓN DE CAUCHO RECICLADO”

Autor: PERALTA VIZCARRA, RODRIGO BALTAZAR

Directora de proyecto: DRA. ADRIANA PERNICH

Neuquén- Argentina

2020

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados de ensayos a compresión simple y medición de calor específicos realizados a mampuestos con inclusión de caucho reciclado. Para este propósito se desarrollaron mezclas con distintas dosificaciones partiendo de una sin incorporación de caucho y luego variando el porcentaje de reemplazo del agregado fino por partículas de caucho reciclado proveniente de Neumáticos Fuera de Uso (NFU) de un mismo rango granulométrico.

Para los ensayos a compresión fueron preparados un total de 12 mampuestos considerando los parámetros de presión, tiempo de vibración y frecuencia: 3 de Hormigón simple (HS) que sirven de control; 3 de Hormigón con Caucho Reciclado (HCR): con 10% de reemplazo en volumen de agregado fino por partículas de caucho, 3 de HCR con 25% y 3 de HCR con 50%. Luego de 28 días de curado fueron ensayados utilizando como guía la Norma ASTM C140/C140 -17a.

En cuanto a la medición del calor específico, se prepararon 9 muestras respetando los mismos parámetros que en los mampuestos: 5 de HS y 4 de HCR con 50% de reemplazo en volumen de agregado fino por partículas de caucho. Los ensayos se realizaron a partir de un modelo matemático considerando un calorímetro adiabático.

Palabras clave: Compresión simple, calor específico, caucho reciclado, NFU, calorímetro.

ABSTRACT

This work presents the results of simple compression and specific heat measurement tests performed on bricks with recycled rubber. For this purpose, mixtures with different dosages were developed starting from one without rubber addition and varying the percentage of replacement of the fine aggregates by recycled rubber particles from out-of-use tires (NFU) of the same granulometric range.

For simple compression tests, a total of 12 bricks were prepared considering the parameters of pressure, vibration time and frequency: 3 of Simple Concrete (HS) serving as control samples, 3 of Recycled Rubber Concrete (HCR) with 10% of fine aggregate replacement by volume with rubber particles, 3 of HCR with 25% and 3 of HCR with 50%. After 28 days of curing, they were tested using ASTM C140/C140 -17a as a guide.

As for the specific heat measurement, 9 samples were prepared respecting the same parameters as in the bricks: 5 of HS and 4 of HCR with 50% replacement by volume of fine aggregate with rubber particles. The tests are made from a mathematical model considering an adiabatic calorimeter.

Keywords: Simple compression test, specific heat, recycled rubber, NFU, calorimeter.

RECONOCIMIENTOS Y DEDICATORIAS

A Adriana Pernich y Omar Cortes por su ayuda, acompañamiento y consejo durante todo el proyecto.

A Federico Contreras, Guillermo Martin, Guillermo Davies, Mónica Zalazar, Abel Maldonado, Susana Ramos, Pablo Bazaes, Armando Guillermet, Edgardo Santarelli, Pedro Sosa, Lizardo Herrera, Hugo Vivanco, Said Namor, Ricardo Lomurno y Caleb por su predisposición y ayuda en distintas etapas del proyecto.

A mis padres Gladys y Carlos, a mis hermanos Gaspar y Emmanuel y a mis abuelos a quienes dedico este trabajo por su apoyo constante.

INDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	OBJETIVOS.....	1
1.2	FUNDAMENTOS.....	1
1.3	METODOLOGÍA	3
1.3.1	AMBITO DE DESARROLLO.....	3
1.3.2	ACTIVIDADES ESPECÍFICAS	3
2	ANTECEDENTES	5
	PARTE I: RESISTENCIA A COMPRESIÓN	6
3	MATERIALES Y EQUIPAMIENTO.....	7
3.1.1	MATERIALES	7
3.1.2	EQUIPAMIENTO	9
4	DOSIFICACIÓN.....	10
4.1	PROCESO DE DOSIFICACIÓN	10
4.2	PROCESO DE PRODUCCIÓN.....	13
5	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	14
5.1	APARIENCIA Y ESTABILIDAD GEOMÉTRICA.....	14
5.2	DENSIDAD	15
5.3	RESISTENCIA A COMPRESIÓN.....	15
	PARTE II: CALOR ESPECÍFICO.....	18
6	PRODUCCIÓN DE MUESTRAS	19
7	DEFINICIONES.....	20
7.1.1	CAPACIDAD TERMICA Y CALOR ESPECÍFICO	20
7.1.2	CALORIMETRIA	20
7.1.3	EQUIVALENTE EN AGUA.....	21
8	MODELOS MATEMÁTICOS Y METODOLOGÍA DE ENSAYO	22
8.1	EQUIVALENTE EN AGUA DEL CALORÍMETRO	22
8.1.1	MODELO MATEMÁTICO	22
8.1.2	METODOLOGÍA DE ENSAYO	23
8.2	CALOR ESPECÍFICO.....	23

8.2.1	MODELO MATEMATICO	23
8.2.2	METODOLOGÍA DE ENSAYO	24
9	ENSAYOS.....	25
9.1	MEDICIÓN DEL EQUIVALENTE EN AGUA DEL CALORÍMETRO Y EXPRESIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN.....	25
9.2	MEDICIÓN DEL CALOR ESPECÍFICO Y EXPRESIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN.....	27
9.2.1	MUESTRAS DE HORMIGÓN SIMPLE.....	28
9.2.2	MUESTRAS DE HORMIGÓN CON CAUCHO RECICLADO.....	31
10	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
11	CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO	38
11.1	CONCLUSIONES	38
11.2	TRABAJOS A FUTURO.....	39
12	ANEXO 1: ANALISIS GRANULOMÉTRICO.....	40
13	ANEXO 2: PROCESO DE DOSIFICACIÓN.....	42
14	ANEXO 3: MEDICION DEL EQUIVALENTE EN AGUA DEL CALORIMETRO	43
15	ANEXO 4: ECUACIÓN DE INCERTIDUMBRE COMBINADA	48
16	ANEXO 5: MEDICION DEL CALOR ESPECÍFICO.....	50
	BIBLIOGRAFÍA	62

INDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Características del equipamiento.	9
Tabla 4.1: Valores límite para el levantamiento manual de cagas para tareas <2horas al día con <=60 levantamientos por hora o > 2 horas al día con <12 levantamientos/hora.	11
Tabla 4.2: Parámetros de producción de mampuestos.....	12
Tabla 4.3: Cantidad de material necesaria por mampuesto para cada dosificación.....	12
Tabla 4.4: Dimensiones y peso de mampuestos.	13
Tabla 9.1: Magnitudes de entrada y mensurando: Equivalente en agua del calorímetro.	25
Tabla 9.2: Incertidumbre por resolución.....	25
Tabla 9.3: Coeficientes de sensibilidad.	27
Tabla 9.4: Incertidumbre combinada.	27
Tabla 9.5: Magnitudes de entrada y mensurando: Calor específico.	28
Tabla 9.6: Incertidumbre por resolución.....	28
Tabla 9.7: Coeficientes de sensibilidad.	30
Tabla 9.8: Incertidumbre combinada.	31
Tabla 9.9: Magnitudes de entrada y mensurando: Calor específico.	32
Tabla 9.10: Incertidumbre por resolución.....	32
Tabla 9.11: Coeficientes de sensibilidad.	34
Tabla 9.12: Incertidumbre combinada.	35
Tabla 10.1: Pérdida de material.	36
Tabla 10.2: Calor específico de hormigón, arena y caucho de distintas fuentes.	37
Tabla 12.1: Análisis granulométrico de agregado fino.....	40
Tabla 12.2: Análisis granulométrico de agregado grueso.....	41
Tabla 12.3: Análisis granulométrico de caucho reciclado.....	41

INDICE DE FIGURAS

Figura 3.1: Gráfico de Análisis granulométrico.	8
Figura 4.1: Fotos a) Mampuesto de HS, b) Mampuesto de HCR50.	13
Figura 5.1: Foto de segregación de partículas por exceso de vibración.	14
Figura 5.2: Gráfico de densidad vs % de caucho reciclado.	15
Figura 5.3: a) Foto de mampuesto encabezado, b) Foto de configuración del cabezal de prensa.	16
Figura 5.4: Gráfico de resultados de ensayos a compresión a 28 días.	16
Figura 5.5: Gráfico de resistencia a compresión promedio vs % de caucho.	17
Figura 5.6: Fotos de rotura típica de bloque: a) Cumpliendo requisito normativo; b) Altura/Ancho<0,5.	17
Figura 6.1: Foto de muestras para medición de calor específico.	19
Figura 10.1: Foto de burbujas adheridas a una muestra.	36
Figura 13.1: Esquema de proceso de dosificación.	42
Figura 14.1: Gráfico de ensayo N°1- Tf, Tc, Tiempo.	43
Figura 14.2: Gráfico de ensayo N°2- Tf, Tc, Tiempo.	44
Figura 14.3: Gráfico de ensayo N°3- Tf, Tc, Tiempo.	44
Figura 14.4: Gráfico de ensayo N°4- Tf, Tc, Tiempo.	45
Figura 14.5: Gráfico de ensayo N°5- Tf, Tc, Tiempo.	45
Figura 14.6: Gráfico de ensayo N°6- Tf, Tc, Tiempo.	46
Figura 14.7: Gráfico de ensayo N°7- Tf, Tc, Tiempo.	46
Figura 14.8: Gráfico de ensayo N°8- Tf, Tc, Tiempo.	47
Figura 16.1: Gráfico de ensayo HS 1.1- Tf, Tc, Tiempo.	50
Figura 16.2: Gráfico de ensayo HS 1.2- Tf, Tc, Tiempo.	51
Figura 16.3: Gráfico de ensayo HS 2.1- Tf, Tc, Tiempo.	51
Figura 16.4: Gráfico de ensayo HS 2.2- Tf, Tc, Tiempo.	52
Figura 16.5: Gráfico de ensayo HS 3.1- Tf, Tc, Tiempo.	52
Figura 16.6: Gráfico de ensayo HS 3.2- Tf, Tc, Tiempo.	53
Figura 16.7: Gráfico de ensayo HS 4.1- Tf, Tc, Tiempo.	53
Figura 16.8: Gráfico de ensayo HS 4.2- Tf, Tc, Tiempo.	54
Figura 16.9: Gráfico de ensayo HS 5.1- Tf, Tc, Tiempo.	54

Figura 16.10: Gráfico de ensayo HS 5.2- Tf, Tc, Tiempo.....	55
Figura 16.11: Gráfico de ensayo HCR 1.1- Tf, Tc, Tiempo.....	55
Figura 16.12: Gráfico de ensayo HCR 1.2- Tf, Tc, Tiempo.....	56
Figura 16.13: Gráfico de ensayo HCR 1.3- Tf, Tc, Tiempo.....	56
Figura 16.14: Gráfico de ensayo HCR 2.1- Tf, Tc, Tiempo.....	57
Figura 16.15: Gráfico de ensayo HCR 2.2- Tf, Tc, Tiempo.....	57
Figura 16.16: Gráfico de ensayo HCR 2.3- Tf, Tc, Tiempo.....	58
Figura 16.17: Gráfico de ensayo HCR 3.1- Tf, Tc, Tiempo.....	58
Figura 16.18: Gráfico de ensayo HCR 3.2- Tf, Tc, Tiempo.....	59
Figura 16.19: Gráfico de ensayo HCR 3.3- Tf, Tc, Tiempo.....	59
Figura 16.20: Gráfico de ensayo HCR 4.1- Tf, Tc, Tiempo.....	60
Figura 16.21: Gráfico de ensayo HCR 4.2- Tf, Tc, Tiempo.....	60
Figura 16.22: Gráfico de ensayo HCR 4.3- Tf, Tc, Tiempo.....	61
Figura 16.23: Gráfico de calor específico de muestras HCR y HS.	61

1 INTRODUCCIÓN

1.1 OBJETIVOS

El presente trabajo tiene como principal objetivo analizar la influencia de la incorporación de partículas de caucho provenientes de NFU (Neumáticos Fuera de Uso) en el calor específico y en la resistencia a compresión de mampuestos de hormigón.

En particular se pretende: i) Elaborar mampuestos macizos con distintos porcentajes de reemplazo de agregado fino por caucho molido proveniente de NFU; ii) Ensayar a compresión los mampuestos, utilizando como guía la norma ASTM C140/C140 -17a (ASTM International, 2017) iii) Determinar el porcentaje de reemplazo de agregado fino por caucho molido, que represente el límite para la elaboración de mampuestos portantes y no portantes, según la norma ASTM C 90-03 (ASTM International, 2003a).

1.2 FUNDAMENTOS

Debido al incremento de la cantidad de automóviles a nivel mundial, la acumulación de grandes volúmenes de neumáticos fuera de uso (NFU) se ha convertido en un gran problema en lo referente al manejo de residuos (Khatib, 2009). Se estima que a nivel mundial, cada año llegan al final de su vida útil 1000 millones de neumáticos y que para el año 2030 el número puede aumentar a 1200 millones (Thomas, Gupta, Kalla, & Cseteneyi, 2014). En particular, en Argentina la generación de NFU supera las 100.000 toneladas anuales (J.M., 2010). Usualmente los neumáticos han sido apilados o ilegalmente desechados; ninguna representa una solución a largo plazo y por el contrario son fuente potencial de otros problemas:

- i) Proveen condiciones favorables de temperatura y humedad para la proliferación de mosquitos y roedores (“Regomax,” n.d.), y
- ii) En caso de incendiarse, dependiendo de las características del acopio puede resultar difícil o imposible la extinción lo cual expone al medio ambiente y en particular a las personas a gases tóxicos.

Otra problemática que está creciendo a nivel mundial es la referida a la utilización de los recursos naturales. Uno de los materiales más utilizados en el mundo es el hormigón, el cual consume grandes cantidades de recursos naturales. La extracción de agregados de lechos de ríos, lagos y otros cuerpos de agua durante períodos prolongados de tiempo han resultado en enormes problemas ambientales (Ako et al., 2014), (Boudaghpour & Monfared, 2008) y algunas fuentes de estos recursos están agotándose gradualmente.

Es por eso que durante las últimas dos décadas ha crecido de manera sostenida el interés en investigar las propiedades y usos potenciales del caucho en el hormigón (Najim & Hall, 2010). Existen investigaciones al respecto que muestran que el reemplazo parcial de agregados minerales por caucho reciclado reduce la resistencia a compresión (Ghaly & Cahill IV, 2005), (Ganjian, Khorami, & Maghsoudi, 2009), (Rahul Chaudhary¹ & Tapeswar Kalra², 2017), (Benítez, Polzinetti, & Agnello, 2013). Sin embargo algunos estudios recientes han mostrado resultados que justifican el uso potencial del hormigón con caucho para uso estructural, con resistencias cercanas a 40MPa (Thomas et al., 2014), (Li, Ruan, & Zeng, 2014).

Por otro lado, considerando que los agregados ocupan aproximadamente el 75% del volumen del hormigón (O.A. Cabrera, A. Di Maio, C. Zega, 2012), es correcto pensar que el reemplazo de agregados pétreos por caucho redundará en una variación de otras propiedades además de las mecánicas. En particular, la capacidad calorífica del hormigón con incorporación de caucho debería ser mayor que en un hormigón simple debido al mayor calor específico del caucho de neumáticos (Yang, Tanguy, & Roy, 1995).

Considerando lo expuesto en los párrafos anteriores, puede suponerse que el uso de partículas de caucho desechado incorporadas al hormigón, es beneficioso por tres razones: Permitiría reducir la demanda de recursos naturales para la producción de mampuestos de hormigón, representaría una solución a la disposición de una porción de este desecho y podría permitir la producción de elementos estructurales con otras características respecto de su comportamiento térmico.

1.3 METODOLOGÍA

1.3.1 AMBITO DE DESARROLLO

El PIP fue desarrollado en el laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional del Comahue.

1.3.2 ACTIVIDADES ESPECÍFICAS

- 1) Búsqueda y análisis de bibliografía referida a la elaboración de hormigón con incorporación de caucho reciclado y ensayos de compresión y propiedades térmicas de mampostería: Investigaciones y normas internacionales y nacionales.
- 2) Evaluación de la necesidad y adaptación y/o desarrollo de equipos para ensayo de compresión y medición de calor específico de mampuestos.
- 3) Búsqueda de proveedores de caucho reciclado: Empresas nacionales preferentemente.
- 4) Diseño de mezclas y elección de geometría y cantidad de mampuestos a elaborar: Como no existe una metodología específica para hormigones con caucho, se utilizará la información de las publicaciones analizadas como base para las dosificaciones. En cuanto a la geometría, su elección será en base a consideraciones ergonómicas y/o prácticas para los ensayos; es posible que sea necesario construir moldes para las medidas elegidas. Por último, la cantidad de mampuestos se determinará de tal manera que pueda contarse con una base estadística que de sustento a los resultados.
- 5) Elaboración de mampuestos: Se realizará con los equipos disponibles. Se contempla en esta actividad el curado de los mampuestos.
- 6) Ensayo a compresión de los mampuestos: Se realizará en el laboratorio de Ingeniería Civil, con la prensa disponible. Se considerará la metodología de ensayo determinada en la actividad 1).
- 7) Medición de calor específico.
- 8) Análisis de resultados: Énfasis en: i) La relación del porcentaje de reemplazo de agregado fino por caucho reciclado, con la resistencia a compresión, y ii) La relación del porcentaje de reemplazo de agregado fino por caucho reciclado, con el calor específico.

El presente trabajo se ha organizado en dos partes. En la primera se presentan el proceso de dosificación, fabricación de mampuestos y ensayos de resistencia a compresión. En la segunda parte se presenta el estudio del comportamiento térmico de las distintas dosificaciones.

- Capítulo 2: Se presentan los antecedentes de otras investigaciones realizadas en la elaboración de hormigones con inclusión de caucho reciclado.

Parte I: Resistencia a compresión

- Capítulo 3: Se describen los materiales y equipamiento utilizado.
- Capítulo 4: Se explica el proceso de dosificación y los parámetros considerados y utilizados para la fabricación de los mampuestos.
- Capítulo 5: Se presentan las conclusiones referidas a los ensayos de resistencia a compresión.

Parte II: Calor específico.

- Capítulo 6: Se describe la fabricación de las muestras utilizadas para los ensayos de calor específico.
- Capítulo 7: Se presentan los conceptos teóricos involucrados en el desarrollo de los ensayos de calor específico.
- Capítulo 8: Se desarrollan los modelos matemáticos en función de las magnitudes determinadas de manera directa y luego se detalla la metodología de ensayo tanto para el equivalente en agua del calorímetro como para el calor específico.
- Capítulo 9: Se presentan los resultados de los ensayos de equivalente en agua del calorímetro y calor específico.
- Capítulo 10: Se presentan las conclusiones referidas a los ensayos de calor específico.
- Capítulo 11: Se presentan las conclusiones a las que se arribó y las posibles líneas de trabajo futuro.
- ANEXO 1: Se exponen las tablas de datos utilizadas para realizar el análisis granulométrico.
- ANEXO 2: Se muestra un diagrama de flujo del proceso de dosificación.
- ANEXO 3: Se presentan los gráficos correspondientes a los datos de cada ensayo de equivalente en agua del calorímetro.
- ANEXO 4: Se explica el desarrollo de la ecuación para determinar la incertidumbre combinada.
- ANEXO 5: Se presentan los gráficos correspondientes a los datos de cada ensayo de calor específico.

2 ANTECEDENTES

A partir de la búsqueda bibliográfica se encontró que existe una gran cantidad de investigaciones enfocadas al uso de caucho como agregado del hormigón para la construcción de elementos estructurales, mezclas asfálticas o adoquines. Sin embargo el uso particular para la fabricación de mampuestos para construcciones residenciales no es un tópico tan ampliamente estudiado. Además no se han encontrado estudios sobre la capacidad calorífica de este tipo de hormigón. De las investigaciones que se han considerado para el desarrollo de este trabajo, se destacan dos.

La primera (Mohammed, Anwar Hossain, Eng Swee, Wong, & Abdullahi, 2012) concluye que un porcentaje máximo de reemplazo de agregados finos por partículas de caucho de 6,5% permite producir bloques huecos de hormigón portantes mientras que un porcentaje de reemplazo de 40,7% permite producirlos pero como no portantes.

En la segunda investigación (Fraile-Garcia, Ferreiro-Cabello, Mendivil-Giro, & Vicente-Navarro, 2018) se concluye que el mejoramiento de la aislación térmica a partir del uso de elementos (bloques, viguetas, losas) construidos con hormigón con un máximo de 20% de caucho, justifica su uso donde las exigencias estructurales lo permitan. Además busca demostrar que pueden elaborarse estos productos en líneas de producción convencionales y de esa manera hacer uso de lo que hoy es un desecho abundante y problemático.

PARTE I: RESISTENCIA A COMPRESIÓN

3 MATERIALES Y EQUIPAMIENTO

3.1.1 MATERIALES

3.1.1.1 MATERIAL CEMENTICEO

El cemento utilizado fue *Cemento Portland con adición de filler calcáreo/puzolana CPC40*, conforme a los requisitos de las Normas IRAM 50000 y 50001.

3.1.1.2 AGREGADO FINO, GRUESO Y CAUCHO GRANULADO

Para el desarrollo de las mezclas, se utilizó caucho granulado proveniente de la trituración de NFU. En cuanto al agregado fino y grueso, se utilizó material no triturado utilizado para la elaboración de hormigones en la zona.

Los límites superior e inferior de la clasificación granulométrica para agregado grueso y fino son los establecidos en la norma ASTM C33-03 (ASTM International, 2003b). Respecto al análisis granulométrico, se realizó de acuerdo a los requerimientos de la norma ASTM C136-01 (ASTM International, 2001). En el ANEXO 1: ANALISIS GRANULOMÉTRICO se encuentra la tabla de datos correspondiente y en la Figura 3.1 se presentan los resultados.

El agregado fino presentó un exceso de 3,9% sobre el límite superior en el tamaño de tamiz de 300 μ m. Si bien la norma ASTM C33-03 no se expresa acerca de la tolerancia en el incumplimiento de los límites, se consideró despreciable ese desvío de manera que el material fue utilizado en estas condiciones siendo que en el resto del rango de tamaños se cumplieron los requisitos normativos y la curva no mostró discontinuidades.

El agregado grueso utilizado quedó representado por un Tamaño Máximo Nominal de 9,5mm y un Tamaño Nominal de 9,5mm-2,36mm. Respecto a su distribución por tamaño, mostró uniformidad en 4,75mm.

En cuanto a las partículas de caucho, no se encontraron requisitos normativos relacionados con husos granulométricos para la producción de hormigón. El análisis granulométrico se realizó adoptando la metodología para agregados finos pétreos. Dió como resultado predominancia de partículas de tamaño 1,18mm.

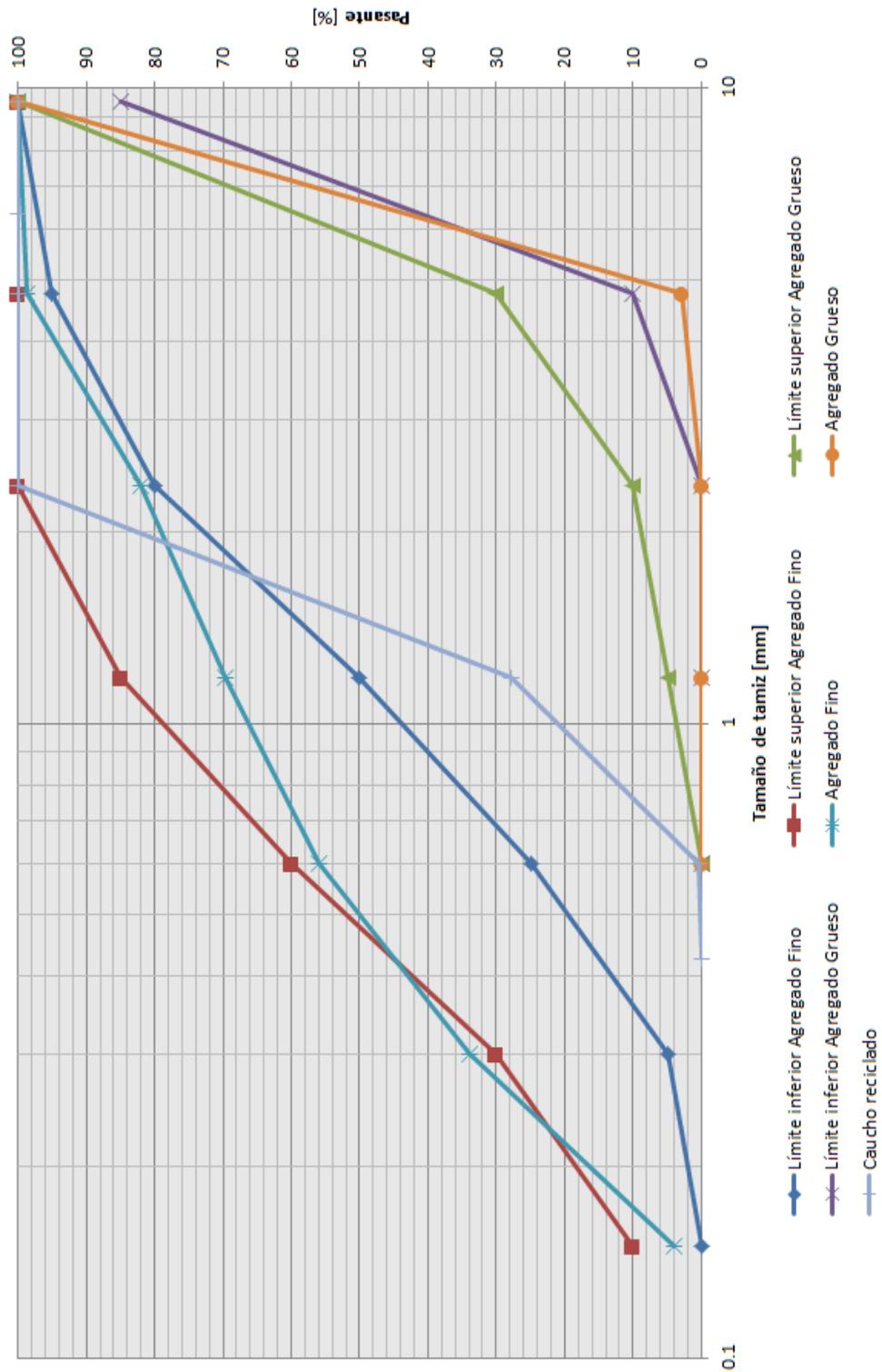


Figura 3.1: Gráfico de Análisis granulométrico.

3.1.2 EQUIPAMIENTO

En la Tabla 3.1 se presentan las características de los equipos utilizados durante el desarrollo del proyecto.

EQUIPO	CARACTERISTICAS
BALANZA	Marca: Mettler P1210/ Capacidad máxima:1200g / Resolución:0,01g
BALANZA	Marca: AND FX-3000 / Capacidad máxima:3100g / Resolución:0,01g
PRENSA	Marca: Macotest/ Calibrada hasta 250 t Resolución: 5KN
TAMIZADORA	Marca: Macotest / Serie normalizada de tamices: 3/8 (9,5 mm)- #4 (4,7mm)- #8(2,4mm)- #16(1,2mm)- #30(0,6mm)- #50(0,3mm)- #100(0,15mm)- #200(0,07mm)
EQUIPO DE VIBROCOMPACTACIÓN	Motor: SYNTRON Co U.S.A. /220V-2A-50 Hz- Vibrador modelo V75 / Moldes: Fabricados para producir mampuestos de 300mmx150mmxAltura variable. / Ajustable a la mesa vibradora.
SISTEMA DE ADQUISICION DE DATOS	Marca: PASCO / Modelo: 550 Universal interface. Software: Capstone v 1.1.2
TERMOCUPLAS	Material: Acero inoxidable. Resolución:0,1°C
CALENTADOR ELECTRICO	-

Tabla 3.1: Características del equipamiento.

4 DOSIFICACIÓN

4.1 PROCESO DE DOSIFICACIÓN

Debido a que en la búsqueda bibliográfica no se encontró una metodología racional para dosificar hormigones con incorporación de caucho para mampuestos, se procedió de manera empírica adoptando la proporción en volumen 1:1:2 (Cemento: Agregado Fino: Agregado Grueso) utilizada en la bibliografía consultada (Mohammed et al., 2012) sobre la cual se partió para definir las mezclas Control, HCR10, HCR25 y HCR50. El contenido de partículas de caucho se obtuvo por reemplazo parcial de agregado fino en volumen. En cuanto al contenido de agua, se definió a partir de un proceso iterativo en el cual intervinieron distintos parámetros y consideraciones con la finalidad de obtener mezclas de prueba que permitieran producir mampuestos que cumplieran los requisitos de ergonomía, estabilidad geométrica, segregación y rugosidad para el método de producción empleado: Vibrocompactación.

La presión de compactación, frecuencia de vibración y dos de las dimensiones de los mampuestos (longitud y ancho) quedaron definidos por las limitaciones del equipo de vibrocompactación: 232 kg/m², 50Hz y 300mmx150mm respectivamente. La relación $0,5 \leq \frac{Altura}{Ancho} \leq 0,7$ impuesta por la Norma ASTM C140/C140M-17a (ASTM International, 2017) implicó que la altura debía ser entre 75mm y 105mm. Bajo la asunción de una densidad de 2400Kg/m³, un mampuesto de 150mmx300mmx85mm pesaría 9,18Kg y no cumpliría con el límite de levantamiento manual de cargas de 9Kg para actividades repetitivas desarrolladas por más de dos horas para levantamientos alejados establecido en la Resolución 295/2003 (Ministerio de Trabajo Empleo y Seguridad Social, n.d.) (Tabla 4.1). Por esta razón se definió 80mm como límite superior.

Situación horizontal del levantamiento Altura del levantamiento	Levantamientos próximos: origen < 30 cm desde el punto medio entre los tobillos	Levantamientos intermedios: origen de 30 a 60 cm desde el punto medio entre los tobillos	Levantamientos alejados: origen > 60 a 80 cm desde el punto medio entre los tobillos A
Hasta 30 cm ^a por encima del hombro desde una altura de 8 cm por debajo del mismo.	16 Kg	7 Kg	No se conoce un límite seguro para levantamientos repetidos ^c
Desde la altura de los nudillos hasta por debajo del hombro.	32 Kg	16 Kg	9 Kg
Desde la mitad de la espinilla hasta la altura de los nudillos ^b	18 Kg	14 Kg	7 Kg
Desde el suelo hasta la mitad de la espinilla	14 Kg	No se conoce un límite seguro para levantamientos repetidos ^c	No se conoce un límite seguro para levantamientos repetidos ^c

Tabla 4.1: Valores límite para el levantamiento manual de cargas para tareas <2horas al día con <=60 levantamientos por hora o > 2 horas al día con <12 levantamientos/hora.

El tiempo de vibración se determinó considerando la estabilidad geométrica, segregación y rugosidad. El proceso inició mezclando aproximadamente 8 Kg de material sin incorporación de caucho (Mezcla Control) y un contenido de agua de 5,5% en peso total de la mezcla, límite inferior para hormigones con cero asentamiento contemplado en la bibliografía consultada (Mohammed et al., 2012). Luego de moldear aproximadamente 5Kg durante 5s se comparó la altura del mampuesto obtenido con el límite establecido de $\frac{Altura}{Ancho}$. Al no cumplirlo se volvió a mezclar el mismo material agregando capas de 1cm y moldeando hasta verificarlo. El hecho de incorporar hojas de acetato como desmoldante permitió minimizar la pérdida de humedad en los remoldeos. A continuación se inspeccionó la rugosidad superficial y la presencia de segregación. Al no verificarlo se aumentó 0,5% el contenido de agua en peso total de la mezcla antes de remoldear el material. Luego de un resultado positivo, se procedió a desmoldar. Ante una rotura total o parcial del mampuesto, se volvió a mezclar el material, se aumentó 1s el tiempo de vibración y se volvió a comparar con el intervalo $\frac{Altura}{Ancho}$. Este paso fue repetido de manera alternada con el agregado de material y aumento del contenido de agua hasta lograr un

mampuesto que no presentara signos de segregación, que tuviera rugosidad aceptable y que mantuviera la estabilidad geométrica. Este proceso, expresado en un diagrama de flujo en el ANEXO 2: PROCESO DE DOSIFICACIÓN, resultó en dimensiones de 150mmx300mmx80mm para un tiempo de 15s de vibración y 8% en peso de contenido de agua sin segregación visible y rugosidad superficial aceptable. Para las restantes dosificaciones (HCR10, HCR25 y HCR50) se realizó un proceso similar, con la diferencia de que la altura objetivo era 80mm. El resultado final para las dosificaciones HCR10, HCR25 y HCR50 fue un tiempo de vibración igual que para la mezcla de control para el mismo contenido de agua. Este hecho quedó reservado para un estudio a futuro debido a que se cree necesario modificar el equipo de vibrocompactación para poder variar frecuencia y presión. En la Tabla 4.2 se resume el valor de los parámetros utilizados y en la Tabla 4.3, la cantidad de agregados, cemento, caucho y agua utilizada para para producir los mampuestos con cada dosificación.

Mezcla	Parámetro		
	Presión [Kg] [m ²]	Frecuencia [Hz]	Tiempo [s]
Control	232	50	15
HCR10	232	50	15
HCR25	232	50	15
HCR50	232	50	15

Tabla 4.2: Parámetros de producción de mampuestos.

Mezcla	Cantidad de material			
	Agregado grueso [g]	Agregado fino [g]	Caucho reciclado [g]	Agua [g]
Control	1628,41	3485,84	0,00	510,03
HCR10	1628,41	3137,26	109,62	491,00
HCR25	1628,41	2614,38	274,04	462,23
HCR50	1628,41	1742,92	548,09	414,44

Tabla 4.3: Cantidad de material necesaria por mampuesto para cada dosificación.

4.2 PROCESO DE PRODUCCIÓN

El proceso de producción fue el mismo para cada dosificación y consistió en primera instancia en el mezclado manual de las cantidades detalladas en la Tabla 4.3 sobre una placa metálica y con guantes de latex para minimizar la pérdida de humedad. A continuación se llevó a cabo el moldeo de los mampuestos colocando la mezcla en una sola capa sobre hojas de acetato, considerando los parámetros detallados en la Tabla 4.2 y dejándolos 28 días bajo condiciones de curado al aire. En la Tabla 4.4 se muestran las dimensiones y pesos de los 12 mampuestos producidos y en la Figura 4.1 puede observarse uno preparado con la dosificación de control y otro con HCR50.



Figura 4.1: Fotos a) Mampuesto de HS, b) Mampuesto de HCR50.

Bloque de hormigón	Longitud [mm]			Ancho [mm]			Altura [mm]			Peso [g]
	L1	L2	Lpromedio	A1	A2	Apromedio	AL1	AL2	ALpromedio	
0%CR 1	303	303	303	153	153	153	81	82	81.5	6525
0%CR 2	303	303	303	153	153	153	82	83	82.5	6525
0%CR 3	303	303	303	153	153	153	82	83	82.5	6530
10%CR 1	303	303	303	153	153	153	83	83	83	6275
10%CR 2	303	303	303	153	153	153	82	83	82.5	6270
10%CR 3	303	303	303	153	153	153	83	83	83	6270
25%CR 1	303	303	303	153	153	153	83	82	82.5	5845
25%CR 2	303	303	303	153	153	153	83	82	82.5	5865
25%CR 3	303	303	303	153	153	153	82	82	82	5855
50%CR 1	303	303	303	153	153	153	82	81	81.5	5270
50%CR 2	303	303	303	153	153	153	82	82	82	5245
50%CR 3	303	303	303	153	153	153	82	82	82	5265

Tabla 4.4: Dimensiones y peso de mampuestos.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 APARIENCIA Y ESTABILIDAD GEOMÉTRICA

Durante el proceso de producción de mampuestos se observó que al vibrar más tiempo del máximo establecido, el fenómeno de segregación se hacía más evidente dejando las caras con baja rugosidad, debido al movimiento de partículas finas hacia la superficie (Figura 5.1). No se percibió una notable diferencia del fenómeno entre mezclas con y sin caucho. Sin embargo la apariencia superficial si varió de un caso al otro en cuanto al color, debido al contenido del nuevo tipo de agregado.



Figura 5.1: Foto de segregación de partículas por exceso de vibración.

Para evaluar la estabilidad geométrica, se midió cada bloque luego de ser moldeado y antes de encabezarlos para ensayarlos. No se observó variación en las dimensiones.

5.2 DENSIDAD

Se observó una disminución máxima de la densidad de los mampuestos de 19,1% (Figura 5.2) que puede atribuirse al aumento del porcentaje de caucho, que tiene una baja densidad comparada con la del resto de los materiales.

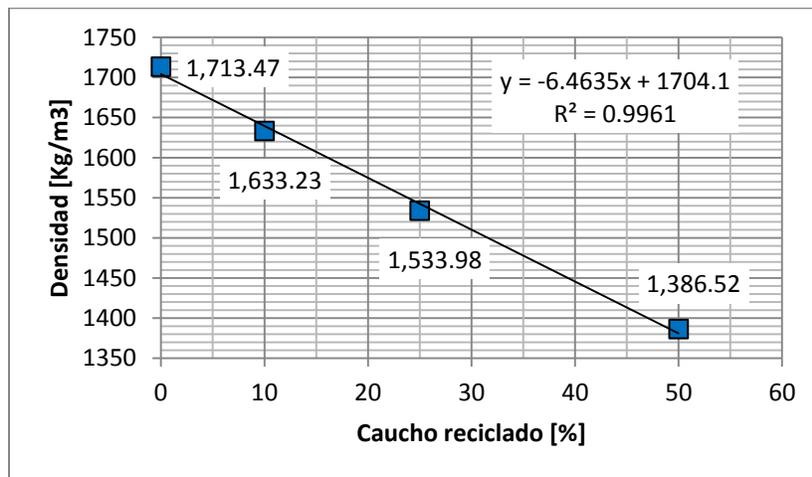


Figura 5.2: Gráfico de densidad vs % de caucho reciclado.

5.3 RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Luego de 28 días de curado al aire, los bloques de hormigón fueron ensayados a compresión considerando como guía la Norma ASTM C140/c140m-17a (ASTM International, 2017) para lo cual fue necesario encabezarlos (dosificación 1 yeso: 3 cemento: 4 agua) y adecuar la configuración de los cabezales de la prensa para homogeneizar la aplicación de la carga en caso de que hubiera alguna partícula fuera del plano de carga (Figura 5.3).

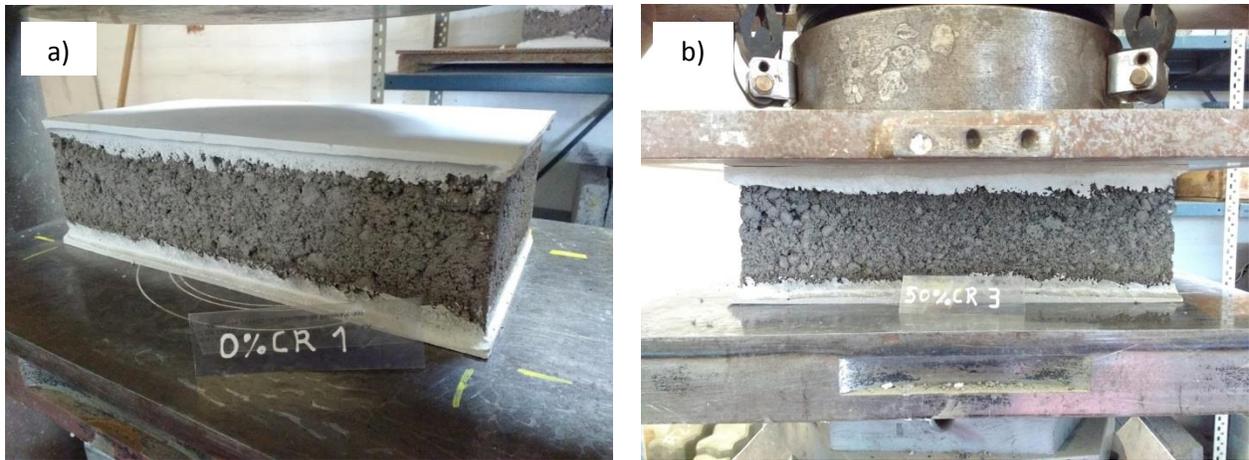


Figura 5.3: a) Foto de mampuesto encabezado, b) Foto de configuración del cabezal de prensa.

La incorporación de caucho resultó en una disminución sustancial de la resistencia a compresión de hasta 55% (Ver Figura 5.4 y Figura 5.5). Esto se debe en parte a la baja adherencia entre la pasta cementicia y las partículas de caucho, y la alta elasticidad de éste, lo que permite el desarrollo de micro fracturas en la matriz cementicia. (Gupta, Chaudhary, & Sharma, 2014)

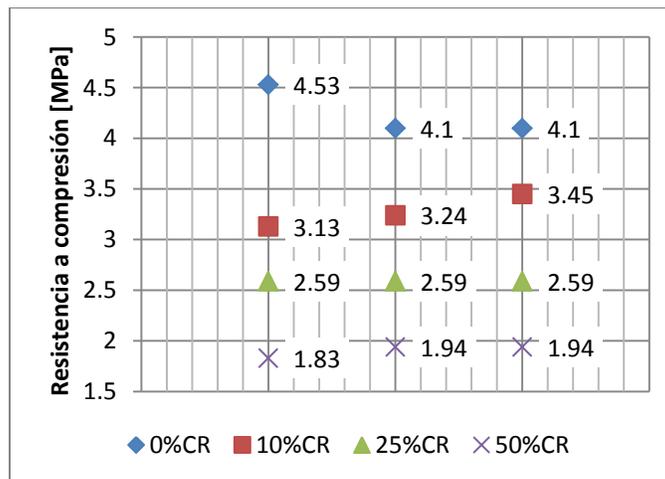


Figura 5.4: Gráfico de resultados de ensayos a compresión a 28 días.

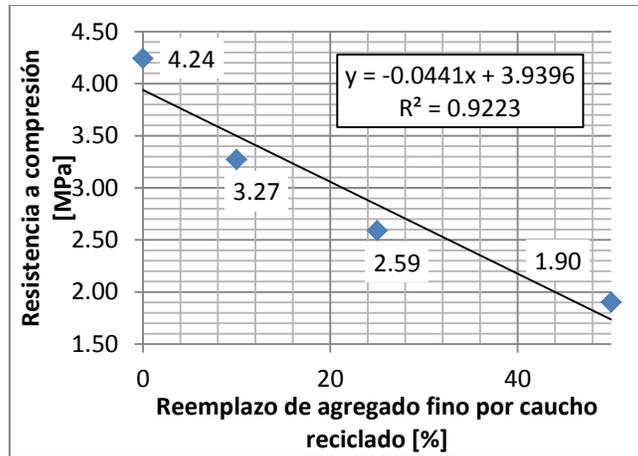


Figura 5.5: Gráfico de resistencia a compresión promedio vs % de caucho.

Durante el proceso de producción de mampuestos se realizaron varios con una relación Altura/Ancho < 0.5. Fueron encabezados y ensayados a compresión dando como resultado valores notablemente mayores a los expuestos en el gráfico 3. Se concluyó que el requisito normativo de $0,5 < \text{Altura/Ancho}$ tiene como sustento la sobrerresistencia que se genera por los esfuerzos de confinamiento inducidos por la fricción entre las caras del bloque y los cabezales de la prensa. En la Figura 5.6a) puede observarse la rotura típica de los bloques que cumplen el requisito normativo. Por otro lado, en los bloques con $0,5 < \text{Altura/Ancho}$, la rotura fue perimetral (Figura 5.6b).



Figura 5.6: Fotos de rotura típica de bloque: a) Cumpliendo requisito normativo; b) Altura/Ancho < 0,5.

PARTE II: CALOR ESPECÍFICO

6 PRODUCCIÓN DE MUESTRAS

Las muestras para la medición del calor específico se realizaron considerando los mismos parámetros de presión, frecuencia y tiempo de vibración que para la producción de mampuestos, utilizando los mismos materiales y equipamiento. Las dimensiones se establecieron teniendo en cuenta el tamaño del calorímetro y vaso de vidrio empleados para el ensayo: $\phi 50\text{mm} \times 35\text{mm}$. Se optó por hacer muestras con 0% de reemplazo de agregado fino y con 50% para que el contraste fuera el mayor posible. Se realizaron un total de 9 muestras: 4 de HS y 5 HCR. En la Figura 6.1 pueden observarse dos, una de hormigón simple y la otra con caucho reciclado.



Figura 6.1: Foto de muestras para medición de calor específico.

7 DEFINICIONES

7.1.1 CAPACIDAD TERMICA Y CALOR ESPECÍFICO

La capacidad térmica C de una muestra particular se define como la cantidad de energía necesaria para elevar la temperatura de dicha muestra en 1°C . A partir de esta definición se ve que si la energía Q produce un cambio ΔT en la temperatura de una muestra, entonces:

$$Q = C \cdot \Delta T \quad (5.1)$$

El calor específico c de una sustancia es la capacidad térmica por unidad de masa. Por lo tanto, si a una muestra de una sustancia con masa m se le transfiere energía Q y la temperatura de la muestra cambia en ΔT , el calor específico de la sustancia es:

$$c \equiv \frac{C}{m} \quad (5.2)$$

Esta magnitud física para sólidos depende en cierta medida de la temperatura (así como ligeramente de la presión), aunque para cambios de temperatura no muy grandes, puede considerarse constante. (Giancoli, 2008).

Entonces: $Q = mc\Delta T$

7.1.2 CALORIMETRIA

La calorimetría es la medición cuantitativa del intercambio de calor (Giancoli, 2008). Tales mediciones se realizan utilizando un calorímetro siendo una aplicación importante la determinación del calor específico de diversas sustancias.

La técnica empleada, consiste en sumergir una muestra de masa m_m y temperatura T_c conocidas, en una masa de agua m_{H_2O} a una temperatura $T_f < T_c$ conocida. Si el sistema de la muestra y el agua está aislado, el principio de conservación de energía requiere que la cantidad de energía que sale de la muestra sea igual a la cantidad de energía que entra al agua. El dispositivo donde se presenta esta transferencia de energía se llama calorímetro.

7.1.3 EQUIVALENTE EN AGUA

Para efectuar medidas calorimétricas es necesario conocer la capacidad calorífica de los elementos que forman el calorímetro. Para un mismo dispositivo la suma de dichas capacidades caloríficas será una constante y se le ha denominado equivalente en agua del calorímetro. El equivalente en agua del calorímetro se define como la masa de agua que necesita la misma cantidad de calor que el termómetro, agitador, paredes del calorímetro, etc para elevar su temperatura el mismo número de grados. El equivalente en agua es así, la capacidad calorífica de una masa de agua de igual valor a la suma de las capacidades caloríficas de los elementos del calorímetro. Se determina experimentalmente y se expresa en gramos [*g*].

8 MODELOS MATEMÁTICOS Y METODOLOGÍA DE ENSAYO

8.1 EQUIVALENTE EN AGUA DEL CALORÍMETRO

8.1.1 MODELO MATEMÁTICO

Considerando:

- m_{cal} masa del calorímetro y c_{cal} su calor específico.
- m_t masa de la parte sumergida de la termocupla y c_t su calor específico.
- m_f masa del agua que contiene el calorímetro a una temperatura T_f y c_{H2O} su calor específico.
- m_c masa del agua que vierte en el calorímetro a una temperatura $T_c > T_f$ y c_{H2O} su calor específico.

En estado de equilibrio a la temperatura T_e , se obtiene la siguiente expresión:

$$Q_{cal} + Q_t + Q_f = -Q_c$$

$$c_{cal} \cdot m_{cal} \cdot (T_e - T_f) + c_t \cdot m_t \cdot (T_e - T_f) + c_{H2O} \cdot m_f \cdot (T_e - T_f) = -c_{H2O} \cdot m_c \cdot (T_e - T_c)$$

$$(c_{cal} \cdot m_{cal} + c_t \cdot m_t) \cdot (T_e - T_f) + c_{H2O} \cdot m_f \cdot (T_e - T_f) = -c_{H2O} \cdot m_c \cdot (T_e - T_c) \quad (5.3)$$

La capacidad térmica del conjunto calorímetro-termocupla, también denominado equivalente en agua del calorímetro es:

$$\pi = c_{cal} \cdot m_{cal} + c_t \cdot m_t \quad (5.4)$$

Reemplazando 5.4 en 5.3 y despejando π se obtiene esta incógnita en función de magnitudes que se determinan de manera directa:

$$\pi = \frac{m_c \cdot (T_c - T_e)}{(T_e - T_f)} - m_f \quad (5.5)$$

8.1.2 METODOLOGÍA DE ENSAYO

La metodología consiste en los siguientes pasos:

- 1) Pesar una cantidad m_c de agua.
- 2) Comenzar a calentar m_c haciendo uso del vaso de cristal y el calentador eléctrico.
- 3) Pesar una cantidad m_f de agua: Limpiar y secar el calorímetro por dentro y por fuera, y tarar la balanza. A continuación introducir una cantidad de agua y pesar.
- 4) Medición de T_f : Introducir una termocupla en el calorímetro con m_f a través de una ranura en la tapa del mismo y comenzar a registrar la temperatura. Esperar a que el valor se estabilice.
- 5) Medición de T_c : Introducir una termocupla distinta a la del paso 4 en el vaso de cristal y registrar la temperatura hasta que el agua esté cerca de la ebullición.
- 6) Trasvasar rápidamente la masa de agua caliente m_c al calorímetro y tapar inmediatamente.
- 7) Agitar de manera continua el calorímetro hasta que la temperatura registrada por la termocupla se estabilice en un valor que será llamado T_e .

8.2 CALOR ESPECÍFICO

8.2.1 MODELO MATEMATICO

Considerando:

- m_f masa del agua que contiene el calorímetro a una temperatura T_f y c_{H_2O} su calor específico.
- m_{abs} masa del agua absorbida por la muestra a una temperatura $T_c > T_f$ y c_{H_2O} su calor específico.
- m_m masa de la muestra a una temperatura $T_c > T_f$ y c_m su calor específico a determinar.
- π el equivalente en agua del calorímetro determinado indirectamente.

Debido a que el hormigón es un material poroso que contiene un porcentaje de vacíos accesibles donde el agua puede acumularse, el sistema involucrado es *calorímetro-muestra-agua-agua absorbida* Por lo tanto, por conservación de energía:

$$Q_{cal} + Q_f = -Q_m - Q_{abs}$$

$$(\pi + m_f) \cdot c_{H_2O} \cdot (T_e - T_f) = -c_m \cdot m_m \cdot (T_e - T_c) - c_{H_2O} \cdot m_{abs} \cdot (T_e - T_c)$$

$$c_m = \left[\frac{(\pi + m_f) \cdot c_{H_2O} \cdot (T_e - T_f)}{(T_c - T_e)} - c_{H_2O} \cdot m_{abs} \right] \cdot \frac{1}{m_m} \quad (5.9)$$

8.2.2 METODOLOGÍA DE ENSAYO

La metodología consiste en los siguientes pasos tanto para las muestras de Hormigón simple, como para las de Hormigón con caucho reciclado:

- 1) Comenzar a calentar una cantidad de agua suficiente para sumergir una muestra, haciendo uso del vaso de cristal y el calentador eléctrico.
- 2) Pesar el calorímetro limpio y seco tanto por dentro como por fuera. Este valor se llamará M_{cal} .
- 3) Pesar una cantidad m_f de agua: Tarar la balanza con el calorímetro, agregar agua al calorímetro y pesar m_f .
- 4) Medición de T_f : Introducir una termocupla en el calorímetro con m_f a través de una ranura en la tapa del mismo y comenzar a registrar la temperatura. Esperar a que el valor se estabilice.
- 5) Limpiar superficialmente la muestra y pesar. Este valor se llamará m_m .
- 6) Sumergir la muestra en el agua caliente y revolver de manera continua.
- 7) Medición de T_c : Introducir una termocupla distinta a la del paso 4 en el vaso de cristal y registrar la temperatura hasta que el agua esté cerca de la temperatura de ebullición.
- 8) Introducir rápidamente la muestra al calorímetro y tapar inmediatamente.
- 9) Agitar de manera continua el calorímetro hasta que la temperatura registrada por la termocupla se estabilice en un valor que será llamado T_e .
- 10) Pesar el conjunto: $M_{cal} + m_f + m_m + m_{abs}$, el cual se llamará M_{total} . Despejar el valor m_{abs} que es la masa de agua absorbida por la muestra.

9 ENSAYOS

Para esta sección y la siguiente se consideraron las recomendaciones de la “Guía para la expresión de la incertidumbre en la medición” del Comité Conjunto de Guías en Metrología (JCGM por su sigla en inglés) (BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, 2008)

9.1 MEDICIÓN DEL EQUIVALENTE EN AGUA DEL CALORÍMETRO Y EXPRESIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN

El valor estimado de las magnitudes de entrada se realizó a partir de ocho series de mediciones directas únicas mientras que el mensurando fue calculado como la media aritmética de las ocho observaciones independientes (Tabla 9.1). En el ANEXO 3: MEDICION DEL EQUIVALENTE EN AGUA DEL CALORIMETRO se encuentran los gráficos de datos utilizados para obtener los valores de temperatura.

Ensayo	m_f [g]	T_f [°C]	m_c [g]	T_c [°C]	T_e [°C]	π [g]
1	282,77	32,8	310,14	83,0	58,0	24,91
2	292,91	30,4	190,29	84,2	50,5	26,13
3	301,33	31,1	205,35	81,9	50,7	25,55
4	251,07	30,5	200,68	80,4	51,5	25,10
5	251,8	31,3	198,56	79,5	51,5	23,43
6	273,00	31,5	191,84	83,4	51,8	25,63
7	284,12	31,5	200,61	82,8	51,6	27,27
8	318,96	19,1	210,19	85,5	44,2	26,89
PROMEDIO						25,62

Tabla 9.1: Magnitudes de entrada y mensurando: Equivalente en agua del calorímetro.

Considerando la resolución de los instrumentos como fuente de incertidumbre y suponiendo una distribución de probabilidad rectangular simétrica se obtuvieron los valores de la Tabla 9.2:

$\mu_{(mf)}$ [g]	$\mu_{(Tf)}$ [°C]	$\mu_{(mc)}$ [g]	$\mu_{(Tc)}$ [g]	$\mu_{(Te)}$ [g]
0,003	0,029	0,003	0,029	0,029

Tabla 9.2: Incertidumbre por resolución.

Debido a que no se contaba con información suficiente para evaluar la correlación entre las variables, se supusieron independientes, quedando la expresión de la incertidumbre típica combinada como se muestra a continuación (ANEXO 4: ECUACIÓN DE INCERTIDUMBRE COMBINADA), que refleja la contribución de cada fuente de incertidumbre considerada a la incertidumbre en la estimación del mensurando:

$$u_c(\pi) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i)}$$

Donde los coeficientes de sensibilidad fueron evaluados en los valores medidos (la mejor estimación de cada magnitud de entrada):

$$\begin{aligned} & m_{fm}, m_{cm}, T_{fm}, T_{cm}, T_{em} \\ u_c^2(\pi) = & \left(\frac{\partial \pi}{\partial m_f} \right)^2 \Big|_{m_{fm}} \cdot u^2(m_{fm}) + \left(\frac{\partial \pi}{\partial m_c} \right)^2 \Big|_{m_{cm}} \cdot u^2(m_{cm}) + \left(\frac{\partial \pi}{\partial T_f} \right)^2 \Big|_{T_{fm}} \cdot u^2(T_{fm}) \\ & + \left(\frac{\partial \pi}{\partial T_c} \right)^2 \Big|_{T_{cm}} \cdot u^2(T_{cm}) + \left(\frac{\partial \pi}{\partial T_e} \right)^2 \Big|_{T_{em}} \cdot u^2(T_{em}) \end{aligned}$$

Reemplazando las expresiones de las derivadas parciales y los valores de la incertidumbre asociada a cada variable se obtiene la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} u_c^2(\pi) = & (-1)^2 \cdot (0,003g)^2 + \left[\frac{(T_c - T_e)}{(T_e - T_f)} \right]^2 \cdot (0,003g)^2 + \left[\frac{m_c \cdot (T_c - T_e)}{(T_e - T_f)^2} \right]^2 \cdot (0,029^\circ C)^2 \\ & + \left[\frac{m_c}{(T_e - T_f)} \right]^2 \cdot (0,029^\circ C)^2 + \left[\frac{m_c \cdot (T_c - T_e)}{(T_e - T_f)^2} \right]^2 \cdot (0,029^\circ C)^2 \end{aligned}$$

En la Tabla 9.3 se detalla el valor de los coeficientes de sensibilidad que forman parte del cálculo de la incertidumbre combinada (Tabla 9.4).

Ensayo	$\left(\frac{\partial \pi}{\partial m_f}\right)_{m_{fm}}$	$\left(\frac{\partial \pi}{\partial m_c}\right)_{m_{cm}}$	$\left(\frac{\partial \pi}{\partial T_f}\right)_{T_{fm}}$	$\left(\frac{\partial \pi}{\partial T_c}\right)_{T_{cm}}$	$\left(\frac{\partial \pi}{\partial T_e}\right)_{T_{em}}$
1	-1	0,99	12,21	12,31	24,52
2	-1	1,68	15,87	9,47	25,34
3	-1	1,59	16,68	10,48	27,15
4	-1	1,38	13,15	9,56	22,71
5	-1	1,39	13,63	9,83	23,46
6	-1	1,56	14,71	9,45	24,16
7	-1	1,55	15,49	9,98	25,47
8	-1	1,65	13,78	8,37	22,15

Tabla 9.3: Coeficientes de sensibilidad.

$u_c(\pi)$ [g]								
1	2	3	4	5	6	7	8	PROMEDIO
0,87	0,91	0,97	0,81	0,83	0,86	0,91	0,79	0,87

Tabla 9.4: Incertidumbre combinada.

Finalmente para definir un intervalo en torno al valor del mensurando en el que se espera encontrar una fracción importante de la distribución de valores se calculó la incertidumbre expandida. Suponiendo que la distribución de probabilidad del mensurando es normal, se define el factor de cobertura k_p para un nivel de confianza de aproximadamente 95%, quedando $k_p = 2$. De esta manera, el valor del equivalente en agua del calorímetro estimado se expresa como:

$$\pi = 25,62 \text{ g} \pm 1,73 \text{ g}$$

9.2 MEDICIÓN DEL CALOR ESPECÍFICO Y EXPRESIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN

Para la evaluación de la incertidumbre en la medición del calor específico de las muestras de hormigón se siguió la misma metodología que en la sección 9.1. Sin embargo el valor del calor específico del agua se consideró como constante $c_{H_2O} = 1 \frac{\text{cal}}{\text{g}\cdot\text{C}^\circ}$, el valor del equivalente en agua del calorímetro como $\pi = 25,62 \text{ g}$ y su incertidumbre $u_c(\pi) = 0,87\text{g}$. En cuanto al modelo matemático definido en la sección 5.4, para que representara mejor la metodología de ensayo se incluyó las magnitudes de entrada: M_{cal} y M_{TOTAL} quedando:

$$c_m = \left[\frac{(\pi + m_f) \cdot c_{H2O} \cdot (T_e - T_f)}{(T_c - T_e)} - c_{H2O} \cdot (M_{TOTAL} - M_{cal} - m_f - m_m) \right] \cdot \frac{1}{m_m}$$

9.2.1 MUESTRAS DE HORMIGÓN SIMPLE

El valor estimado de las magnitudes de entrada se realizó a partir de diez series de mediciones directas únicas realizadas a las muestras mientras que el mensurando fue calculado como la media aritmética de las diez observaciones independientes (Tabla 9.5). En el ANEXO 5: MEDICION DEL CALOR ESPECÍFICO se encuentran los gráficos de datos utilizados para obtener los valores de temperatura.

Ensayo	M_{cal} [g]	m_f [g]	T_f [°C]	m_m [g]	T_c [°C]	T_e [°C]	π [g]	M_{total} [g]	$\frac{C_{HS}}{cal}$ $\frac{g}{g \cdot ^\circ C}$
HS 1.1	371,73	333,20	22,6	117,07	87,6	27,7	25,62	833,69	0,161
HS 1.2	371,78	306,54	27,9	117,01	90,6	33,2	25,62	807,43	0,159
HS 2.1	371,73	332,16	22,8	116,14	85,7	27,9	25,62	833,44	0,156
HS 2.2	371,78	333,72	31,2	116,71	93,6	36,1	25,62	835,19	0,151
HS 3.1	371,73	380,28	23,2	118,41	85,4	27,9	25,62	884,22	0,164
HS 3.2	371,78	303,49	28,1	118,18	90,1	33,7	25,62	807,10	0,161
HS 4.1	371,73	384,98	25,3	117,39	86,8	29,6	25,62	884,35	0,176
HS 4.2	371,73	246,38	25,3	117,10	88,1	31,9	25,62	745,99	0,181
HS 5.1	371,73	281,00	25,1	117,57	86,4	31,0	25,62	781,95	0,179
HS 5.2	371,78	311,95	28,1	116,80	91,3	33,6	25,62	812,03	0,177
PROMEDIO									0,166

Tabla 9.5: Magnitudes de entrada y mensurando: Calor específico.

Considerando la resolución de los instrumentos como fuente de incertidumbre y suponiendo una distribución de probabilidad rectangular simétrica se obtuvo los valores de la Tabla 9.6:

$\mu_{(mf)}$ [g]	$\mu_{(Tf)}$ [°C]	$\mu_{(mc)}$ [g]	$\mu_{(Tc)}$ [g]	$\mu_{(Te)}$ [g]	$\mu_{(\pi)}$ [g]	$\mu_{(M_{total})}$	$\mu_{(M_{cal})}$
0,003	0,029	0,003	0,029	0,029	0,87	0,003	0,003

Tabla 9.6: Incertidumbre por resolución.

Debido a que no se contaba con información suficiente para evaluar la correlación entre las variables, se supusieron independientes, quedando como se muestra a continuación la expresión de la incertidumbre típica combinada (ANEXO 4: ECUACIÓN DE INCERTIDUMBRE

COMBINADA), que refleja la contribución de cada fuente de incertidumbre considerada a la incertidumbre en la estimación del mensurando:

$$u_c(c_{HS}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i)}$$

Donde los coeficientes de sensibilidad fueron evaluados en los valores medidos (la mejor estimación de cada magnitud de entrada):

$$\begin{aligned} & m_{fm}, m_{mm}, T_{fm}, T_{cm}, T_{em}, \pi_m, M_{calm}, M_{totalm} \\ u_c^2(c_{HS}) = & \left(\frac{\partial c_{HS}}{\partial m_f} \right)^2 \Big|_{m_{fm}} \cdot u^2(m_{fm}) + \left(\frac{\partial c_{HS}}{\partial m_m} \right)^2 \Big|_{m_{mm}} \cdot u^2(m_{mm}) + \left(\frac{\partial c_{HS}}{\partial M_{total}} \right)^2 \Big|_{M_{totalm}} \cdot u^2(M_{total}) + \\ & \left(\frac{\partial c_{HS}}{\partial M_{cal}} \right)^2 \Big|_{M_{calm}} \cdot u^2(M_{cal}) + \left(\frac{\partial c_{HS}}{\partial T_f} \right)^2 \Big|_{T_{fm}} \cdot u^2(T_{fm}) + \left(\frac{\partial c_{HS}}{\partial T_c} \right)^2 \Big|_{T_{fm}} \cdot u^2(T_{fm}) + \\ & \left(\frac{\partial c_{HS}}{\partial T_e} \right)^2 \Big|_{T_{em}} \cdot u^2(T_{em}) + \left(\frac{\partial c_{HS}}{\partial \pi} \right)^2 \Big|_{\pi_m} \cdot u^2(\pi) \end{aligned}$$

Reemplazando las expresiones de las derivadas parciales y los valores de la incertidumbre asociada a cada variable se obtiene la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} u_c^2(c_{HS}) = & \left\{ \left(\frac{c_{H2O}}{m_m} \right) \cdot \left[\frac{(T_e - T_f)}{(T_c - T_e)} + 1 \right] \right\}^2 \cdot (0,003g)^2 + \left\{ \left(\frac{c_{H2O}}{m_m^2} \right) \cdot \left[\frac{(\pi + m_f) \cdot (T_e - T_f)}{(T_e - T_c)} \right] + M_{total} - M_{cal} - \right. \\ & \left. m_f \right\}^2 \cdot (0,003g)^2 + \left(-\frac{c_{H2O}}{m_m} \right)^2 \cdot (0,003g)^2 + \left(\frac{c_{H2O}}{m_m} \right)^2 \cdot (0,003g)^2 + \\ & \left[-\frac{(\pi + m_f) \cdot c_{H2O}}{(T_c - T_e) \cdot m_m} \right]^2 \cdot (0,029^\circ C)^2 + \left[\frac{(\pi + m_f) \cdot c_{H2O} \cdot (T_e - T_f)}{(T_c - T_e)^2 \cdot m_m} \right]^2 \cdot (0,029^\circ C)^2 + \left\{ \left[\frac{(\pi + m_f) \cdot c_{H2O}}{(T_c - T_e) \cdot m_m} \right] \cdot \left[1 + \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{(T_e - T_f)}{(T_c - T_e)} \right] \right\}^2 \cdot (0,029^\circ C)^2 + \left[\frac{c_{H2O} \cdot (T_e - T_f)}{(T_c - T_e) \cdot m_m} \right]^2 \cdot (0,87g)^2 \end{aligned}$$

En la Tabla 9.7 se detalla el valor de los coeficientes de sensibilidad que forman parte del cálculo de la incertidumbre combinada (Tabla 9.8).

Ensayo	$\left(\frac{\partial c_m}{\partial m_f}\right)_{m_{fm}}$	$\left(\frac{\partial c_m}{\partial m_m}\right)_{m_{mm}}$	$\left(\frac{\partial c_m}{\partial M_{totalm}}\right)_{M_{totalm}}$	$\left(\frac{\partial c_m}{\partial M_{calm}}\right)_{M_{calm}}$	$\left(\frac{\partial c_m}{\partial T_f}\right)_{T_{fm}}$	$\left(\frac{\partial c_m}{\partial T_c}\right)_{T_{cm}}$	$\left(\frac{\partial \pi}{\partial T_c}\right)_{T_{cm}}$	$\left(\frac{\partial \pi}{\partial \pi}\right)_{\pi_m}$
1	9.27E-03	-1.12E-01	-8.54E-03	8.54E-03	-5.12E-02	-4.36E-03	5.55E-02	7.27E-04
2	9.34E-03	-1.09E-01	-8.55E-03	8.55E-03	-4.95E-02	-4.57E-03	5.40E-02	7.89E-04
3	9.37E-03	-1.14E-01	-8.61E-03	8.61E-03	-5.33E-02	-4.70E-03	5.80E-02	7.60E-04
4	9.30E-03	-1.13E-01	-8.57E-03	8.57E-03	-5.35E-02	-4.56E-03	5.81E-02	7.30E-04
5	9.14E-03	-1.17E-01	-8.45E-03	8.45E-03	-5.96E-02	-4.87E-03	6.45E-02	6.90E-04
6	9.30E-03	-1.06E-01	-8.46E-03	8.46E-03	-4.94E-02	-4.90E-03	5.43E-02	8.40E-04
7	9.16E-03	-1.19E-01	-8.52E-03	8.52E-03	-6.11E-02	-4.60E-03	6.57E-02	6.40E-04
8	9.54E-03	-9.95E-02	-8.54E-03	8.54E-03	-4.13E-02	-4.85E-03	4.62E-02	1.00E-03
9	9.41E-03	-1.04E-01	-8.51E-03	8.51E-03	-4.71E-02	-5.01E-03	5.21E-02	9.06E-04
10	9.38E-03	-1.10E-01	-8.56E-03	8.56E-03	-5.01E-02	-4.77E-03	5.49E-02	8.16E-04

Tabla 9.7: Coeficientes de sensibilidad.

$u_c(c_{HS}) \left[\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}} \right]$										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	PROMEDIO
0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,002	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002

Tabla 9.8: Incertidumbre combinada.

Finalmente para definir un intervalo en torno al valor del mensurando en el que se espera encontrar una fracción importante de la distribución de valores se calculó la incertidumbre expandida. Suponiendo que la distribución de probabilidad del mensurando es normal, se define el factor de cobertura k_p para un nivel de confianza de aproximadamente 95%, quedando $k_p = 2$. De esta manera, el valor del calor específico estimado se expresa como:

$$c_{HS} = 0,166 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}} \pm 0,004 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}}$$

9.2.2 MUESTRAS DE HORMIGÓN CON CAUCHO RECICLADO

El valor estimado de las magnitudes de entrada se realizó a partir de doce series de mediciones directas únicas realizadas a las muestras mientras que el mensurando fue calculado como la media aritmética de las doce observaciones independientes (Tabla 9.9). En el ANEXO 5: MEDICION DEL CALOR ESPECÍFICO se encuentran los gráficos de datos utilizados para obtener los valores de temperatura.

Ensayo	M_{cal} [g]	m_f [g]	T_f [°C]	m_m [g]	T_c [°C]	T_e [°C]	π [g]	M_{total} [g]	C_{HCR} $\frac{cal}{g \cdot ^\circ C}$
HCR 1.1	371.93	286.05	29.1	95.34	85.1	33.3	25.62	759.98	0.195
HCR 1.2	371.78	321.75	29.3	95.21	91.8	33.5	25.62	793.58	0.212
HCR 1.3	371.78	321.8	23.7	94.92	91.8	28.2	25.62	794.65	0.194
HCR 2.1	371.73	315.32	17.7	92.56	85.7	23.1	25.62	790.00	0.205
HCR 2.2	371.93	300.07	27.6	92.98	88.6	32.0	25.62	772.05	0.196
HCR 2.3	371.78	332.04	23.0	93.1	92.6	27.6	25.62	802.97	0.207
HCR 3.1	371.73	340.48	17.6	93.93	86.3	22.4	25.62	814.85	0.200
HCR 3.2	371.93	340.05	26.9	93.35	89.1	31.2	25.62	813.46	0.204
HCR 3.3	371.78	320.4	22.5	94.38	93.4	27.2	25.62	792.78	0.194
HCR 4.1	371.73	351.94	19.2	94.66	87.1	23.6	25.62	826.25	0.193
HCR 4.2	371.93	292.43	27.6	95.11	88.1	32.1	25.62	765.77	0.202
HCR 4.3	371.78	314.5	24.0	95.02	92.8	28.7	25.62	787.34	0.199
PROMEDIO									0.200

Tabla 9.9: Magnitudes de entrada y mensurando: Calor específico.

Considerando la resolución de los instrumentos como fuente de incertidumbre y suponiendo una distribución de probabilidad rectangular simétrica se obtuvo los valores de la Tabla 9.10:

$\mu_{(mf)}$ [g]	$\mu_{(Tf)}$ [°C]	$\mu_{(mc)}$ [g]	$\mu_{(Tc)}$ [g]	$\mu_{(Te)}$ [g]	$\mu_{(\pi)}$ [g]	$\mu_{(M_{total})}$	$\mu_{(M_{cal})}$
0,003	0,029	0,003	0,029	0,029	0,87	0,003	0,003

Tabla 9.10: Incertidumbre por resolución.

Debido a que no se contaba con información suficiente para evaluar la correlación entre las variables, se supusieron independientes, quedando como se muestra a continuación la expresión de la incertidumbre típica combinada, que refleja la contribución de cada fuente de incertidumbre considerada a la incertidumbre en la estimación del mensurando:

$$u_c(C_{HCR}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i)}$$

Donde los coeficientes de sensibilidad fueron evaluados en los valores medidos (la mejor estimación de cada magnitud de entrada):

$$m_{fm}, m_{mm}, T_{fm}, T_{cm}, T_{em}, \pi_m, M_{calm}, M_{totalm}$$

$$\begin{aligned}
u_c^2(C_{HCR}) = & \left(\frac{\partial C_{HCR}}{\partial m_f} \right)^2 \Big|_{m_{fm}} \cdot u^2(m_{fm}) + \left(\frac{\partial C_{HCR}}{\partial m_m} \right)^2 \Big|_{m_{mm}} \cdot u^2(m_{mm}) + \left(\frac{\partial C_{HCR}}{\partial M_{total}} \right)^2 \Big|_{M_{totalm}} \cdot u^2(M_{total}) + \\
& \left(\frac{\partial C_{HCR}}{\partial M_{cal}} \right)^2 \Big|_{M_{calm}} \cdot u^2(M_{cal}) + \left(\frac{\partial C_{HCR}}{\partial T_f} \right)^2 \Big|_{T_{fm}} \cdot u^2(T_{fm}) + \left(\frac{\partial C_{HCR}}{\partial T_c} \right)^2 \Big|_{T_{fm}} \cdot u^2(T_{fm}) + \\
& \left(\frac{\partial C_{HCR}}{\partial T_e} \right)^2 \Big|_{T_{em}} \cdot u^2(T_{em}) + \left(\frac{\partial C_{HCR}}{\partial \pi} \right)^2 \Big|_{\pi_m} \cdot u^2(\pi)
\end{aligned}$$

Reemplazando las expresiones de las derivadas parciales y los valores de la incertidumbre asociada a cada variable se obtiene la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}
u_c^2(C_{HCR}) = & \left\{ \left(\frac{C_{H2O}}{m_m} \right) \cdot \left[\frac{(T_e - T_f)}{(T_c - T_e)} + 1 \right] \right\}^2 \cdot (0,003g)^2 + \left\{ \left(\frac{C_{H2O}}{m_m^2} \right) \cdot \left[\frac{(\pi + m_f) \cdot (T_e - T_f)}{(T_e - T_c)} \right] + M_{total} - M_{cal} - \right. \\
& \left. m_f \right\}^2 \cdot (0,003g)^2 + \left(-\frac{C_{H2O}}{m_m} \right)^2 \cdot (0,003g)^2 + \left(\frac{C_{H2O}}{m_m} \right)^2 \cdot (0,003g)^2 + \\
& \left[-\frac{(\pi + m_f) \cdot C_{H2O}}{(T_c - T_e) \cdot m_m} \right]^2 \cdot (0,029^\circ C)^2 + \left[\frac{(\pi + m_f) \cdot C_{H2O} \cdot (T_e - T_f)}{(T_c - T_e)^2 \cdot m_m} \right]^2 \cdot (0,029^\circ C)^2 + \left\{ \left[\frac{(\pi + m_f) \cdot C_{H2O}}{(T_c - T_e) \cdot m_m} \right] \cdot \left[1 + \right. \right. \\
& \left. \left. \frac{(T_e - T_f)}{(T_c - T_e)} \right] \right\}^2 \cdot (0,029^\circ C)^2 + \left[\frac{C_{H2O} \cdot (T_e - T_f)}{(T_c - T_e) \cdot m_m} \right]^2 \cdot (0,87g)^2
\end{aligned}$$

En la Tabla 9.11 se detalla el valor de los coeficientes de sensibilidad que forman parte del cálculo de la incertidumbre combinada (Tabla 9.12).

Ensayo	$\left(\frac{\partial c_m}{\partial m_f}\right)_{m_{fm}}$	$\left(\frac{\partial c_m}{\partial m_m}\right)_{m_{mm}}$	$\left(\frac{\partial c_m}{\partial M_{totalm}}\right)_{M_{totalm}}$	$\left(\frac{\partial c_m}{\partial M_{calm}}\right)_{M_{calm}}$	$\left(\frac{\partial c_m}{\partial T_f}\right)_{T_{fm}}$	$\left(\frac{\partial c_m}{\partial T_c}\right)_{T_{cm}}$	$\left(\frac{\partial \pi}{\partial T_e}\right)_{T_{em}}$	$\left(\frac{\partial \pi}{\partial \pi}\right)_{T_{\pi m}}$
1	1.13E-02	-1.56E-01	-1.05E-02	1.05E-02	-6.31E-02	-5.12E-03	6.82E-02	8.50E-04
2	1.13E-02	-1.64E-01	-1.05E-02	1.05E-02	-6.26E-02	-4.51E-03	6.71E-02	7.57E-04
3	1.13E-02	-1.65E-01	-1.05E-02	1.05E-02	-5.75E-02	-4.07E-03	6.16E-02	7.45E-04
4	1.17E-02	-1.72E-01	-1.08E-02	1.08E-02	-5.88E-02	-5.08E-03	6.39E-02	9.32E-04
5	1.16E-02	-1.67E-01	-1.08E-02	1.08E-02	-6.19E-02	-4.81E-03	6.67E-02	8.36E-04
6	1.15E-02	-1.74E-01	-1.07E-02	1.07E-02	-5.91E-02	-4.18E-03	6.33E-02	7.60E-04
7	1.14E-02	-1.73E-01	-1.06E-02	1.06E-02	-6.10E-02	-4.58E-03	6.56E-02	8.00E-04
8	1.15E-02	-1.75E-01	-1.07E-02	1.07E-02	-6.77E-02	-5.02E-03	7.27E-02	7.96E-04
9	1.13E-02	-1.67E-01	-1.06E-02	1.06E-02	-5.54E-02	-3.93E-03	5.93E-02	7.52E-04
10	1.13E-02	-1.73E-01	-1.06E-02	1.06E-02	-6.28E-02	-4.35E-03	6.72E-02	7.32E-04
11	1.14E-02	-1.58E-01	-1.05E-02	1.05E-02	-5.97E-02	-4.80E-03	6.45E-02	8.45E-04
12	1.13E-02	-1.63E-01	-1.05E-02	1.05E-02	-5.58E-02	-4.09E-03	5.99E-02	7.72E-04

Tabla 9.11: Coeficientes de sensibilidad.

$u_c(c_{HCR}) \left[\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}} \right]$												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	PROMEDIO
0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,002	0,003	0,003	0,003	0,003

Tabla 9.12: Incertidumbre combinada.

Finalmente para definir un intervalo en torno al valor del mensurando en el que se espera encontrar una fracción importante de la distribución de valores se calculó la incertidumbre expandida. Suponiendo que la distribución de probabilidad del mensurando es normal, se define el factor de cobertura k_p para un nivel de confianza de aproximadamente 95%, quedando $k_p = 2$. De esta manera, el valor del calor específico estimado se expresa como:

$$c_{HCR} = 0,200 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}} \pm 0,006 \frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}}$$

10 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los pasos 6 y 8 de la metodología presentada en la sección 8.2.2 fueron difíciles de ejecutar con la misma precisión de manera sistemática. Fue importante la rigurosidad al revolver la muestra en el agua caliente (paso 6) debido a que se formaban burbujas superficiales que dificultaban que el agua penetrara el material (Figura 10.1). Sin embargo, debido a la baja adherencia entre los agregados del



Figura 10.1: Foto de burbujas adheridas a una muestra.

material, hubo que ser cuidadoso en la manipulación de las muestras para minimizar la pérdida de material. Por esta razón, en ningún ensayo se llegó a los 100°C debido a que no se quiso exponer a las muestras al burbujeo continuo del agua en ebullición porque era difícil revolver y evitar que la muestra se golpeará contra la pared del recipiente. A pesar del cuidado en la manipulación de las muestras, pudo registrarse una pérdida de material entre ensayos sucesivos, siendo mayor la pérdida para las muestras de hormigón con caucho reciclado (Tabla 10.1). Esto puede explicarse por la baja adherencia entre las partículas de caucho y la matriz cementicia.

	HCR1	HCR2	HCR3	HCR4	HS1	HS2	HS3	HS4	HS5
MAX [g]	94.92	92.56	93.35	94.66	117.01	116.14	118.18	117.10	116.80
MIN [g]	95.34	93.10	94.38	95.11	117.07	116.71	118.41	117.39	117.57
PÉRDIDA [%]	-0.4	-0.6	-1.1	-0.5	-0.1	-0.5	-0.2	-0.2	-0.7
PÉRDIDA PROMEDIO [%]	-0.6				-0.3				

Tabla 10.1: Pérdida de material.

Por otro lado, al pasar rápidamente la muestra desde el agua caliente al calorímetro permitió minimizar la pérdida de agua contenida por la muestra pero fue inevitable perder líquido y en ningún caso pudo cuantificarse esa cantidad.

En cuanto a los valores obtenidos de c_{HCR} y c_{HS} , se observó que:

- 1) Los valores de calor específico obtenidos para las muestras de hormigón simple y hormigón con caucho, c_{HCR} fue un 17% mayor que c_{HS} . Esto es consistente con el hecho de que las muestras de HCR contenían caucho, que tiene un calor específico mayor que el de la arena. En la Tabla 10.2 se muestran los valores consultados en distintas fuentes con el único fin de tener un orden de valores. Para poder entender mejor la razón de los resultados obtenidos se tendría que estudiar las propiedades térmicas de los agregados involucrados.
- 2) La metodología adoptada para la medición del calor específico permitió obtener valores cercanos a los consultados en distintas fuentes (Tabla 10.2). Sin embargo, no puede realizarse una comparación más allá de la realizada, ya que carecería de rigor científico al desconocer las propiedades térmicas de los agregados utilizados en el desarrollo de este proyecto como también la dosificación, metodología de medición y propiedades de los agregados utilizados en las fuentes consultadas.

Calor específico [$\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}}$]	Hormigón	Arena	Caucho	Fuente
0,238	✓			("http://cte-web.iccl.es/cteweb.php," n.d.)
0,212	✓			("Calor específico," n.d.-a)
0,199	✓			("Propiedades termicas de algunos materiales de construcción y aislantes," n.d.)
210	✓			("Calor específico," n.d.-b)
0,200		✓		("Tabla de calores específicos," n.d.)
0,191		✓		("6. Efectos del calor," n.d.)
0,199		✓		("Calor específico," n.d.-a)
0,358			✓ (Celular)	("Aislamiento Térmico Erica," n.d.)
0,262			✓ (Natural)	("CTE WEB," n.d.)
0,293			✓ (Neumático)	(Yang et al., 1995)

Tabla 10.2: Calor específico de hormigón, arena y caucho de distintas fuentes.

11 CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

11.1 CONCLUSIONES

Se confirmó la premisa de que la incorporación de caucho a los mampuestos de hormigón genera la disminución de su resistencia a compresión y mejora su capacidad aislante. La metodología de ensayo empleada, permitió cuantificar la variación de ambas propiedades.

La resistencia a compresión de los mampuestos no superó el límite impuesto por la Norma ASTM C90 (ASTM International, 2003a) para considerarlos como portantes (13,1MPa). Esto puede explicarse por tres motivos. El proceso de producción como fue aplicado tuvo limitaciones en la frecuencia de vibración y presión, lo cual no permitió analizar la influencia de esos dos parámetros que se encuentran relacionados a un aumento de la densidad del material y por lo tanto en un aumento de resistencia (Ling, 2012). Por otro lado, la incorporación de caucho redujo considerablemente el valor de la propiedad mecánica mencionada. Este hecho puede explicarse debido a la baja adherencia entre la pasta cementicea y las partículas de caucho, y la alta elasticidad de éste, que permite el desarrollo de micro fracturas en la matriz cementicea. Finalmente, la relación Altura/Ancho también influyó en la disminución de la resistencia de los mampuestos. Un valor superior a 0,5 no permitió la influencia de la sobrerresistencia debida a la fricción entre las caras de los mampuestos y los cabezales de la prensa.

En cuanto a la metodología empleada para medir el calor específico de las muestras de hormigón con y sin caucho puede decirse que debe mejorarse. La pérdida de material entre ensayos sucesivos, la poca certeza de que el material absorbe agua al máximo de su capacidad durante el ensayo debido a las burbujas y la pérdida de una porción del agua absorbida al introducir las muestras al calorímetro, son los puntos en los que se tuvo menos control. Sin embargo, la metodología permitió obtener valores razonablemente confiables que permiten concluir que la incorporación de caucho genera un aumento del calor específico del material.

11.2 TRABAJOS A FUTURO

A partir del este proyecto se plantean los siguientes trabajos a futuro:

- Mejoramiento del equipo de vibrocompactación: Permitir variación de frecuencia y presión.
- Estudio sobre la variación de las propiedades mecánicas de mampuestos con incorporación de caucho reciclado en función de la frecuencia de vibración, tiempo de vibración y presión de compactación.
- Mejoramiento de la metodología para la medición del calor específico de muestras de hormigón: Evitar pérdida de material, asegurar total absorción de agua durante el ensayo y evitar o cuantificar la pérdida de agua absorbida al pasar las muestras al calorímetro.
- Determinación del calor específico de los agregados y cemento utilizados para las mezclas.
- Comparación de valores de calor específico de una dosificación medidos por dos metodologías: Una estandarizada y la desarrollada durante este proyecto.
- Realizar mediciones de conductividad térmica.
- Realizar mediciones de absorción de energía solar.

12 ANEXO 1: ANALISIS GRANULOMÉTRICO

A continuación se presentan los datos a partir de los cuales se realizó el análisis granulométrico.

TAMAÑO DE TAMIZ [mm]	RETENIDO [g]	PASANTE [g]	PASANTE [%]	LÍMITE INF. [%]	LÍMITE SUP. [%]
9.525	0.00	1186.91	100.00	100	100
4.75	15.87	1171.04	98.66	95	100
2.36	196.95	974.09	82.07	80.00	100
1.18	146.10	827.99	69.76	50.00	85
0.6	163.11	664.88	56.02	25.00	60
0.3	261.69	403.19	33.97	5.00	30
0.15	356.09	47.10	3.97	0.00	10
0.075	41.52	5.58	0.47	-	-
BANDEJA	5.58	0.00	0.00	-	-
TOTAL	1186.91				
PESO DE LA MUESTRA [g]	1189.68				
PÉRDIDA DE MUESTRA [%]	0.23				

Tabla 12.1: Análisis granulométrico de agregado fino.

TAMAÑO DE TAMIZ [mm]	RETENIDO [g]	PASANTE [g]	PASANTE [%]	LIMITE INF. [%]	LIMITE SUP. [%]
9.525	0.00	1800.67	100.00	85	100
4.75	1750.22	50.45	2.80	10	30
2.36	50.45	0.00	0.00	0	10
1.18	0.00	0.00	0.00	0	5
0.6	0.00	0.00	0.00	0	0
0.3	0.00	0.00	0.00	-	-
0.15	0.00	0.00	0.00	-	-
0.075	0.00	0.00	0.00	-	-
BANDEJA	0.00	0.00	0.00	-	-
TOTAL	1800.67				
PESO DE LA MUESTRA [g]	1803.6				
PÉRDIDA DE MUESTRA [%]	0.16				

Tabla 12.2: Análisis granulométrico de agregado grueso.

ABERTURA NOMINAL	RETENIDO [g]	PASANTE [g]	PASANTE [%]
4.75	0	1995	100.00
2.36	0	1995	100.00
1.18	1440	555	27.82
0.6	545	10	0.50
0.425	10	0	0.00
0.3	0	0	0.00
0.15	0	0	0.00
0.075	0	0	0.00
TOTAL	1995		
PESO DE LA MUESTRA [g]	2000		
PÉRDIDA DE LA MUESTRA	0.25		

Tabla 12.3: Análisis granulométrico de caucho reciclado.

13 ANEXO 2: PROCESO DE DOSIFICACIÓN

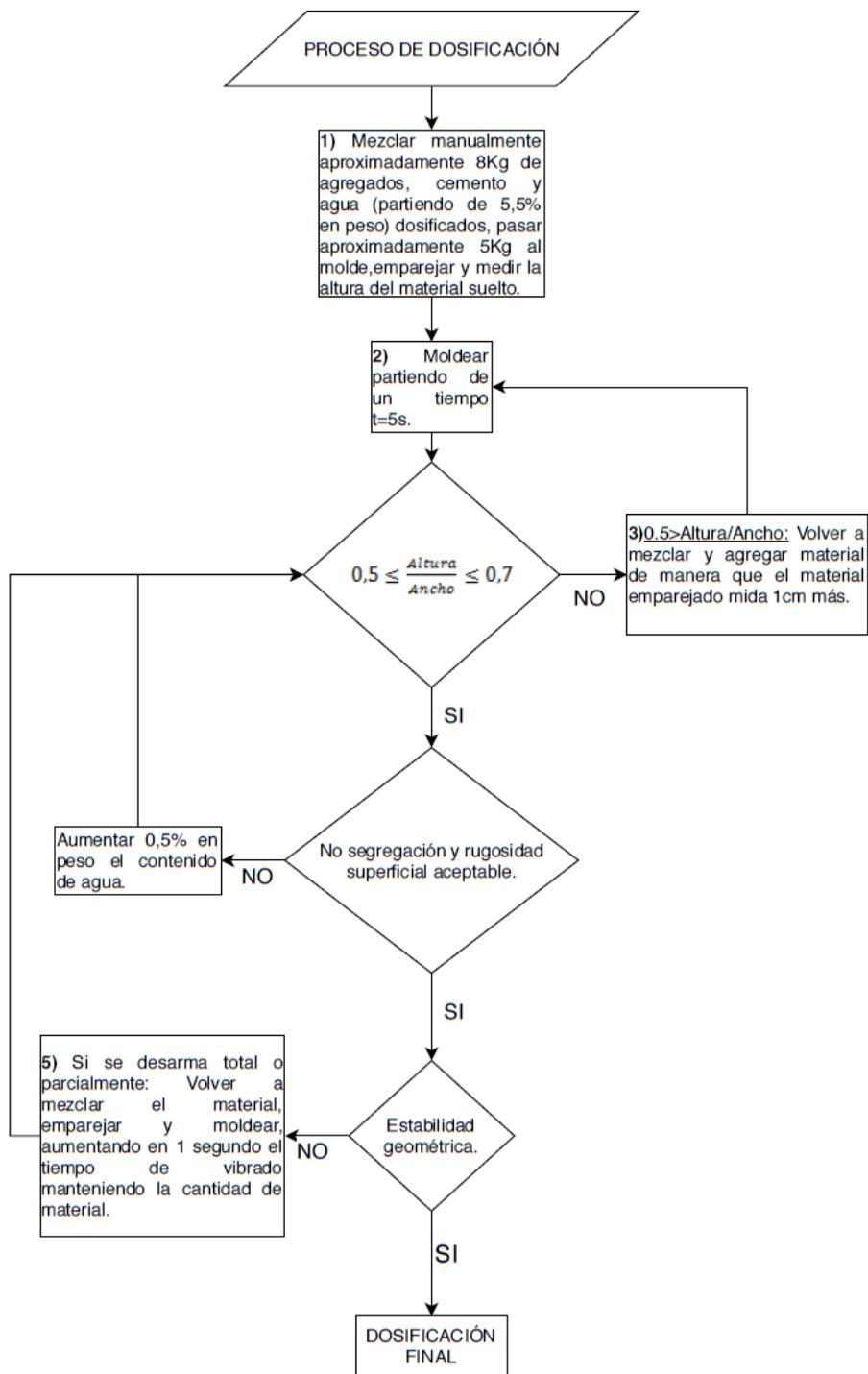


Figura 13.1: Esquema de proceso de dosificación.

14 ANEXO 3: MEDICION DEL EQUIVALENTE EN AGUA DEL CALORIMETRO

A continuación se presentan los gráficos correspondientes a los datos de cada ensayo. El criterio adoptado para la determinación de la Temperatura T_c y T_f fue el siguiente:

* T_c : Punto de inflexión de la curva T_c .

* T_f y T_e : Valor que se registra durante 20 segundos de manera continua.

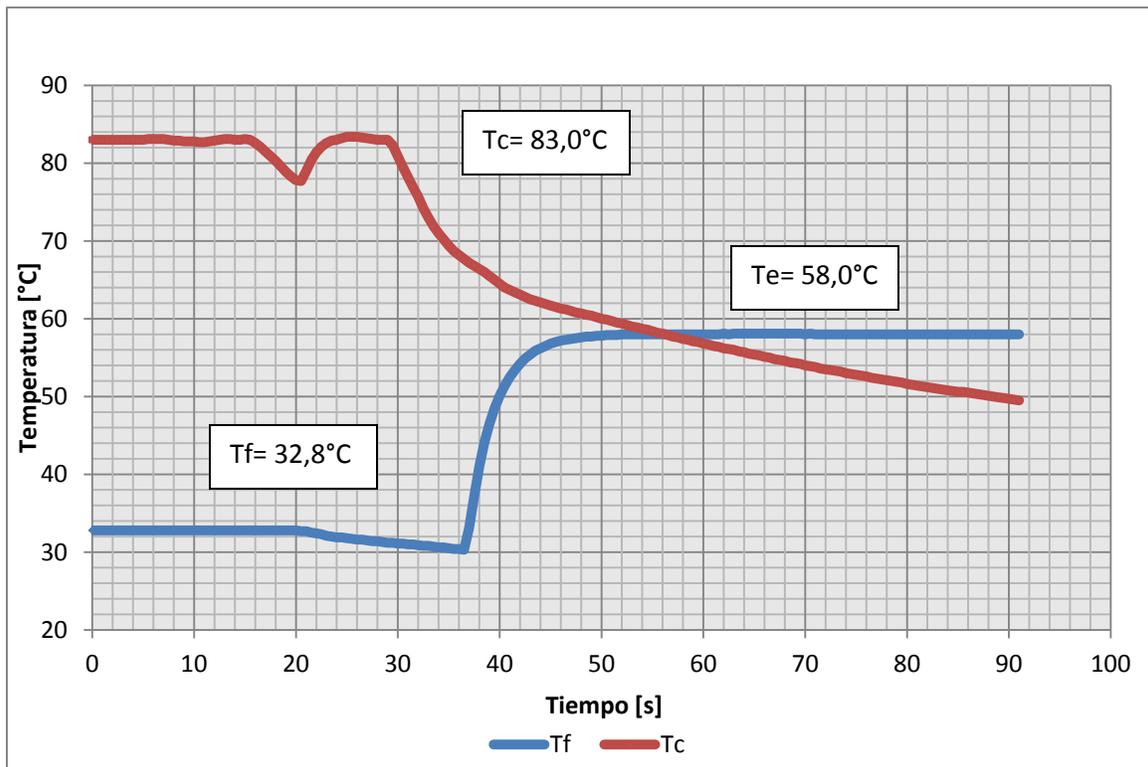


Figura 14.1: Gráfico de ensayo N°1- T_f , T_c , Tiempo.

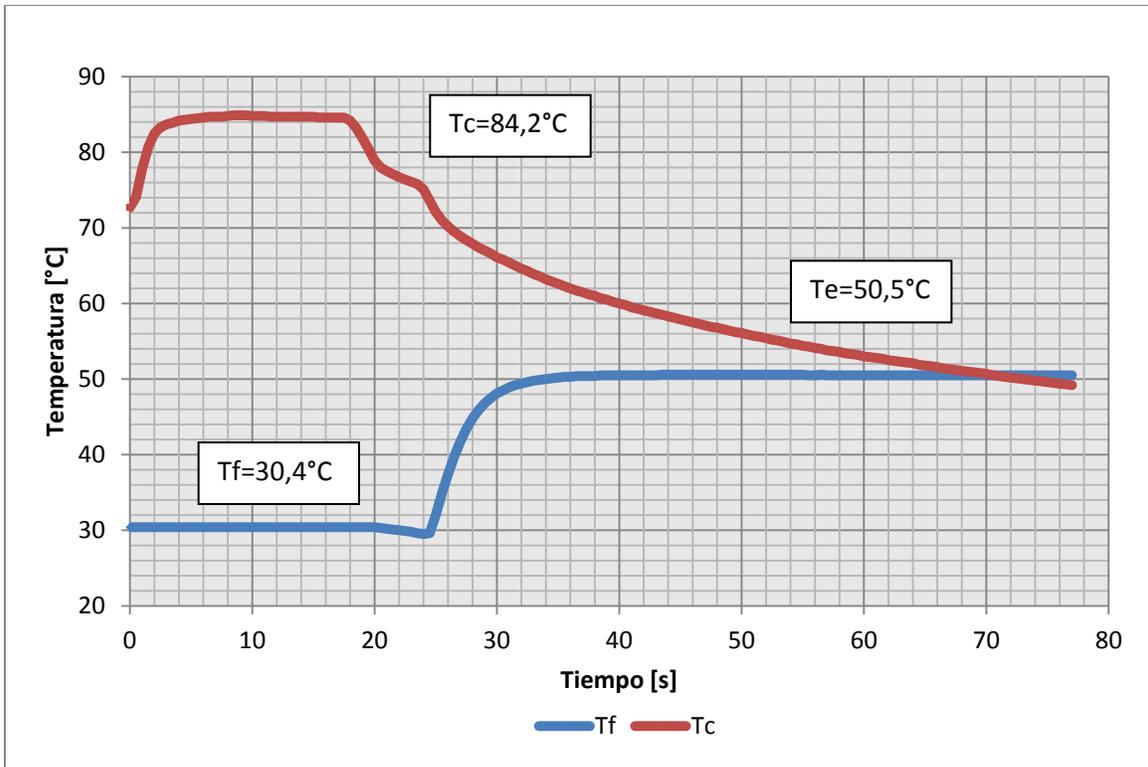


Figura 14.2: Gráfico de ensayo N°2- Tf, Tc, Tiempo.

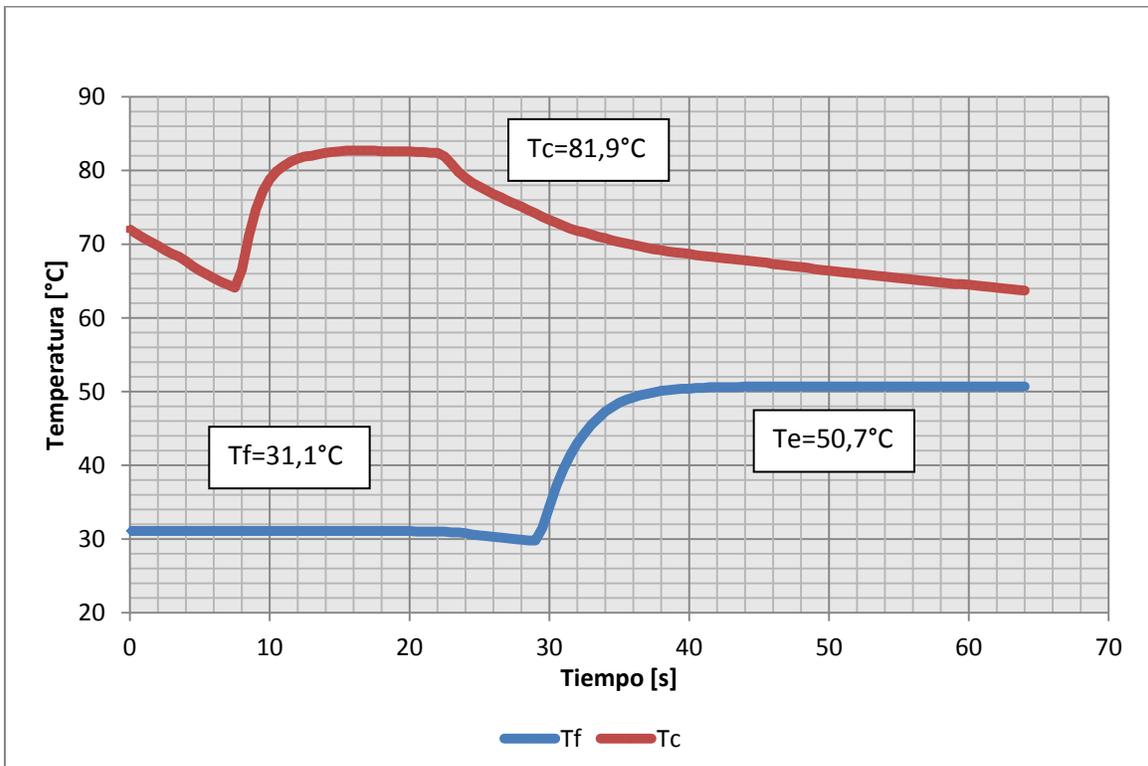


Figura 14.3: Gráfico de ensayo N°3- Tf, Tc, Tiempo.

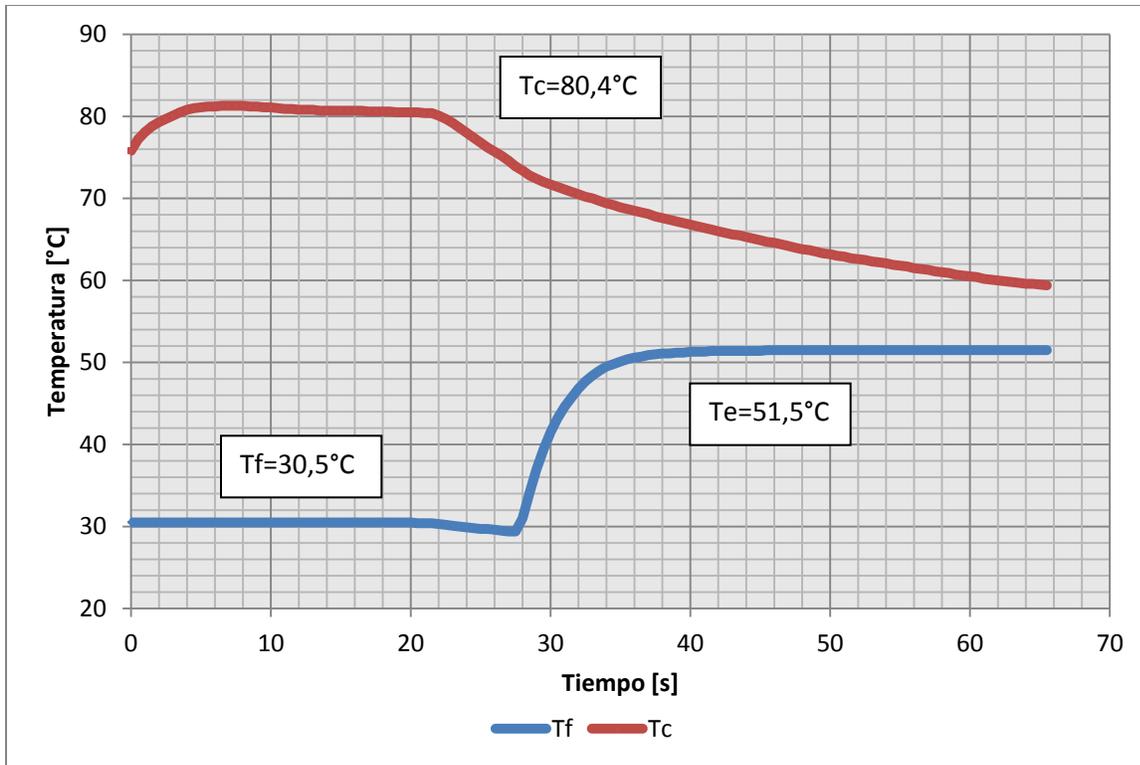


Figura 14.4: Gráfico de ensayo N°4- Tf, Tc, Tiempo.

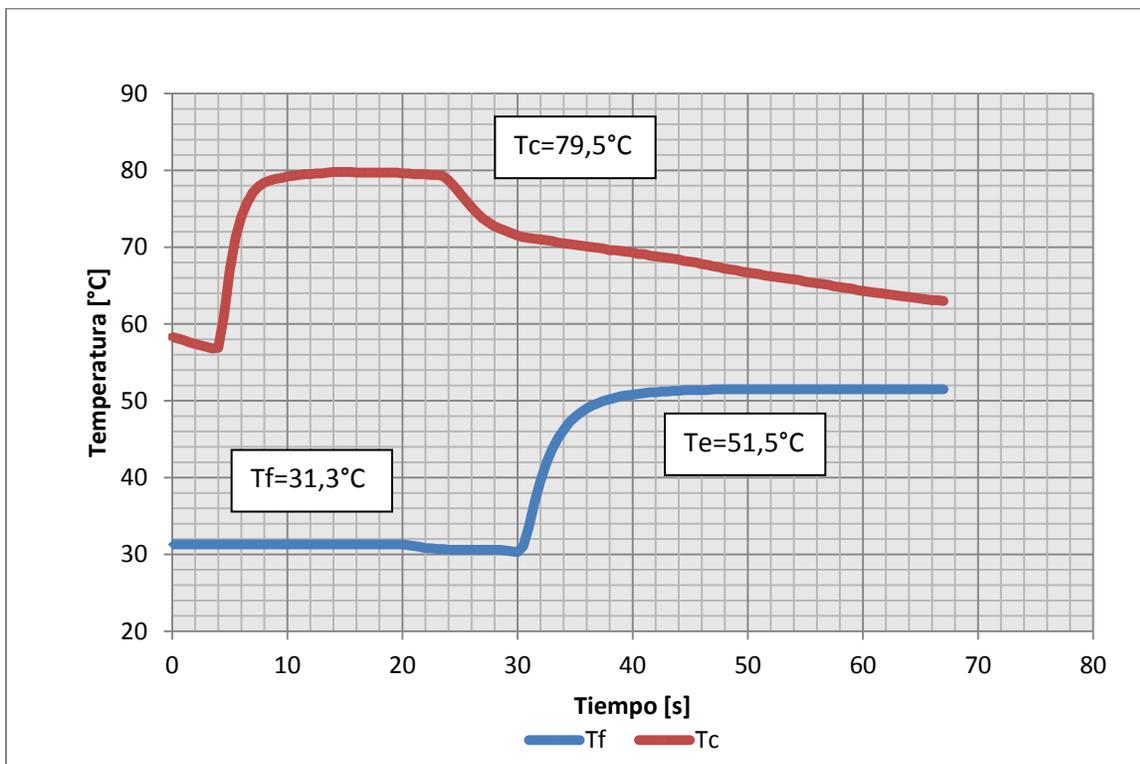


Figura 14.5: Gráfico de ensayo N°5- Tf, Tc, Tiempo.

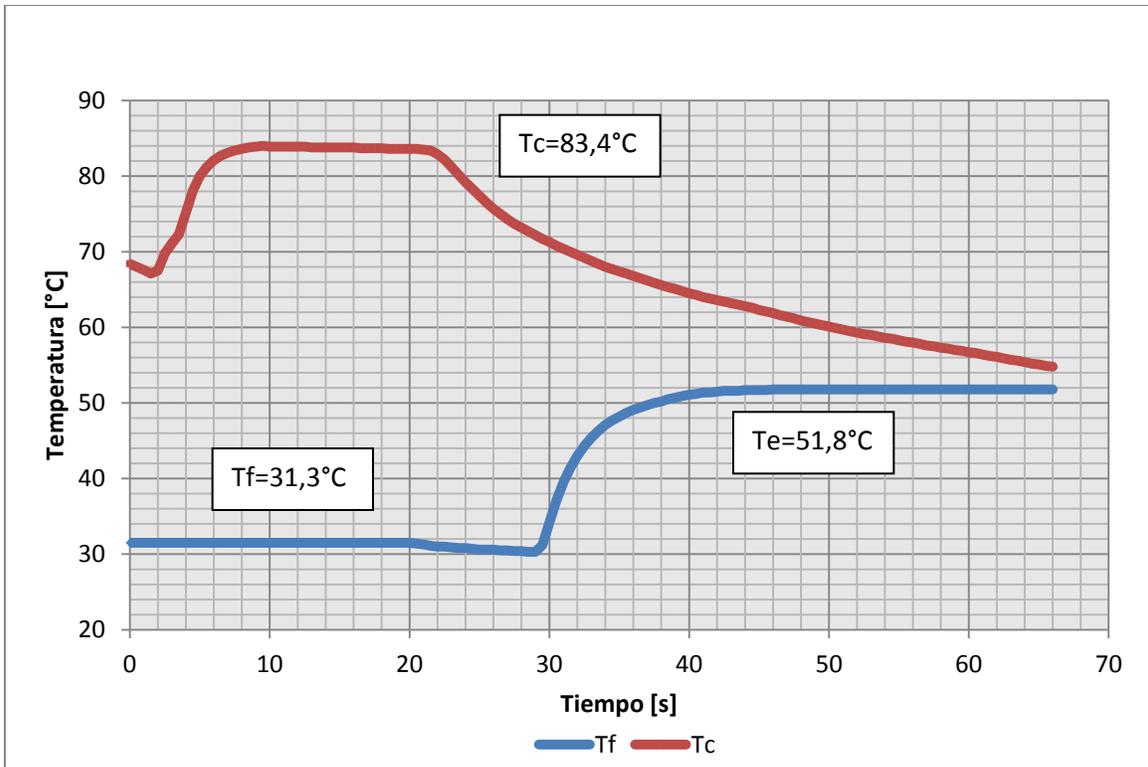


Figura 14.6: Gráfico de ensayo N°6- Tf, Tc, Tiempo.

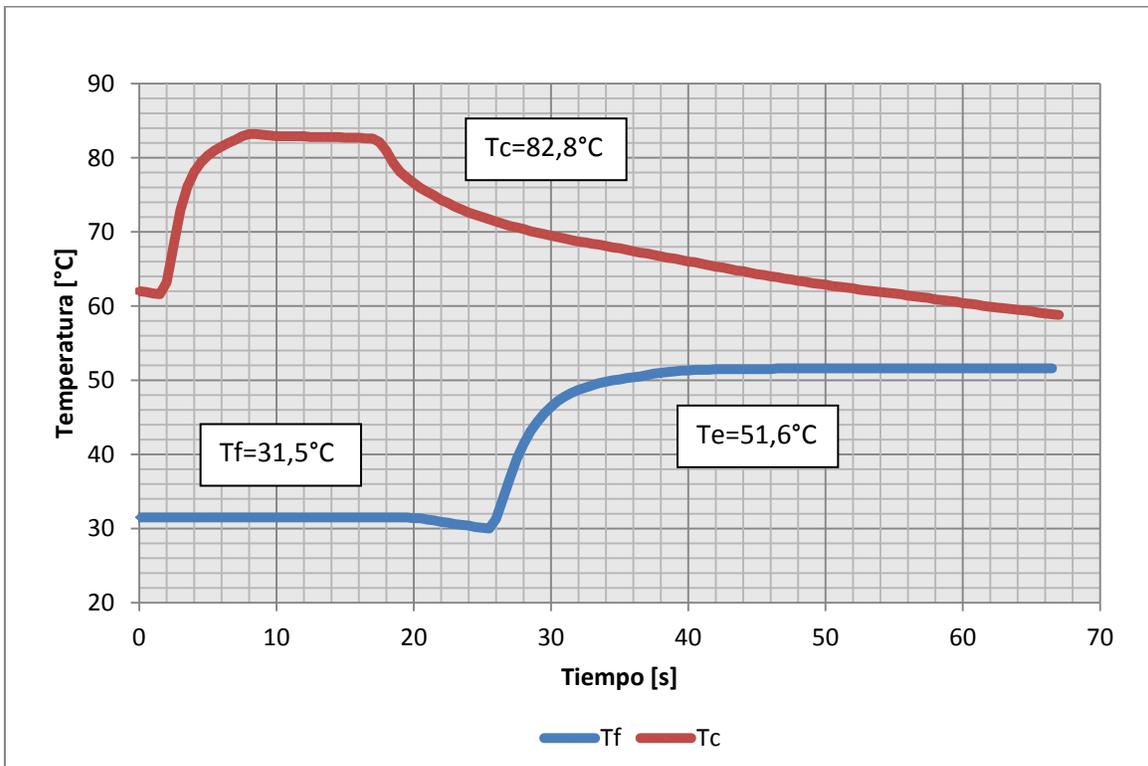


Figura 14.7: Gráfico de ensayo N°7- Tf, Tc, Tiempo.

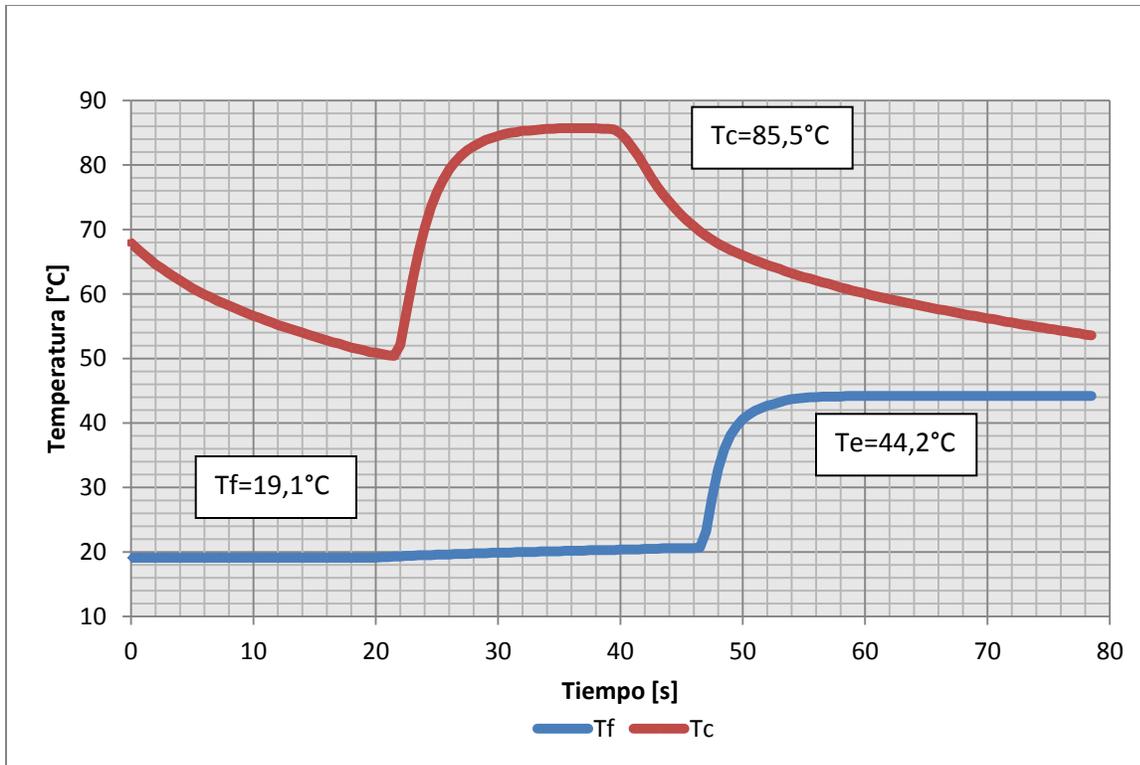


Figura 14.8: Gráfico de ensayo N°8- Tf, Tc, Tiempo.

15 ANEXO 4: ECUACIÓN DE INCERTIDUMBRE COMBINADA

Se define la relación funcional $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$ que vincula el mensurando Y (equivalente en agua del calorímetro o calor específico) con las magnitudes medidas directamente (magnitudes de entrada). La estimación del mensurando Y , representada por y se obtiene a partir de las estimaciones de entrada x_1, x_2, \dots, x_N . A partir de N mediciones, puede obtenerse $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_N$ así como N valores de $y_i = y(x_i)$ ($i = 1, 2, \dots, N$), mediante los cuales se obtiene la mejor estimación de y .

Suponiendo que la incertidumbre asociada a cada magnitud de entrada es chica, puede aproximarse y mediante su serie de Taylor. Evaluando la expresión en la mejor estimación de las magnitudes de entrada y despreciando los términos de orden superior a uno:

$$y_i = y(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_N) + \left(\frac{\partial y}{\partial x_1}\right)\bigg|_{\bar{x}_1} \cdot (x_{1i} - \bar{x}_1) + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2}\right)\bigg|_{\bar{x}_2} \cdot (x_{2i} - \bar{x}_2) + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_N}\right)\bigg|_{\bar{x}_N} \cdot (x_{Ni} - \bar{x}_N) \quad (15.1)$$

Con esta aproximación, el promedio de y es:

$$\begin{aligned} \bar{y} &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \\ &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_N) + \left(\frac{\partial y}{\partial x_1}\right)\bigg|_{\bar{x}_1} \cdot (x_{1i} - \bar{x}_1) + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2}\right)\bigg|_{\bar{x}_2} \cdot (x_{2i} - \bar{x}_2) + \dots \\ &\quad + \left(\frac{\partial y}{\partial x_N}\right)\bigg|_{\bar{x}_N} \cdot (x_{Ni} - \bar{x}_N) \end{aligned}$$

El primer término es simplemente $\bar{y} = y(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_N)$ mientras que los otros son igual a cero por la propiedad que tienen los residuos $\left(\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial y}{\partial x_1}\right)\bigg|_{\bar{x}_1} \cdot (x_{1i} - \bar{x}_1) + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2}\right)\bigg|_{\bar{x}_2} \cdot (x_{2i} - \bar{x}_2) + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_N}\right)\bigg|_{\bar{x}_N} \cdot (x_{Ni} - \bar{x}_N) = 0\right)$. De esta manera:

$$\bar{y} = y(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_N) \quad (15.2)$$

La incertidumbre para N valores de y se define como:

$$u(y) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2$$

Sustituyendo 15.1 y 15.2:

$$u(y)^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \right) \Big|_{\bar{x}_1} \cdot (x_{1i} - \bar{x}_1) + \left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \right) \Big|_{\bar{x}_2} \cdot (x_{2i} - \bar{x}_2) + \dots + \left(\frac{\partial y}{\partial x_N} \right) \Big|_{\bar{x}_N} \cdot (x_{Ni} - \bar{x}_N) \right]^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{h=1}^N \sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right) \Big|_{\bar{x}_i} \right]^2 \cdot (x_{hi} - \bar{x}_h)^2 + 2 \cdot \frac{1}{N} \cdot \sum_{g=1}^{N-1} \sum_{h=1+1}^N \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial y}{\partial x_g} \right) \cdot \left(\frac{\partial y}{\partial x_h} \right) \cdot (x_{gi} - \bar{x}_g) \cdot (x_{hi} - \bar{x}_h)$$

Que es equivalente a:

$$u(y)^2 = \sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right) \Big|_{\bar{x}_i} \right]^2 \cdot [u(x_i)]^2 + 2 \cdot \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=1}^N \left[\left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right) \Big|_{\bar{x}_i} \right]^2 \cdot \left[\left(\frac{\partial y}{\partial x_j} \right) \Big|_{\bar{x}_j} \right]^2 \cdot u(x_i) \cdot u(x_j) \quad (15.3)$$

Si no se contempla la correlación entre variables, la ecuación 15.3 queda de la siguiente manera:

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[\left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right) \Big|_{\bar{x}_i} \right]^2 \cdot [u(x_i)]^2}$$

16 ANEXO 5: MEDICION DEL CALOR ESPECÍFICO

A continuación se presentan los gráficos correspondientes a los datos de cada ensayo. El criterio adoptado para la determinación de la Temperatura T_c y T_f fue el siguiente:

* T_c : Punto de inflexión de la curva T_c .

* T_f y T_e : Valor que se registra durante 20 segundos de manera continua.

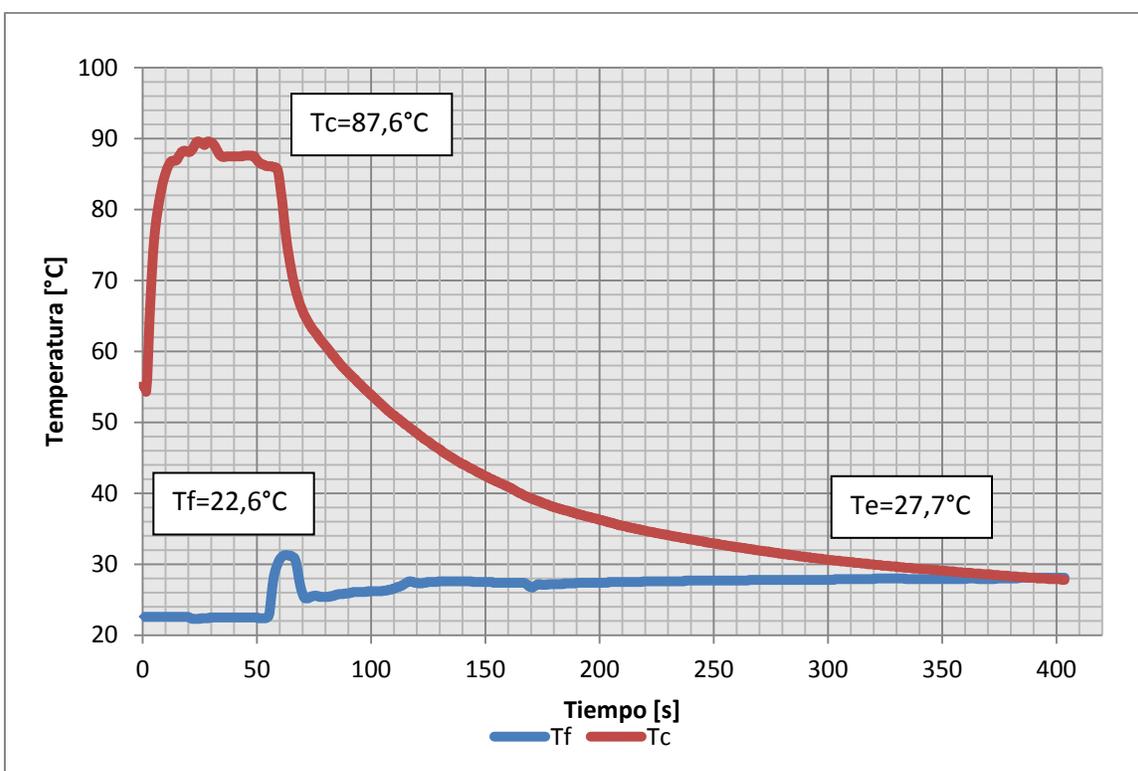


Figura 16.1: Gráfico de ensayo HS 1.1- T_f , T_c , Tiempo.

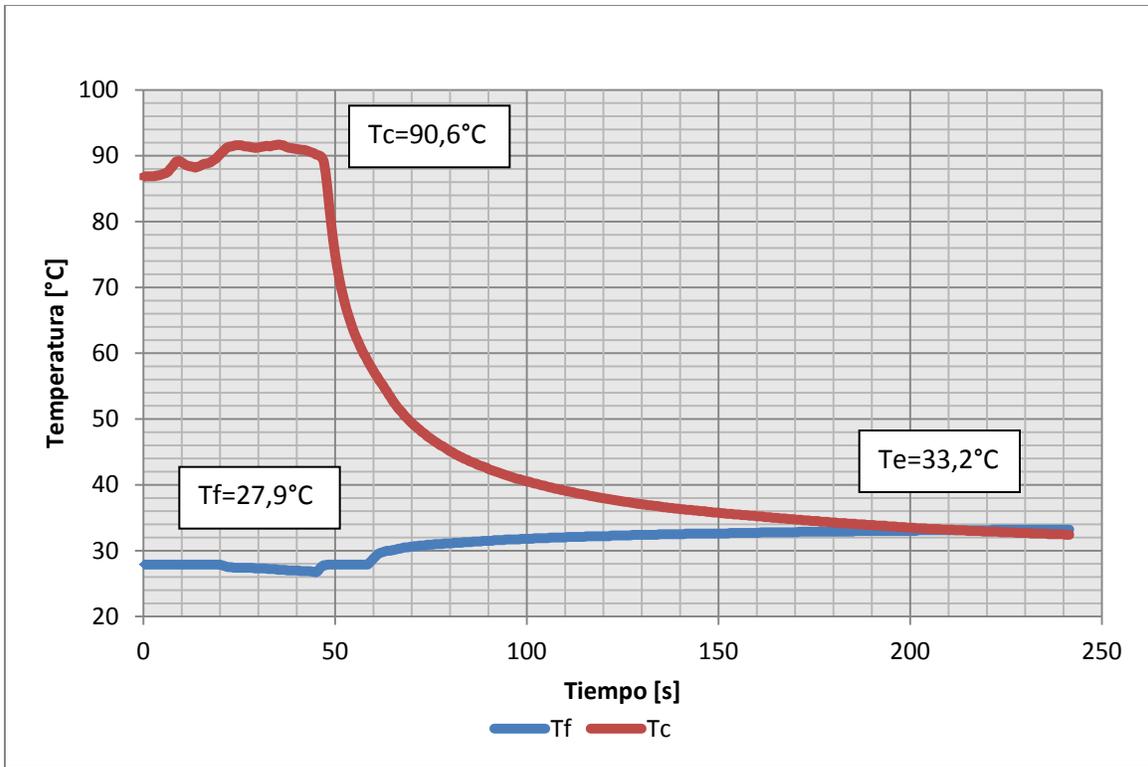


Figura 16.2: Gráfico de ensayo HS 1.2- Tf, Tc, Tiempo.

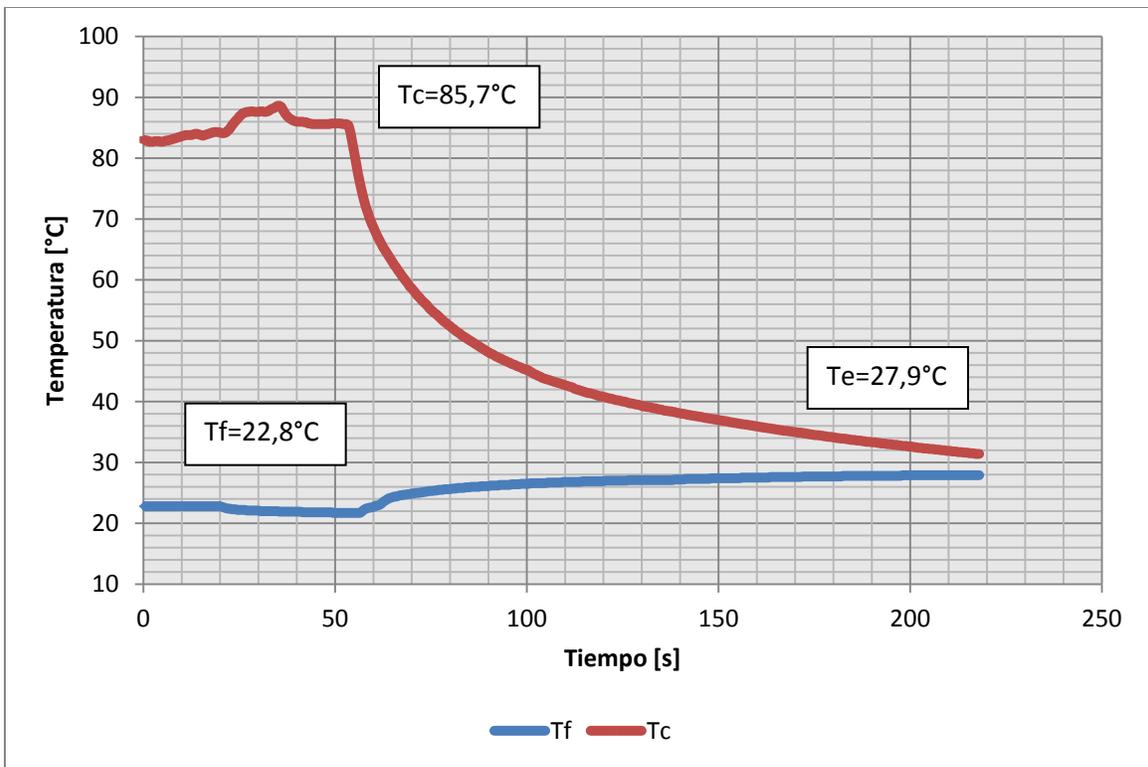


Figura 16.3: Gráfico de ensayo HS 2.1- Tf, Tc, Tiempo.

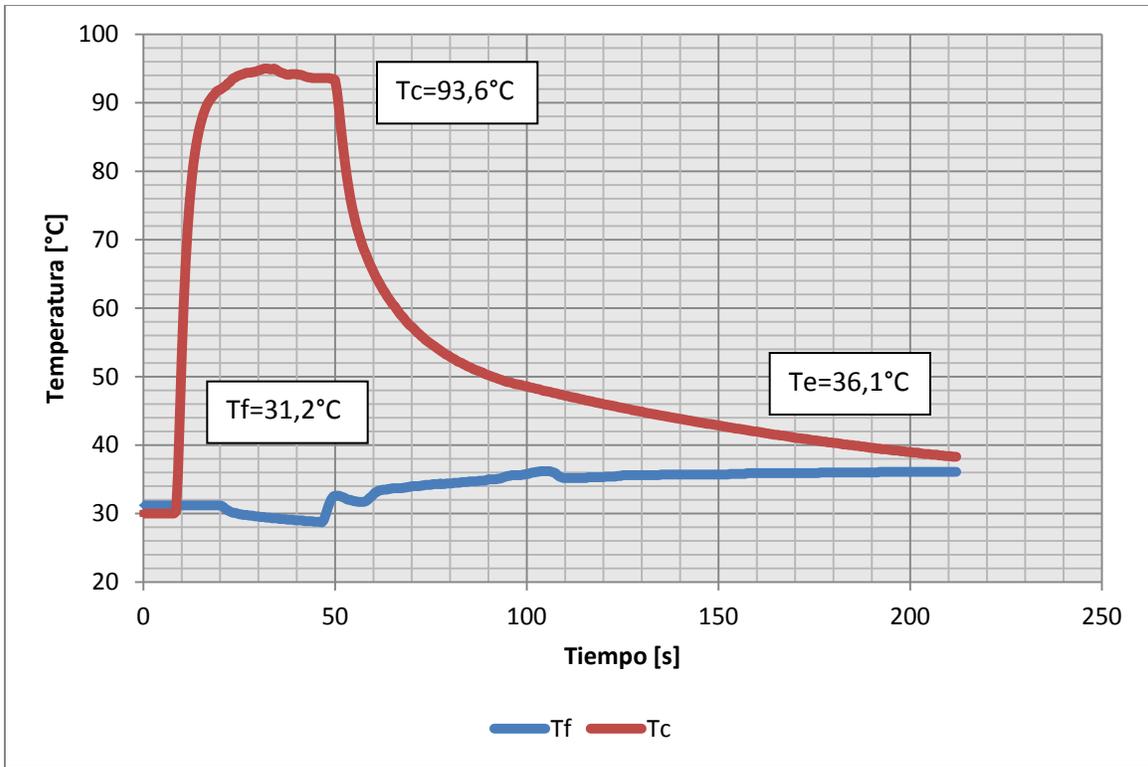


Figura 16.4: Gráfico de ensayo HS 2.2- Tf, Tc, Tiempo.

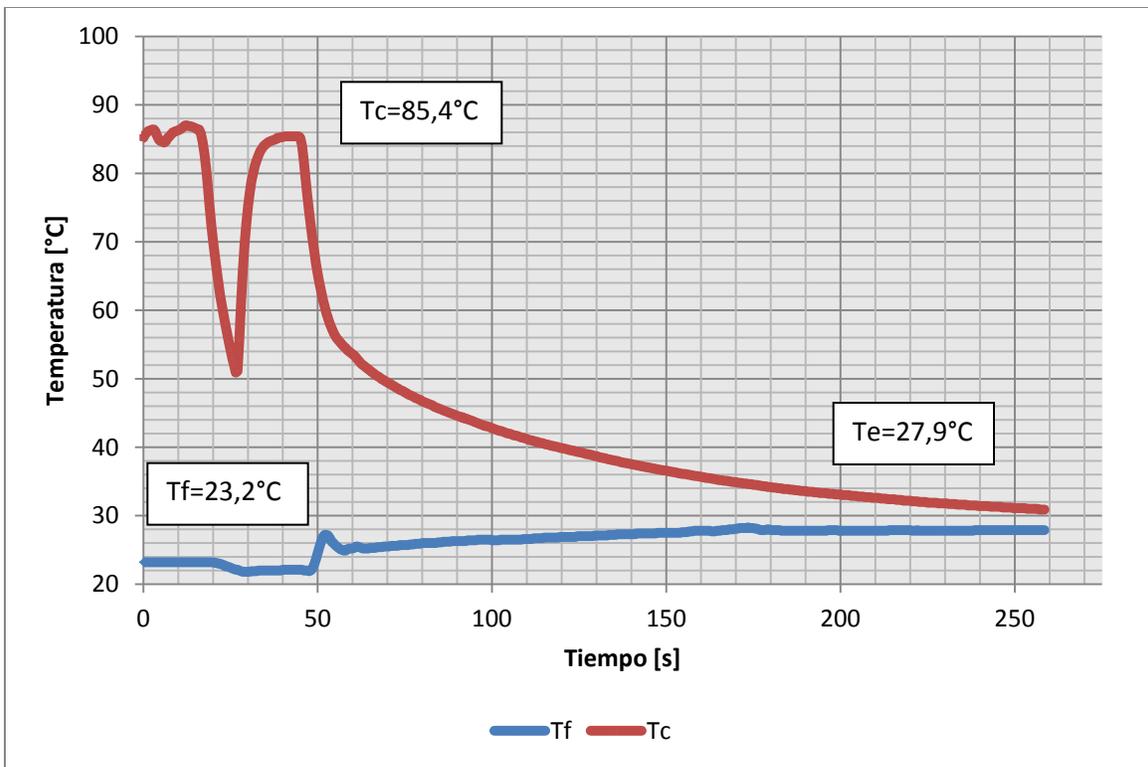


Figura 16.5: Gráfico de ensayo HS 3.1- Tf, Tc, Tiempo.

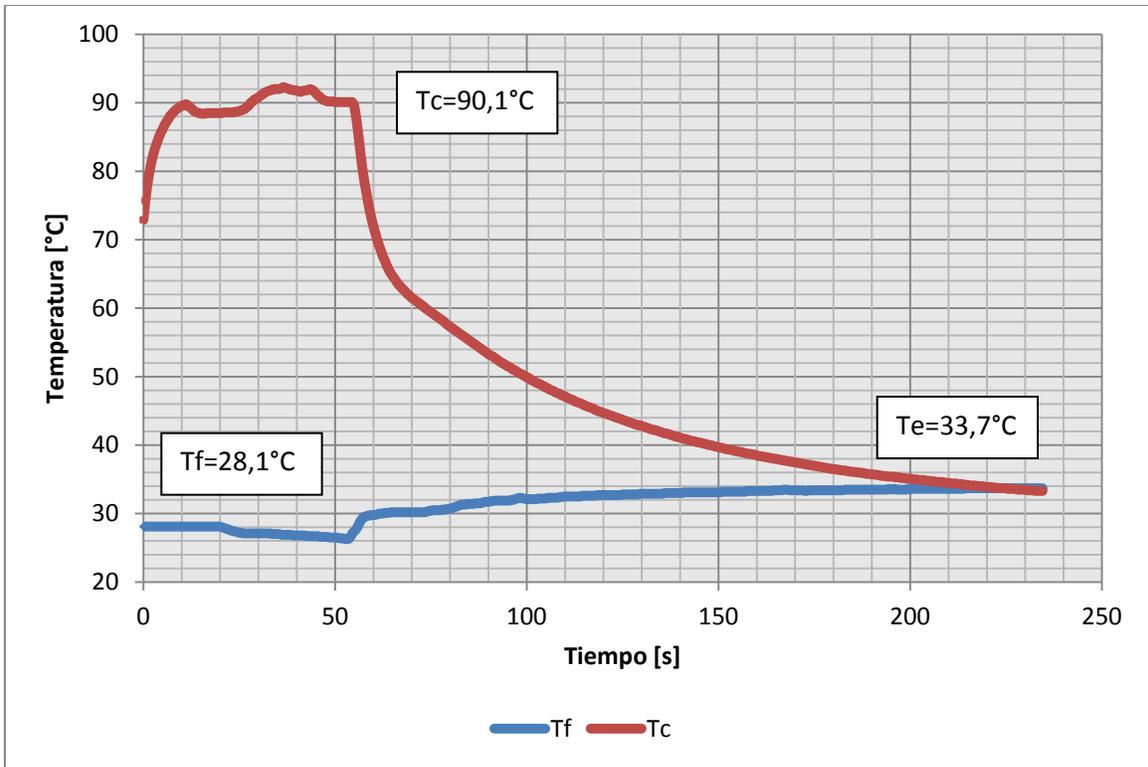


Figura 16.6: Gráfico de ensayo HS 3.2- Tf, Tc, Tiempo.

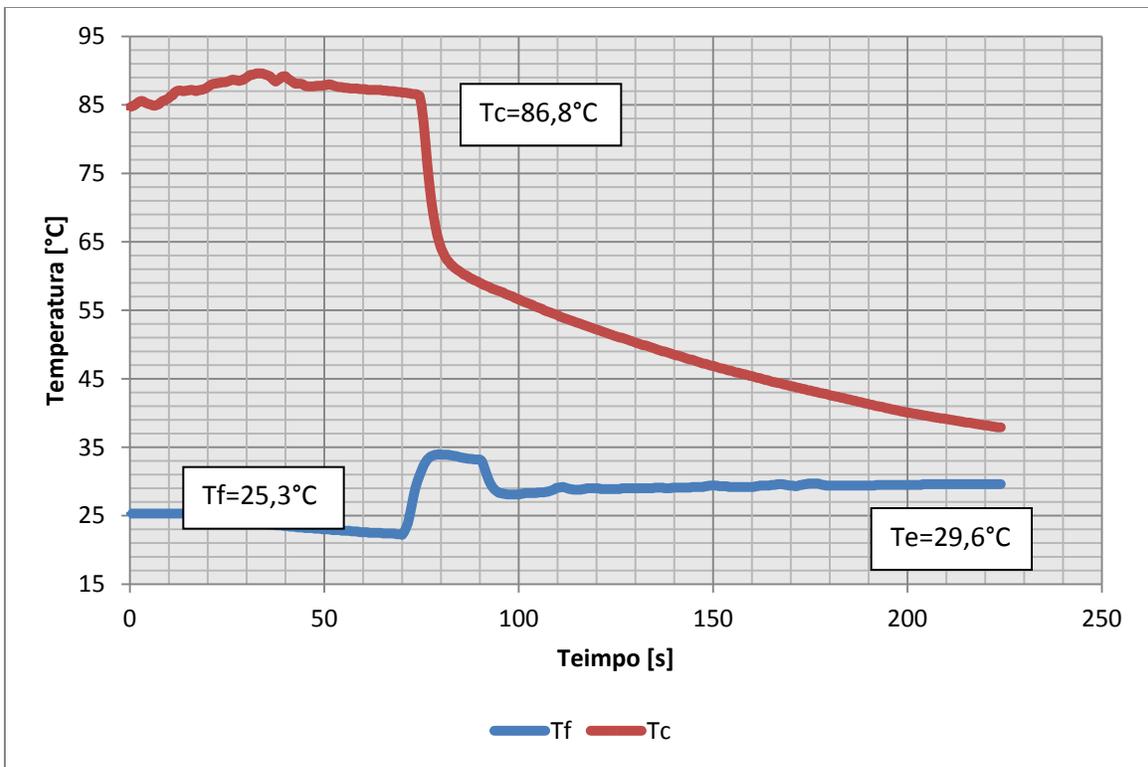


Figura 16.7: Gráfico de ensayo HS 4.1- Tf, Tc, Tiempo.

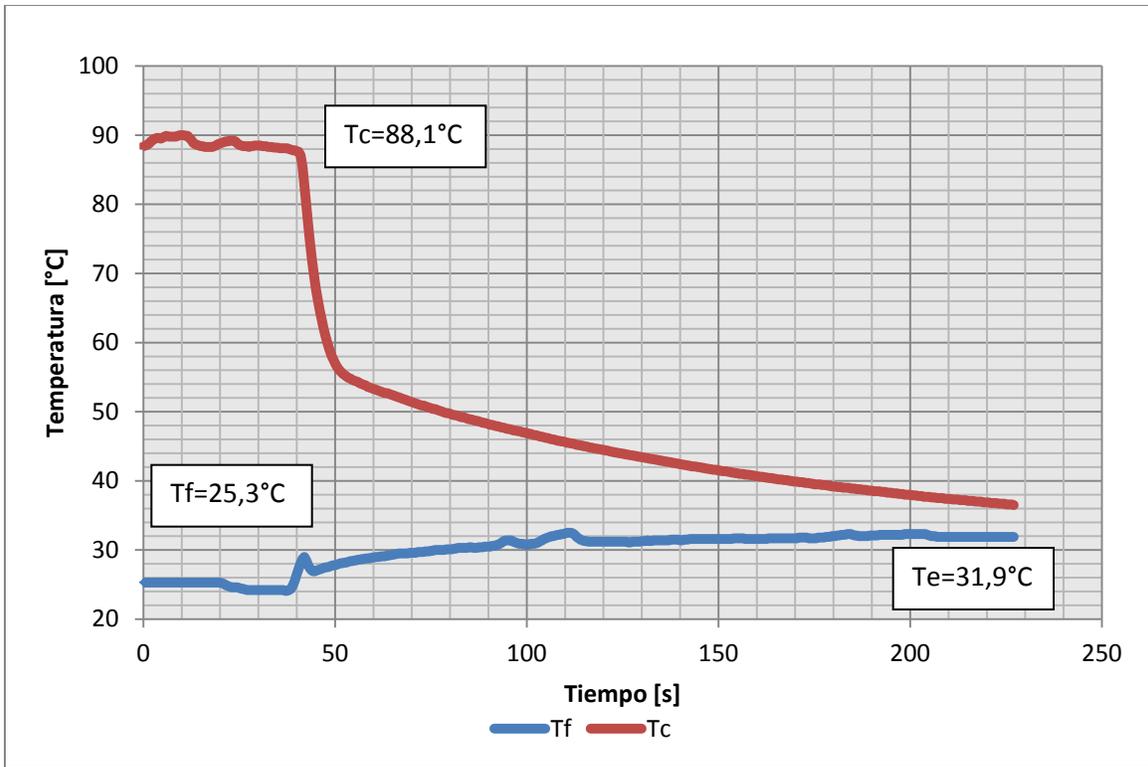


Figura 16.8: Gráfico de ensayo HS 4.2- Tf, Tc, Tiempo.

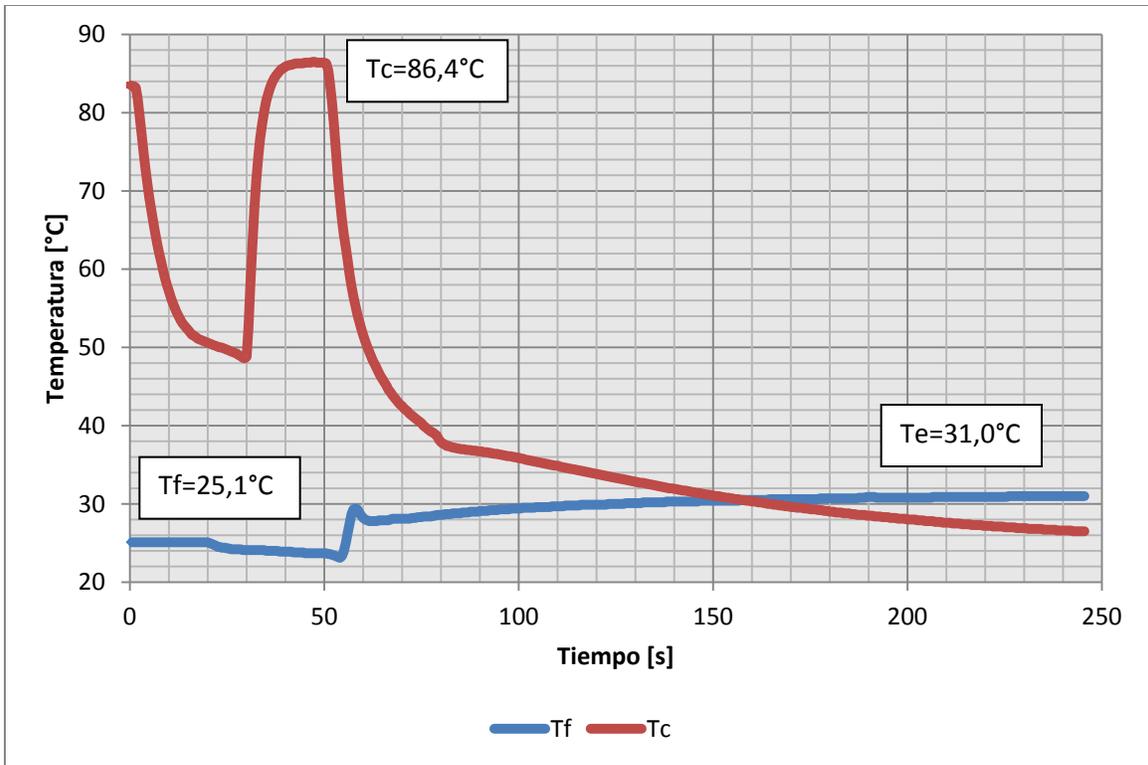


Figura 16.9: Gráfico de ensayo HS 5.1- Tf, Tc, Tiempo.

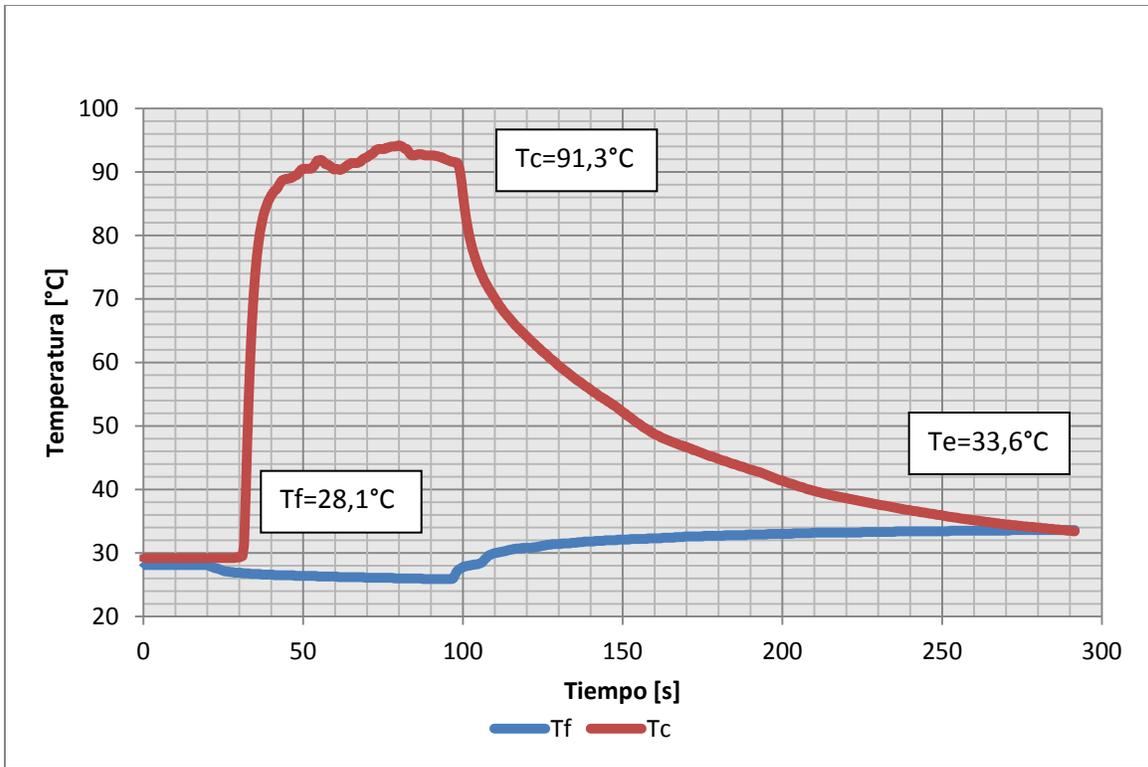


Figura 16.10: Gráfico de ensayo HS 5.2- Tf, Tc, Tiempo.

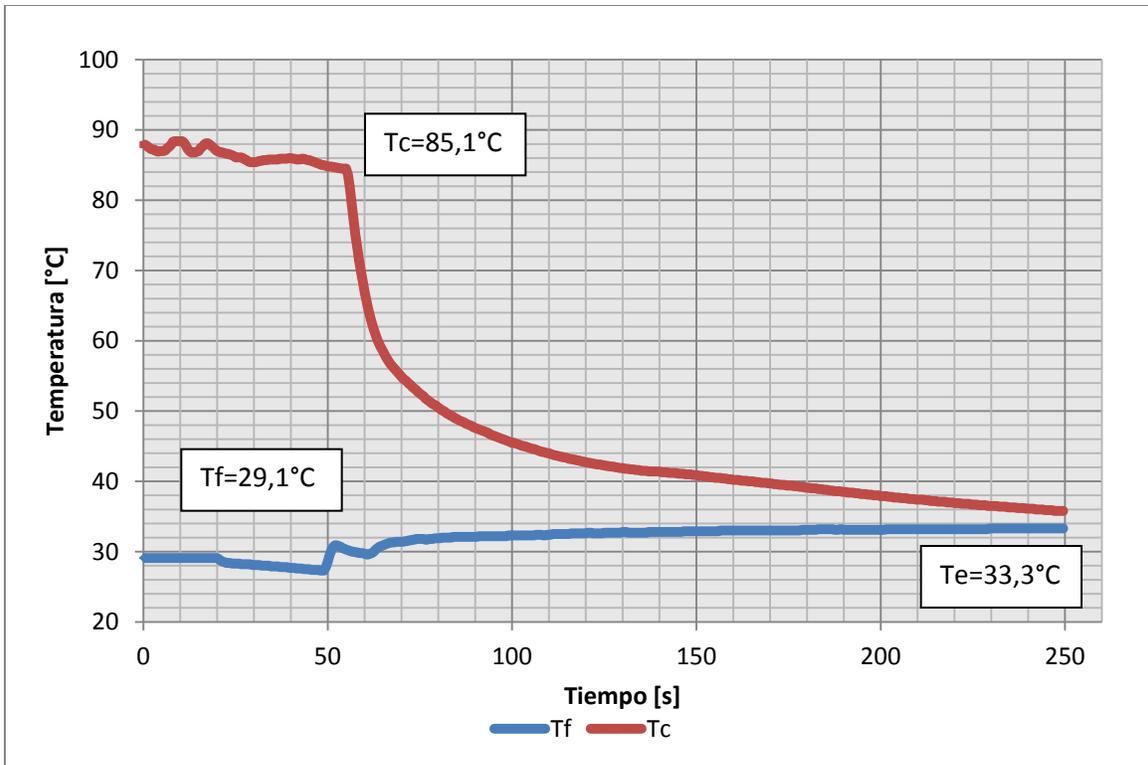


Figura 16.11: Gráfico de ensayo HCR 1.1- Tf, Tc, Tiempo.

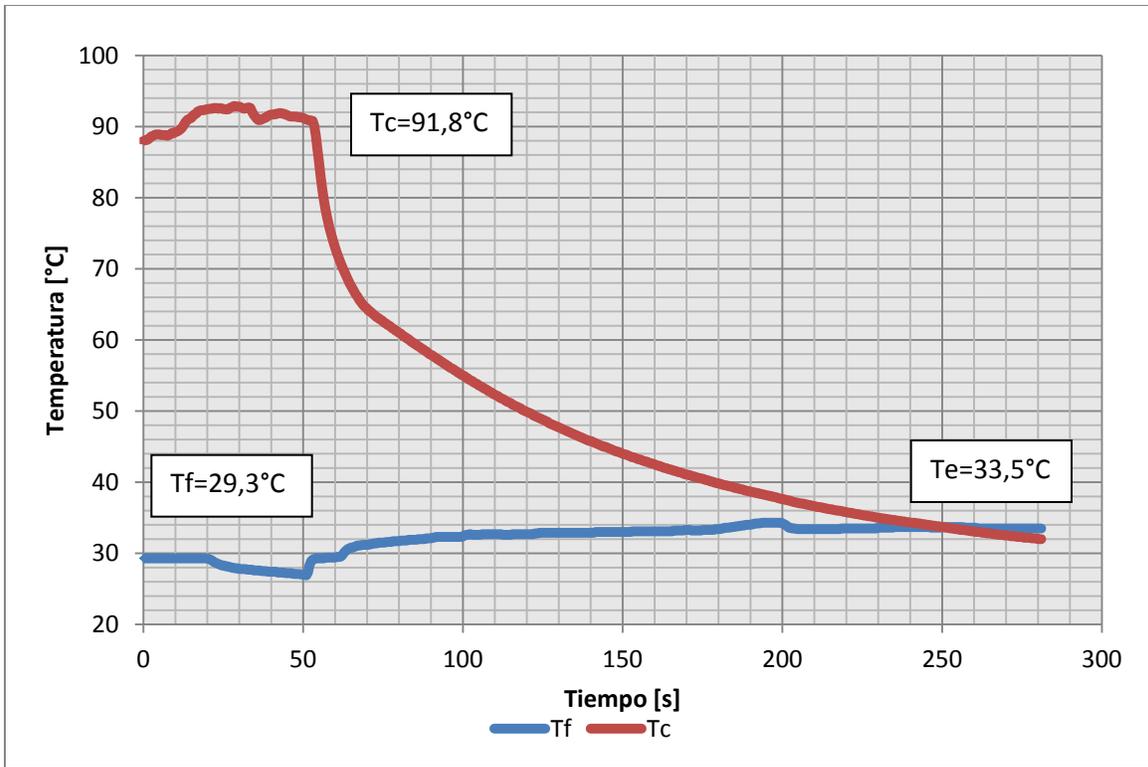


Figura 16.12: Gráfico de ensayo HCR 1.2- Tf, Tc, Tiempo.

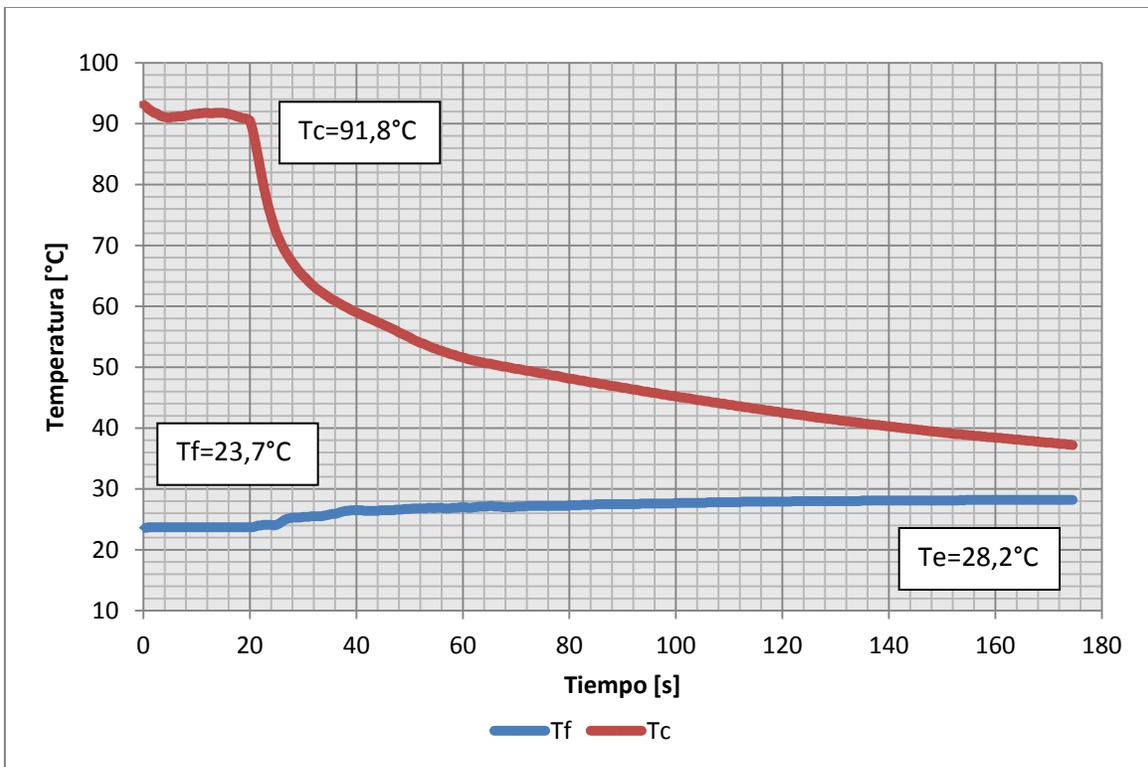


Figura 16.13: Gráfico de ensayo HCR 1.3- Tf, Tc, Tiempo.

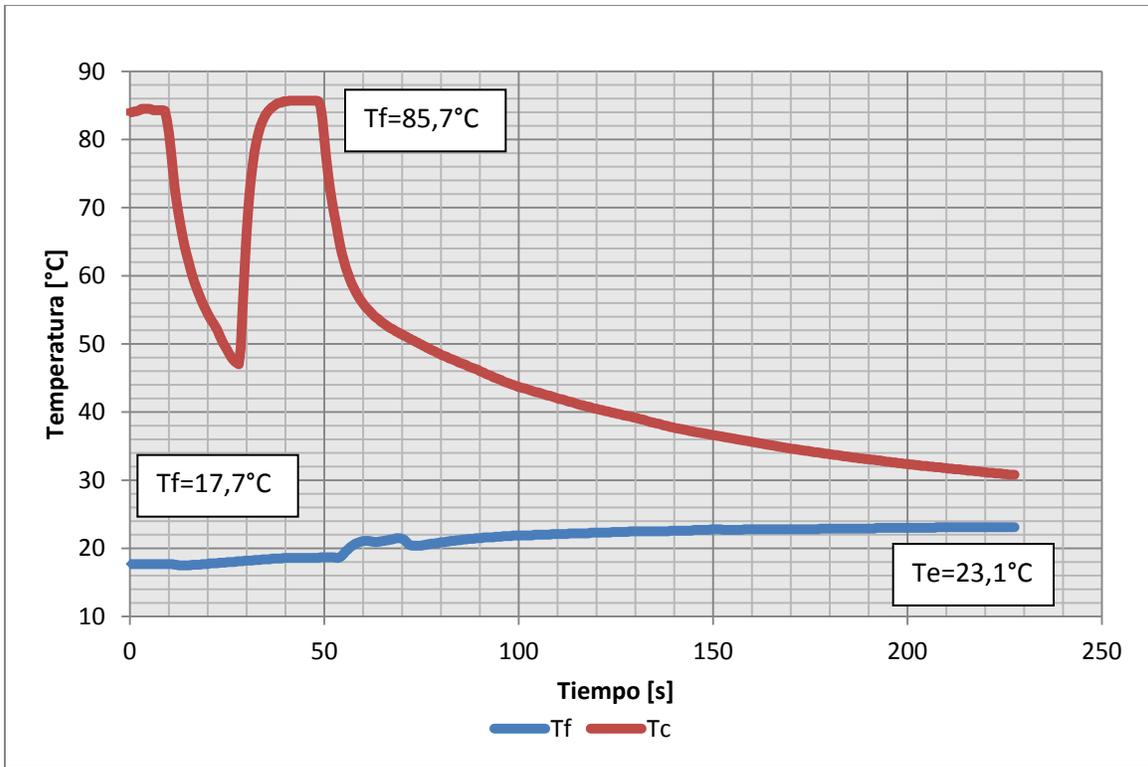


Figura 16.14: Gráfico de ensayo HCR 2.1- Tf, Tc, Tiempo.

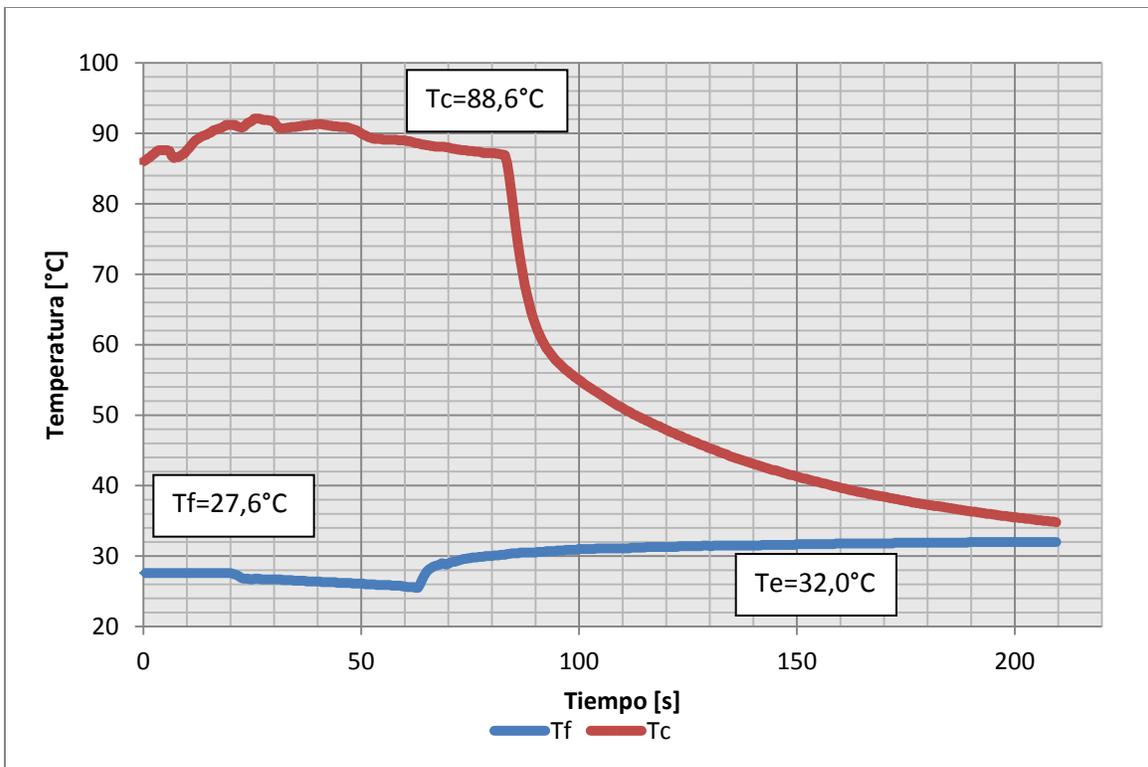


Figura 16.15: Gráfico de ensayo HCR 2.2- Tf, Tc, Tiempo.

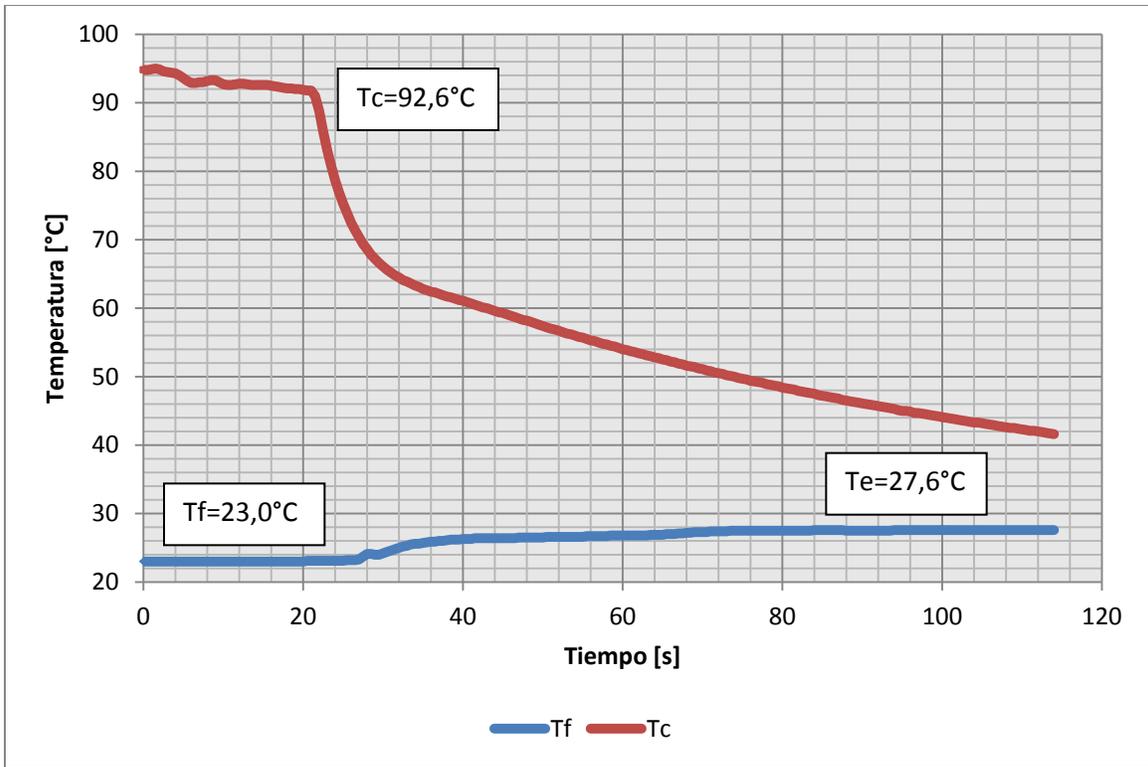


Figura 16.16: Gráfico de ensayo HCR 2.3- Tf, Tc, Tiempo.

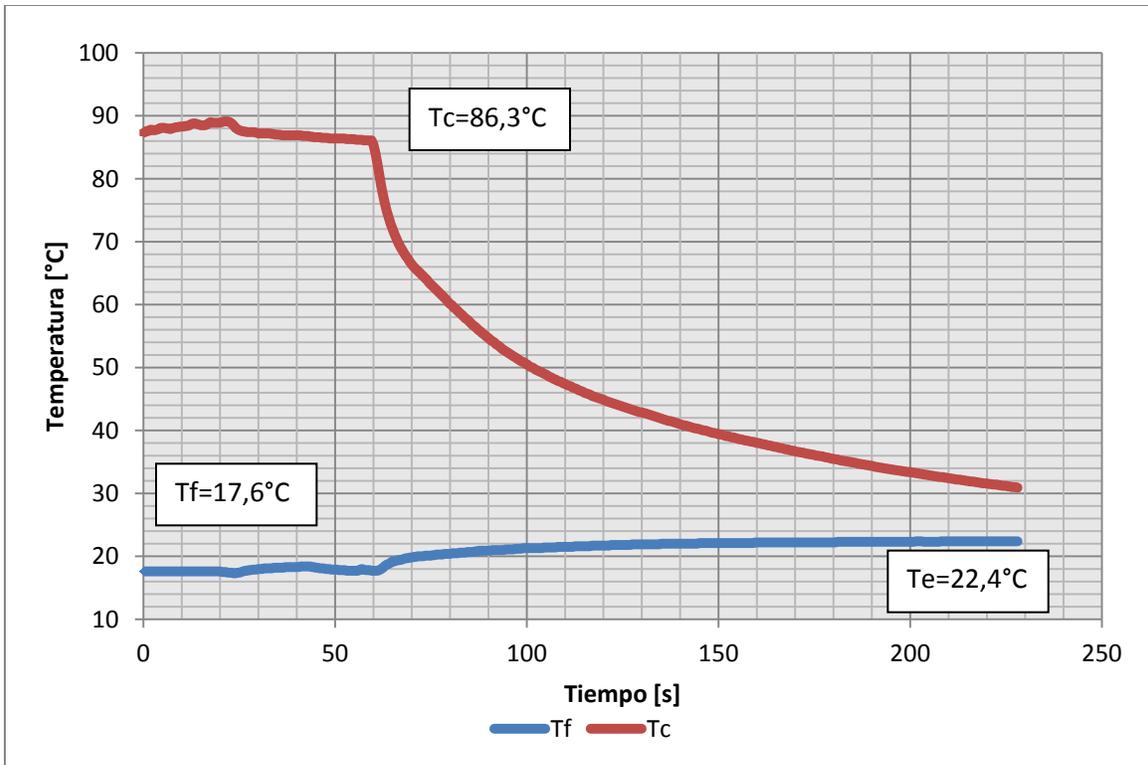


Figura 16.17: Gráfico de ensayo HCR 3.1- Tf, Tc, Tiempo.

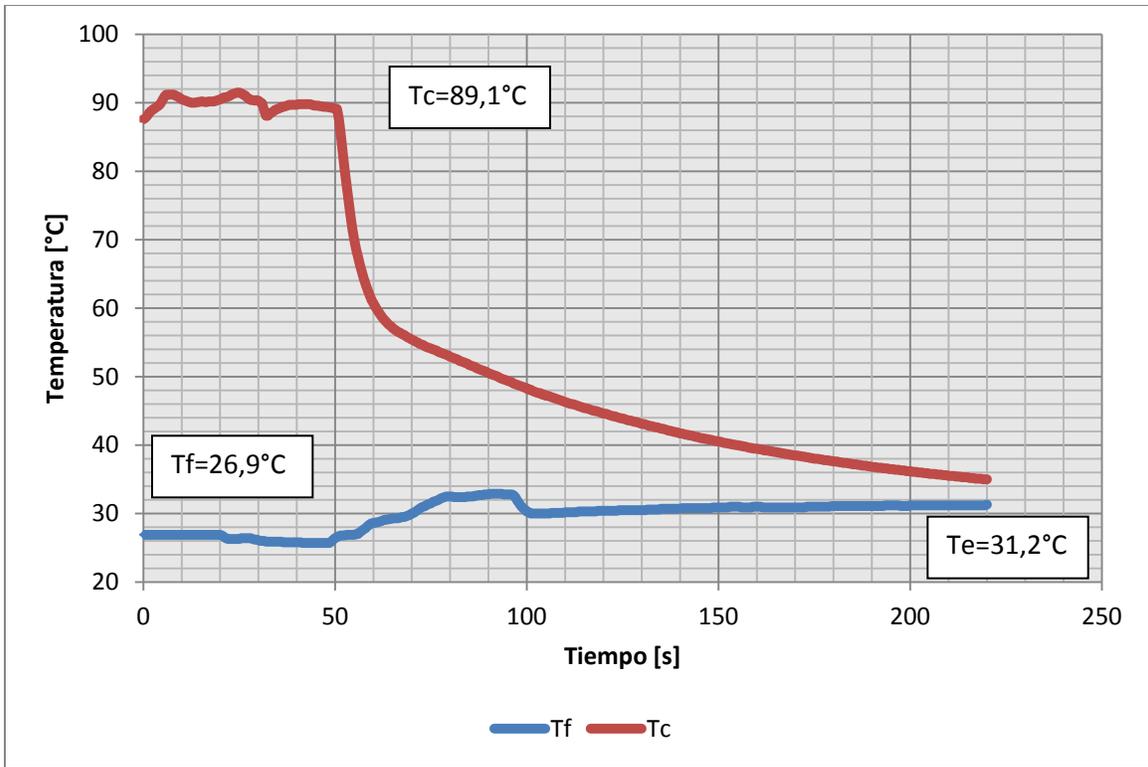


Figura 16.18: Gráfico de ensayo HCR 3.2- Tf, Tc, Tiempo.

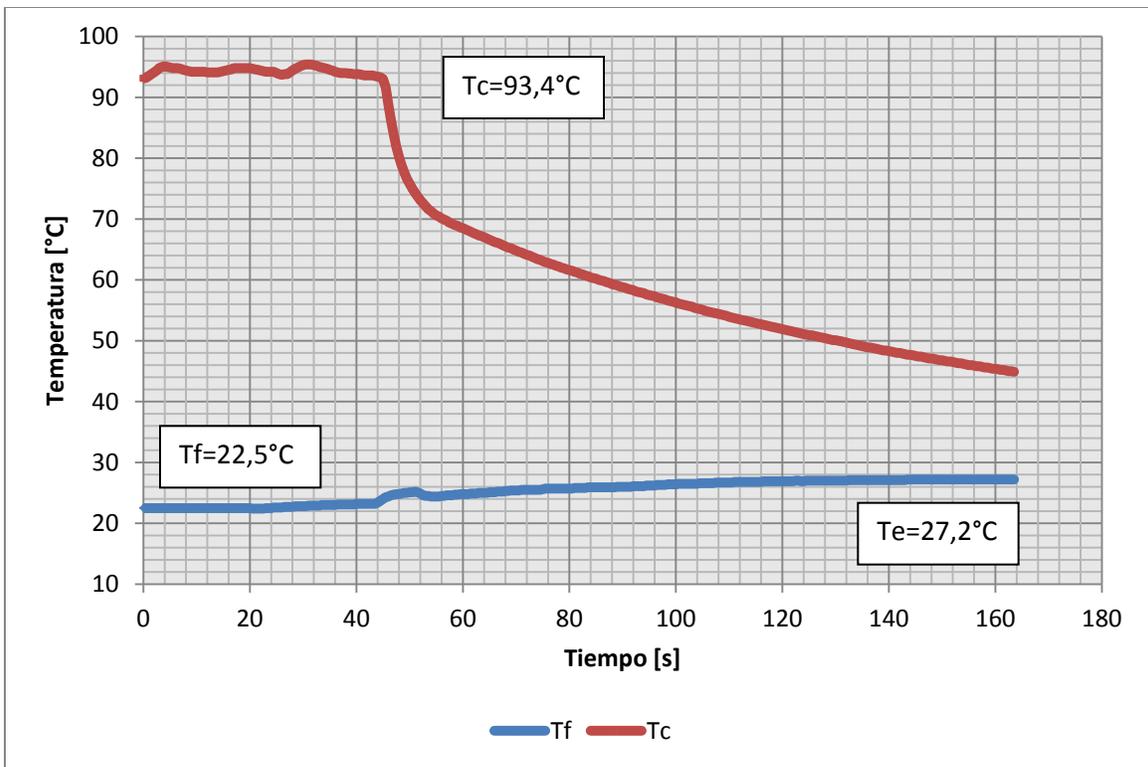


Figura 16.19: Gráfico de ensayo HCR 3.3- Tf, Tc, Tiempo.

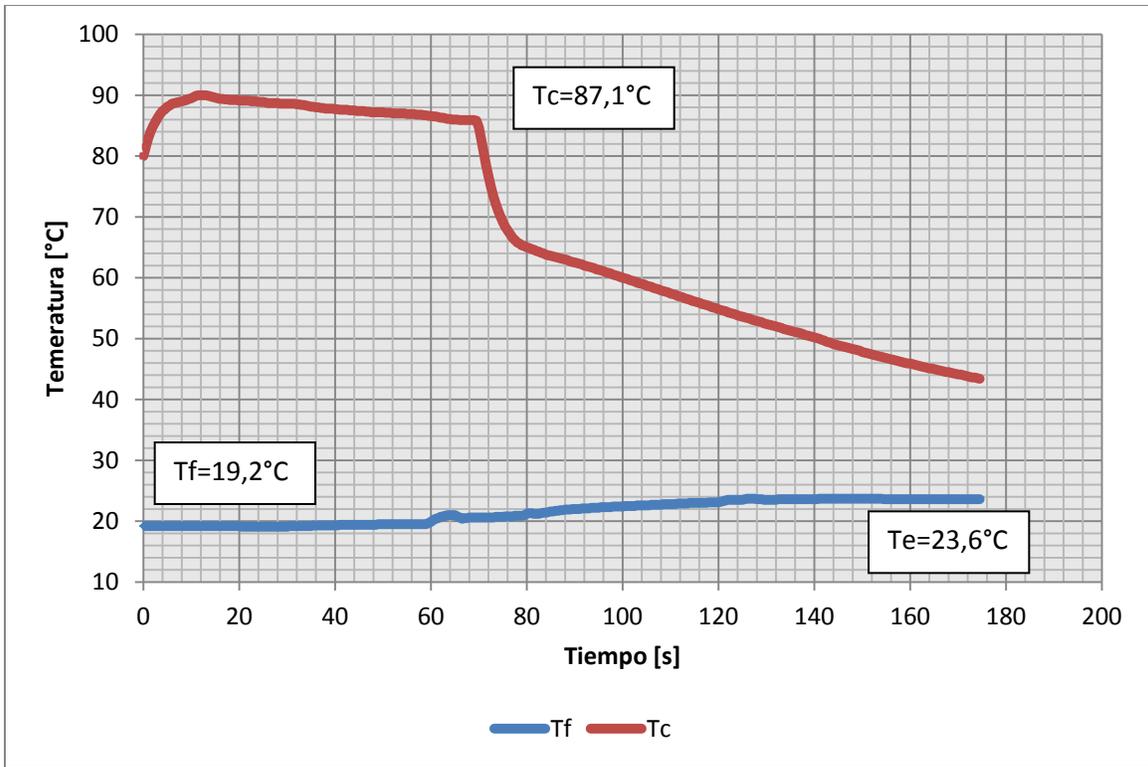


Figura 16.20: Gráfico de ensayo HCR 4.1- Tf, Tc, Tiempo.

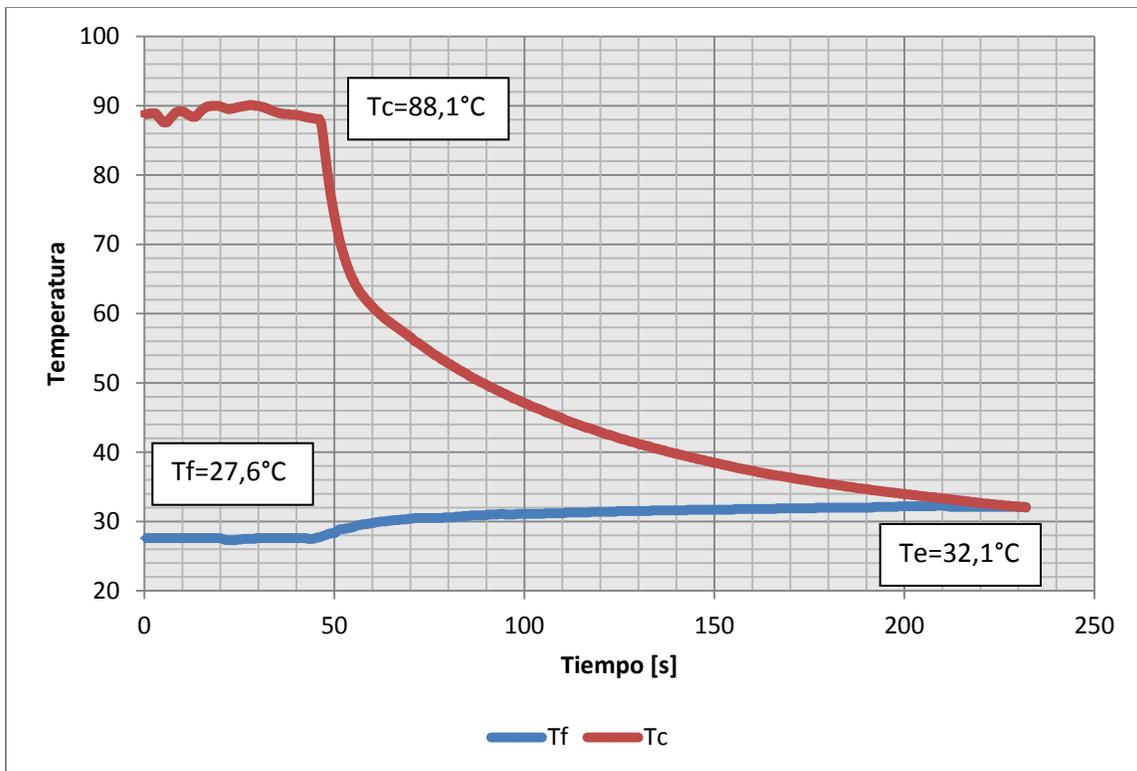


Figura 16.21: Gráfico de ensayo HCR 4.2- Tf, Tc, Tiempo.

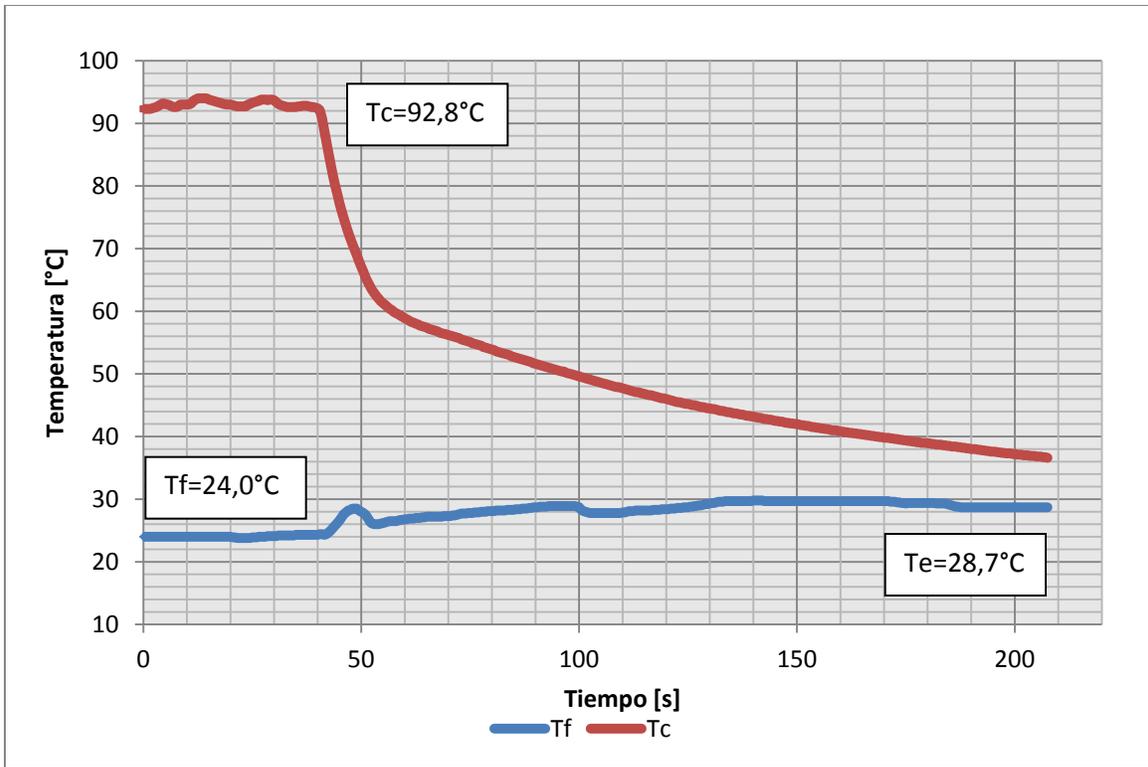


Figura 16.22: Gráfico de ensayo HCR 4.3- Tf, Tc, Tiempo.

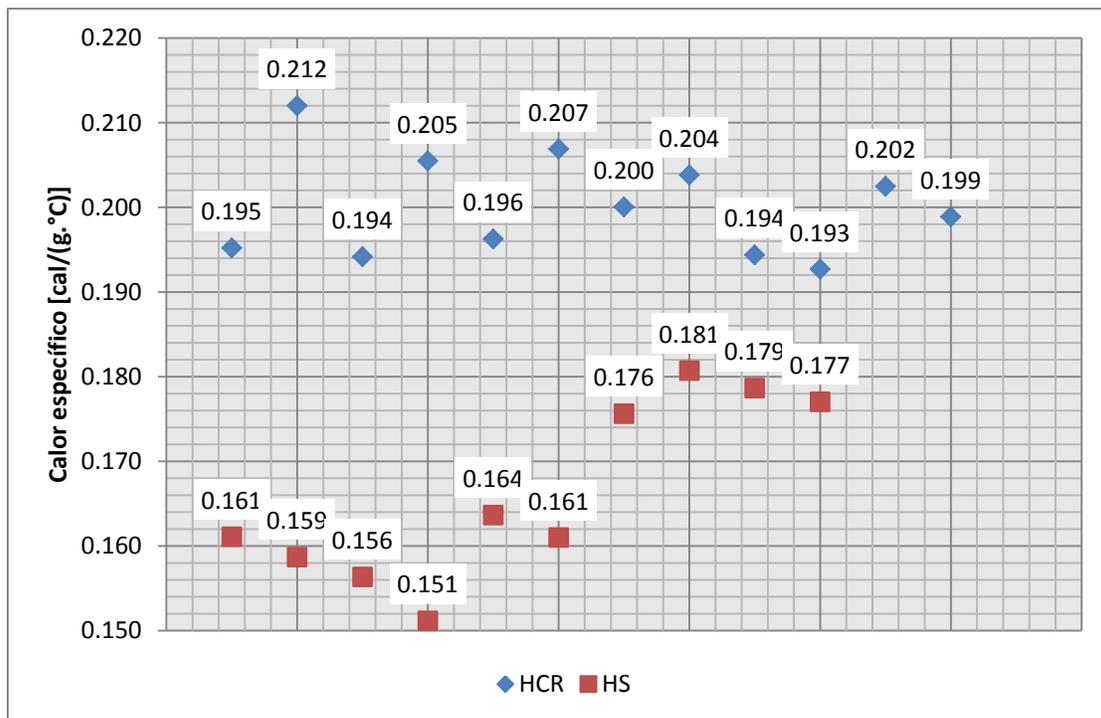


Figura 16.23: Gráfico de calor específico de muestras HCR y HS.

BIBLIOGRAFÍA

6. Efectos del calor. (n.d.). Retrieved May 29, 2020, from [http://iesdmjac.educa.aragon.es/departamentos/fq/temasweb/fqdmiral/FQ4ESO/FQ4ESO/Tema 6 Energia/6_efectos_del_calor.html](http://iesdmjac.educa.aragon.es/departamentos/fq/temasweb/fqdmiral/FQ4ESO/FQ4ESO/Tema%206%20Energia/6_efectos_del_calor.html)
- Aislamiento Térmico | Erica. (n.d.). Retrieved May 29, 2020, from <http://www.ERICA.es/web/aislamiento-termico/>
- Ako, T. A., Onoduku, U. S., Oke, S. A., Essien, B. I., Idris, F. N., Umar, A. N., & Ahmed, A. A. (2014). Environmental Effects of Sand and Gravel Mining on Land and Soil in Luku, Minna, Niger State, North Central Nigeria. *Journal of Geosciences and Geomatics*, 2(2), 42–49. <https://doi.org/10.12691/JGG-2-2-1>
- ASTM International. (2001). *ASTM C136-01 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. 1–5. <https://doi.org/10.1520/C0136>
- ASTM International. (2003a). *ASTM C 90-03 Standard Specification for Loadbearing Concrete Masonry Units*. 1–4.
- ASTM International. (2003b). *ASTM C33-03 Standard Specification for Concrete Aggregates*. 1–11. <https://doi.org/10.1520/C0033>
- ASTM International. (2017). *ASTM C140/C140M – 17a Standard Test Methods for Sampling and Testing Concrete Masonry Units and Related Units*. 26. <https://doi.org/10.1520/C0140>
- Benítez, A., Polzinetti, M., & Agnello, J. (2013). *ALTERNATIVAS PARA EL APROVECHAMIENTO DE MATERIAL PARTICULADO DE CAUCHO EN MEZCLAS DE HORMIGÓN POROSO*. Retrieved from <https://www.inti.gov.ar/tecnointi2013/CD/info/pdf/533.pdf>
- BIPM, IEC, IFCC, ILAC, ISO, IUPAC, IUPAP, O. (2008). *Evaluación de datos de medición: Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida*. Retrieved from <https://www.cem.es/sites/default/files/gum20digital1202010.pdf>

Boudaghpour, S., & Monfared, S. A. H. (2008). Environmental effects of irregular extracting of gravel from river beds. *WSEAS Transactions on Environment and Development*, 4(5), 430–435.

Calor específico. (n.d.-a). Retrieved May 29, 2020, from <https://es.slideshare.net/lorrymorgan/calor-especifico-26436946>

Calor específico. (n.d.-b). Retrieved May 29, 2020, from http://www.vaxasoftware.com/doc_edu/fis/calorespec.pdf

CTE WEB. (n.d.). Retrieved May 30, 2020, from <http://cte-web.iccl.es/materiales.php?a=18>

Fraille-Garcia, E., Ferreiro-Cabello, J., Mendivil-Giro, M., & Vicente-Navarro, A. S. (2018). Thermal behaviour of hollow blocks and bricks made of concrete doped with waste tyre rubber. *Construction and Building Materials*, 176, 193–200. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.015>

Ganjian, E., Khorami, M., & Maghsoudi, A. A. (2009). Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete. *Construction and Building Materials*, 23(5), 1828–1836. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.09.020>

Ghaly, A. M., & Cahill IV, J. D. (2005). Correlation of strength, rubber content, and water to cement ratio in rubberized concrete. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 32(6), 1075–1081. <https://doi.org/10.1139/105-063>

Giancoli, C. D. (2008). *Física para ciencias e ingeniería* (R. Fuerte Rivera, Ed.). Pearson Education Inc.

Gupta, T., Chaudhary, S., & Sharma, R. K. (2014). Assessment of mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber tire as fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 73, 562–574. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.102>

<http://cte-web.iccl.es/cteweb.php>. (n.d.). Retrieved May 29, 2020, from <http://cte-web.iccl.es/cteweb.php>

J.M., V. (2010). *TESIS DE GRADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL PROBLEMÁTICA DEL*

NEUMÁTICO FUERA DE USO Reciclado y posterior aplicación industrial y comercial.

Retrieved from <https://ri.itba.edu.ar/bitstream/handle/123456789/519/V679 - Problemática del neumático fuera de uso reciclado y posterior aplicación industrial y comercial.pdf?sequence=1>

Khatib, J. M. (2009). Sustainability of Construction Materials. In *Sustainability of Construction Materials*. <https://doi.org/10.1533/9781845695842>

Li, L., Ruan, S., & Zeng, L. (2014). Mechanical properties and constitutive equations of concrete containing a low volume of tire rubber particles. *Construction and Building Materials*, 70, 291–308. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.105>

Ling, T. C. (2012). Effects of compaction method and rubber content on the properties of concrete paving blocks. *Construction and Building Materials*, 28(1), 164–175. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.08.069>

Ministerio de Trabajo Empleo y Seguridad Social. (n.d.). Resolución 295/2003. Retrieved June 20, 2020, from <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/90000-94999/90396/norma.htm>

Mohammed, B. S., Anwar Hossain, K. M., Eng Swee, J. T., Wong, G., & Abdullahi, M. (2012). Properties of crumb rubber hollow concrete block. *Journal of Cleaner Production*, 23(1), 57–67. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.10.035>

Najim, K. B., & Hall, M. R. (2010). A review of the fresh/hardened properties and applications for plain- (PRC) and self-compacting rubberised concrete (SCRC). *Construction and Building Materials*, 24(11), 2043–2051. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.056>

O.A. Cabrera, A. Di Maio, C. Zega, J. S. (2012). Capítulo 5. In A. A. de de T. del H. Carrasco, N.G. Maldonado y M.F. (Ed.), *Ese material llamado Hormigón* (p. 107). Buenos Aires.

Propiedades termicas de algunos materiales de construcción y aislantes. (n.d.). Retrieved May 29, 2020, from <http://materias.fi.uba.ar/6731/Tablas/Tabla6.pdf>

Rahul Chaudhary¹, & Tapeshwar Kalra². (2017). To Study the Strength Properties of Concrete by Using Tire Waste. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering*

Technology (IJRASET), 5(7), 6. Retrieved from
<https://www.ijraset.com/files/serve.php?FID=8784>

Regomax. (n.d.). Retrieved May 30, 2020, from <http://www.regomax.com/>

Tabla de calores específicos. (n.d.). Retrieved May 29, 2020, from
<http://teleformacion.edu.aytolacoruna.es/FISICA/document/fisicaInteractiva/Calor/calor/TablaCe.htm>

Thomas, B. S., Gupta, R. C., Kalla, P., & Cseteneyi, L. (2014). Strength, abrasion and permeation characteristics of cement concrete containing discarded rubber fine aggregates. *Construction and Building Materials*, 59, 204–212.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.074>

Yang, J., Tanguy, P. A., & Roy, C. (1995). Heat transfer, mass transfer and kinetics study of the vacuum pyrolysis of a large used tire particle. *Chemical Engineering Science*, 50(12), 1909–1922. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(95\)00062-A](https://doi.org/10.1016/0009-2509(95)00062-A)