



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA

TESIS

“Determinación de propiedades térmicas de moldeo en verde”

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

**PRESENTA
AMAURI DEEDABI BAUTISTA HERNÁNDEZ**

**DIRECTOR DE TESIS
M. en I. Agustín Gerardo Ruiz Tamayo**



Ciudad Universitaria, Cd Mx.

2018



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: Profesor: DR. JOSÉ ALEJANDRO GARCÍA HINOJOSA

VOCAL: Profesor: DR. ADRIAN MANUEL AMARO VILLEDA

SECRETARIO: Profesor: M. EN I. AGUSTIN GERARDO RUIZ TAMAYO

1er. SUPLENTE: Profesor: M. EN I. BENJAMIN BELTRAN FRAGOSO

2° SUPLENTE: Profesor: M. EN M. EUSEBIO CANDIDO ATLATENCO TLAPANCO

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: LABORATORIO 003 ARENAS DE MOLDEO,
EDIFICIO D, FACULTAD DE QUÍMICA, UNAM

ASESOR DEL TEMA:

M. EN I. AGUSTIN GERARDO RUIZ TAMAYO _____

SUPERVISOR TECNICO:

M. EN M. EUSEBIO CANDIDO ATLATENCO TLAPANCO _____

SUSTENTANTE:

AMAURI DEEDABI BAUTISTA HERNANDEZ _____

Agradecimientos

Dr. Marco Aurelio Ramirez Argáez, por el material aportado para la realización de esta tesis, puesto que sin esta materia prima seria casi imposible que este trabajo se haya realizado, por eso gracias por el apoyo.



ÍNDICE GENERAL

Índice de Figuras.....	II
Índice de Tablas.....	VIII
Introducción.....	X
Hipótesis.....	XI
Objetivos.....	XI
Capítulo I. Antecedentes.....	1
Capítulo II. Fundamentos teóricos.....	3
1. Medio de moldeo en verde.....	3
1.1. Arenas.....	3
1.2. Arcillas.....	7
1.3. Arcillas y agua.....	10
1.4. Arena y el mezclado.....	11
1.5. Aditivos.....	14
2. Etapa de moldeo.....	15
3. Bentonita latente.....	23
4. Control del medio de moldeo.....	25
4.1. Control de humedad.....	30
4.2. Propiedades de las arenas de moldeo.....	34
5. Solidificación.....	39
6. Propiedades Termo-físicas.....	40
7. Fundamento del método de cilindro finito en estado estacionario.....	49
Capítulo III. Metodología experimental.....	52
1. Equipo, material y reactivos.....	52
2. Arreglo experimental.....	54
3. Preparación y técnica de moldeo de la mezcla para moldeo en verde.....	56
4. Fusión y colada.....	58
5. Modelo Matemático.....	59
Capítulo IV. Resultados y análisis de resultados.....	61
Capítulo V. Conclusiones.....	83
Capítulo VI. Bibliografía.....	84
Capítulo VII. Anexos.....	86
Anexo 1. Ecuación de conducción en sistema de coordenadas cilíndricas ..	86
Anexo 2. Historias Térmicas.....	88
Anexo 3. Propiedades Mecánicas.....	101

Índice de Figuras

Figura 2.1 Clasificación de la morfología de los granos de arena	6
Figura 2.2. Desarrollo de la resistencia en la arena de moldeo como función del tiempo mezclado	12
Figura 2.3. Visualización del arreglo en el sistema arena-agua-arcilla durante el moldeo	16
Figura 2.4. Máxima resistencia a la compresión en verde para arenas aglomeradas con distintas arcillas	18
Figura 2.5. Influencia del tipo de arcilla en la densidad de las arenas de moldeo.	19
Figura 2.6. Relación entre el porcentaje de humedad, contenido de bentonita, resistencia a la compresión en verde y permeabilidad	21
Figura 2.7. Molde de fundición en arena	22
Figura 2.8. Efecto de la bentonita latente en la resistencia en verde	24
Figura 2.9. Apisonador Ridsdale-Dietert.....	35
Figura 2.10. Distribución de temperatura y contenido de humedad a diferentes distancias de la interfase metal/molde a través de un molde de arena en verde ..	42
Figura 2.11. Representación esquemática del cilindro de estudio, en sus 3 dimensiones	50
Figura 3.1. Indica las dimensiones de la caja de molde correspondiente al drag..	52
Figura 3.2. Indica las dimensiones de la caja de molde correspondiente al cope, mostrando en la imagen de la izquierda ya con la forma de la placa modelo	53
Figura 3.3. Placa modelo del experimento	53
Figura 3.4. El lado derecho se observa el contenedor de la pieza de trabajo, dentro del cope y drag, el lado izquierdo se observa el adquisidor con la computadora para el adquisidor de los datos.....	54
Figura 3.5. Dimensiones de la probeta norma.....	54
Figura 3.6. Visualización del equipo montado, con cilindros rojos señalan colocación de termopares, con cilindro azul la copa de vaciado y con azul claro el cilindro del medio del moldeo, ubicado en el centro de la cavidad de la pieza moldeada.....	55
Figura 3.7. Historia térmica en moldeo en verde con 5% de Bentonita activa, 100% bentonita cálcica y 5% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación	

de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde 59

Figura 4.1 Representación de los valores difusividad térmica (α) y la resistencia a la compresión en verde, de la mezcla con las condiciones 1,5 y 9, que son 4% de Bentonita activa con 100% de Bentonita cálcica en sus diferentes humedades ... 66

Figura 4.2. Representación de los valores difusividad térmica (α) y la resistencia a la compresión en verde, de la mezcla con las condiciones 2,6 y 10, que son 4% de Bentonita activa con 90-10% de Bentonita cálcica y Bentonita sódica, respectivamente, en sus diferentes humedades 66

Figura 4.3. Representación de los valores difusividad térmica (α) y la resistencia a la compresión en verde, de la mezcla con las condiciones 3,7 y 11, que son 4% de Bentonita activa con 80-20% de Bentonita cálcica y Bentonita sódica, respectivamente, en sus diferentes humedades 67

Figura 4.4. Representación de los valores difusividad térmica (α) y la resistencia a la compresión en verde, de la mezcla con las condiciones 4,8 y 12, que son 4% de Bentonita activa con 70-30% de Bentonita cálcica y Bentonita sódica, respectivamente, en sus diferentes humedades 67

Figura 4.5. Representación de los valores difusividad térmica (α) y la resistencia a la compresión en verde, de la mezcla con las condiciones 13,17 y 21, que son 5% de Bentonita activa con 100% de Bentonita cálcica en sus diferentes humedades 69

Figura 4.6. Representación de los valores difusividad térmica (α) y la resistencia a la compresión en verde, de la mezcla con las condiciones 14,18 y 22, que son 5% de Bentonita activa con 90-10% de Bentonita cálcica y Bentonita sódica, respectivamente, en sus diferentes humedades 70

Figura 4.7. Representación de los valores difusividad térmica (α) y la resistencia a la compresión en verde, de la mezcla con las condiciones 15,19 y 23, que son 5% de Bentonita activa con 80-20% de Bentonita cálcica y Bentonita sódica, respectivamente, en sus diferentes humedades 70

Figura 4.8. Representación de los valores difusividad térmica (α) y la resistencia a la compresión en verde, de la mezcla con las condiciones 16,20 y 24, que son 5% de Bentonita activa con 70-30% de Bentonita cálcica y Bentonita sódica, respectivamente, en sus diferentes humedades 71

Figura 4.9. Recopilación de todos los valores de difusividad térmica..... 73

Figura 4.10. Recopilación de la resistencia a la compresión en verde de todas las mezclas preparadas	74
Figura 4.11. Zonas de distribución con respecto a la humedad que presenta la probeta norma a cierta distancia de la interfase metal/molde en moldeo en verde con 5% de Bentonita activa, 80% bentonita cálcica, 20% de bentonita sódica y con 5% de humedad. HT2: Historia Térmica en la probeta norma con un termopar ubicado a una distancia de 1.25 cm de la interfase. HT3: Historia Térmica en la probeta norma con un termopar ubicado a una distancia de 2.5 cm de la interfase	80
Figura 7.1.1. Cilindro que se puede representar en x, y y z, o r, z y Θ	85
Figura 7.2.1. Historia térmica en moldeo en verde con 4% de Bentonita activa, 100% bentonita cálcica y 5% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde.	87
Figura 7.2.2. Historia térmica en moldeo en verde con 4% de Bentonita activa, 90% bentonita cálcica, 10% de bentonita sódica y 5% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde.	88
Figura 7.2.3. Historia térmica en moldeo en verde con 4% de Bentonita activa, 80% bentonita cálcica, 20% de bentonita sódica y 5% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde.	88
Figura 7.2.4. Historia térmica en moldeo en verde con 4% de Bentonita activa, 70% bentonita cálcica, 30% de bentonita sódica y 5% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde.	89
Figura 7.2.5. Historia térmica en moldeo en verde con 4% de Bentonita activa, 100% bentonita cálcica y 4% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde.	89

Figura 7.2.6. Historia térmica en moldeo en verde con 4% de Bentonita activa, 90% bentonita cálcica, 10% de bentonita sódica y 4% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde.

..... 90

Figura 7.2.8 Historia térmica en moldeo en verde con 4% de Bentonita activa, 70% bentonita cálcica, 30% de bentonita sódica y 4% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde.

..... 90

Figura 7.2.7. Historia térmica en moldeo en verde con 4% de Bentonita activa, 80% Bentonita cálcica, 20% de bentonita sódica y 4% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde.

..... 91

Figura 7.2.9. Historia térmica en moldeo en verde con 4% de Bentonita activa, 100% Bentonita cálcica y 3% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde.

..... 91

Figura 7.2.10. Historia térmica en moldeo en verde con 4% de Bentonita activa, 90% bentonita cálcica, 10% de bentonita sódica y 3% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde.

..... 92

Figura 7.2.11. Historia térmica en moldeo en verde con 4% de Bentonita activa, 80% bentonita cálcica, 20% de bentonita sódica y 3% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde.

..... 92

Figura 7.2.12. Historia térmica en moldeo en verde con 4% de Bentonita activa, 70% bentonita cálcica, 30% de bentonita sódica y 3% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia

térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde.
..... 93

Figura 7.2.13. Historia térmica en moldeo en verde con 5% de Bentonita activa, 100% bentonita cálcica y 5% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde. 93

Figura 7.2.14. Historia térmica en moldeo en verde con 5% de Bentonita activa, 90% bentonita cálcica, 10% de bentonita sódica y 5% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde.
..... 94

Figura 7.2.15. Historia térmica en moldeo en verde con 5% de bentonita activa, 80% bentonita cálcica, 20% de bentonita sódica y 5% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde.
..... 94

Figura 7.2.16. Historia térmica en moldeo en verde con 5% de bentonita activa, 70% bentonita cálcica, 30% de bentonita sódica y 5% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde.
..... 95

Figura 7.2.17. Historia térmica en moldeo en verde con 5% de bentonita activa, 100% bentonita cálcica y 4% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde. 95

Figura 7.2.18. Historia térmica en moldeo en verde con 5% de bentonita activa, 90% bentonita cálcica, 10% de bentonita sódica y 4% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde.
..... 96

Figura 7.2.19. Historia térmica en moldeo en verde con 5% de bentonita activa, 80% bentonita cálcica, 20% de bentonita sódica y 4% de humedad, donde: HT1 es la

historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde. 96

Figura 7.2.20. Historia térmica en moldeo en verde con 5% de bentonita activa, 70% bentonita cálcica, 30% de bentonita sódica y 4% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde. 97

Figura 7.2.21. Historia térmica en moldeo en verde con 5% de bentonita activa, 100% bentonita cálcica y 3% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde. 97

Figura 7.2.22. Historia térmica en moldeo en verde con 5% de bentonita activa, 90% bentonita cálcica, 10% de bentonita sódica y 3% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde. 98

Figura 7.2.23. Historia térmica en moldeo en verde con 5% de bentonita activa, 80% bentonita cálcica, 20% de bentonita sódica y 3% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde. 98

Figura 7.2.24. Historia térmica en moldeo en verde con 5% de bentonita activa, 70% bentonita cálcica, 30% de bentonita sódica y 3% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde. 99

Índice de Tablas

Tabla 2.1 Propiedades físicas pertenecientes a las arenas utilizadas en fundición.4	
Tabla 2.2. Clasificación de la arena de acuerdo a su finura según la AFS	6
Tabla 2.3. Funciones de aditivos para moldeo en verde.....	14
Tabla 3.1. Condiciones de experimentación variando la relación de Bentonita Cálcica (BCa) y Bentonita Sódica (BNa) del total de bentonita activa en la mezcla y a diferentes porcentajes de agua	56
Tabla 3.2. Insumos utilizados para la mezcla de moldeo en verde en la condición 1	57
Tabla 4.1. Valores de difusividad térmica que se obtienen para la arena de moldeo con las temperaturas y tiempos leídos conforme a las condiciones en la Tabla 3.1 , donde se indica el porcentaje de bentonita activa y la relación de bentonita cálcica y bentonita sódica, con sus respectivas humedades	61
Tabla 4.2. Valores de difusividad térmica que se obtienen para la arena de moldeo con las temperaturas y tiempos leídos conforme a las condiciones en la Tabla 3.1 , donde se indica el porcentaje de bentonita activa y la relación de bentonita cálcica y bentonita sódica, con sus respectivas humedades.	63
Tabla 4.3. Valores de difusividad térmica en cada una las condiciones de la experimentación	76
Tabla 4.4. Datos en la literatura sobre valores de coeficiente de difusividad térmica	77
Tabla 4.5. Temperaturas registradas durante los experimentos para cada condición de las mezclas bajo estudio	81
Tabla 7.3.1. Propiedades mecánicas de la mezcla de 4% Bentonita activa, relación 100% Bentonita Cálcica y sus respectivas humedades.	100
Tabla 7.3.2. Propiedades mecánicas de la mezcla de 4% Bentonita activa, relación 90-10 de Bentonita cálcica y Bentonita sódica, respectivamente, y sus respectivas humedades.....	101
Tabla 7.3.3. Propiedades mecánicas de la mezcla de 4% Bentonita activa, relación 80-20 de Bentonita cálcica y Bentonita sódica, respectivamente, y sus respectivas humedades.....	101
Tabla 7.3.4. Propiedades mecánicas de la mezcla de 4% Bentonita activa, relación 70-30 de Bentonita cálcica y Bentonita sódica, respectivamente, y sus respectivas humedades.....	102

Tabla 7.3.5. Propiedades mecánicas de la mezcla de 5% Bentonita activa, relación 100% Bentonita Cálcica y sus respectivas humedades	102
Tabla 7.3.6. Propiedades mecánicas de la mezcla de 5% Bentonita activa, relación 90-10 de Bentonita cálcica y Bentonita sódica, respectivamente, y sus respectivas humedades.....	103
Tabla 7.3.7. Propiedades mecánicas de la mezcla de 5% Bentonita activa, relación 80-20 de Bentonita cálcica y Bentonita sódica, respectivamente, y sus respectivas humedades.....	103
Tabla 7.3.8. Propiedades mecánicas de la mezcla de 5% Bentonita activa, relación 70-30 de Bentonita cálcica y Bentonita sódica, respectivamente, y sus respectivas humedades.....	104

Introducción

Durante mucho tiempo, se fabricaron moldes de arenas aglutinadas de forma natural y se secaron para vaciar en ellos metales fundidos y obtener piezas metálicas sólidas de diversas formas, pero a principios del siglo XX descubrieron que los metales podían ser colados en moldes de arenas sintéticas llamadas “arenas para moldeo en verde” que es la arena sílice libre de arcilla y que al mezclarse con arcilla plástica pre-procesada (bentonita) y agua forman mezclas sintéticas teniendo así un contenido de arcilla y humedad controlado en comparación de la arena natural.

En este trabajo se abordan las propiedades térmicas de las arenas para moldeo en verde. Estas no son parte de las propiedades de rutina en el control de estas arenas sin embargo tienen una relación con ellas y con la calidad del metal fundido. El propósito de este trabajo es demostrar esta relación y su importancia.

Con el paso del tiempo, se han desarrollado mediciones de las propiedades térmicas de los materiales de moldeo con diferentes métodos y a mezclas con diferentes composiciones, tratando de obtener funciones y coeficientes que se generalizan para su uso.

No obstante, el cúmulo de esfuerzos y datos, extraña el afán de generalización de las mezclas de moldeo de arena sílice, como si todas las mezclas de arena en verde se comportaran igual térmicamente. Es bien conocido el hecho de que al variar el contenido de bentonita y de agua se definen sus propiedades físicas, determinadas por una estructura de unión entre las partículas; parece lógico pensar que las propiedades térmicas respondan también a esas variaciones.

En este estudio se miden los coeficientes de difusividad térmica a varias formulaciones de la mezcla para moldeo en verde, determinadas por su variación en % de agua (a), % de bentonita activa (b) y la relación a/b en moldes preparados con dichas formulaciones. La arena en verde que se trabajó, es una mezcla de moldeo de arena silíceo, bentonita y agua, sin aditivos.

Hipótesis.

- La cantidad de bentonita, así como la relación de bentonita cálcica y bentonita sódica, afectara en la conductividad térmica que ocurre en el medio de moldeo.

Objetivos.

- Emplear el modelado matemático “Cilindro finito en estado estacionario”, para determinar la difusividad térmica para diferentes condiciones de mezclas de moldeo en verde.
- Caracterizar y evaluar el comportamiento que presentan las diferentes condiciones de las mezclas de moldeo en verde con respecto a sus propiedades mecánicas y difusividad térmica.

Capitulo I. Antecedentes

En la actualidad en la industria se ha destinado dinero para la investigación, tanto para mejorar el proceso, así como el producto, esto para poder obtener piezas de mejor terminado y de mayor precisión dimensional a costos cada vez más bajos, el ingeniero se encuentra enfrentado con una situación en la que necesita utilizar toda la información científica que redunde en el beneficio de su industria. Esto le hace ser un metalúrgico competente. Sin embargo, el campo de las mezclas de moldeo suele ser, por su modernidad relativa, un tema al que no se presta bastante atención debido, precisamente, a la profusión de artículos que aparecen continuamente en la literatura técnica.

Generalmente, los métodos operativos que rigen el moldeo en una fundición de tipo medio suelen ser los obtenidos por la propia experiencia de los moldeadores u en la mayoría de los casos, esta experiencia, fruto de numerosos años de trabajo, se guarda celosamente. No obstante, el comportamiento de los materiales de moldeo se rige por leyes científicas que determinan, generalmente, el éxito o fracaso de la producción de las piezas.

Por lo tanto, un conocimiento de las leyes que rigen este comportamiento y los métodos de obtener un control sobre este, es tan necesario como el control en la fusión o colada del metal, de tal manera que ni el técnico metalúrgico mejor formado puede contrarrestar el efecto devastador de una arena de moldeo pobre si no puede ejercer un control sobre ellas y modificarla de acuerdo con las necesidades de la fundición.

La principal función de un control sobre las arenas de moldeo es la de eliminar las variables que hagan fluctuar las propiedades físicas y mecánicas de la mezcla. Esto, a su vez, asegura una reducción en el porcentaje de piezas rechazadas, con la consiguiente ventaja económica de la industria.

El control científico sobre cada una de las fases de preparación y moldeo de las mezclas es nuevo y el personal de las fundiciones no está de todo al tanto de sus

ventajas. Una aplicación inteligente de los principios que gobiernan el control sobre las arenas de moldeo, así como ensayos de laboratorio de dichos materiales, beneficiara de una manera directa a la fundición que los emplee.

El propósito de este breve trabajo es, pues, atraer la atención de los fundidores a los principios fundamentales de la tecnología de las arenas de moldeo e inducirles a que empleen dichos principios en sus fundiciones respectivas, lo que les reportara, como resultado, un número reducido de piezas rechazadas con un mayor rendimiento y una reducción en el costo de fabricación.

Capítulo II. Fundamentos Teóricos

Muchas de las piezas que se utiliza en la vida cotidiana para la fabricación de automóviles, electrodomésticos, muebles e incluso alimentos, fueron fabricadas en un medio de moldeo el cual es un proceso que consiste en rellenar mediante un metal fundido la cavidad de un molde donde el metal al solidificarse adopta la forma de la cavidad luego se deja enfriar el tiempo necesario y se extrae del molde.

Las velocidades de solidificación de las piezas dependen tanto de su masa como de la conductividad térmica de la mezcla que constituye el molde. Una solidificación lenta aumenta el poder de contracción del metal y, en determinadas ocasiones, favorece la formación de discontinuidades conocidas como "rechupes". Estos defectos pueden invalidar las piezas fabricadas y, entre otros problemas, incrementar los costos de proceso. Las arenas con mayor capacidad para disipar el calor generado por la colada pueden actuar como un sistema de "enfriadores", que ayudan a minimizar los efectos de contracción del metal y los defectos que de ello se derivan.^[9]

1. Medio de moldeo en verde.

Los moldes de arena en verde se hacen de una mezcla de arena, bentonita y agua (existen procesos de moldeo que se emplean aditivos), el término "verde" se refiere al hecho de que el molde contiene humedad al momento del vaciado, además de que no requiere un tratamiento posterior al moldeo (por ejemplo, horneado). Este proceso de moldeo tiene suficiente resistencia en la mayoría de sus aplicaciones, así como buena refractabilidad, permeabilidad y reutilización de la arena. Es el método más empleado y económico, puede ser utilizado para casi cualquier metal o aleación sin importar mayormente las dimensiones de la pieza por ello es el más utilizado en la industria de la fundición.

1.1. Arenas

La fabricación de piezas mediante el proceso de moldeo en verde cae en dos categorías de acuerdo al tipo de arena base empleada:^[2]

Arenas Aglutinadas Naturalmente:

- Son aquellas en que el grano refractario está asociado en sus depósitos con la arcilla necesaria para la fabricación del molde. Dichas arenas a menudo desarrollan buenas propiedades de moldeo agregando solo agua, pero un contenido relativamente alto de arcilla reduce refractariedad y permeabilidad.

Arenas Sintéticas:

- Están basadas principalmente en arena sílice conteniendo poco o nada de aglutinante en estado natural. Estas dan libertad en el control de propiedades físicas y mecánicas de la mezcla, además de conferirle un excelente aglutinamiento.

En el moldeo en verde también puede utilizarse a parte de la arena sílice, otros tipos de arena, como lo son: arena de cromita, de olivino y de zirconio, como se observa en la **Tabla 2.1**.

Tabla 2.1 Propiedades físicas pertenecientes a las arenas utilizadas en fundición. [9]

Tipo de arena	Sílice	Cromita	Zirconio	Olivino
Composición	SiO ₂	(Fe,Mg)Cr ₂ O ₄	ZrSiO ₄ -ZrO ₂	(Mg,Fe) ₂ SiO ₄
pH	5,5-8,5	7,0-9,5	5,7-6,4	9,2-9,5
d_{aparente} (g/mL)	1,5-1,6	2,6-2,7	2,7-2,8	1,7
d_{material} (g/mL)	2,65-2,67	4,30-4,60	3,90-4,80	3,27-3,37
T_{fusión} (°C)	1713	2090	2540	1870
T_{sinterización} (°C)	> 1400	1400	1400	1375
Expansión,20-1200°C (%)	1,90	0,60	0,45	1,10
P. calcinación (%)	0,05-0,30	0,02	0,10	1,35
Ce (cal/g°C)	0,26	0,22	0,13	0,22
Difusividad δ (K/Cp)	6,7	9,3	28,4	17,4

Los parámetros que están representados en la **Tabla 2.1**, suelen ser ocupados por los encargados del área de moldeo y vaciado o el laboratorio de arenas, además de que muchos de estos parámetros pueden ser utilizados para prevenir algunos

defectos que pudieran ocurrir en la pieza. Los requisitos básicos que debe cumplir la arena para fundición son: ^[12]

- Tamaño y forma de grano adecuado.
- Estabilidad dimensional y térmica en aplicaciones a temperaturas elevadas.
- No reactivo químicamente con metales fundidos.
- Libres de elementos volátiles que puedan producir gases por efecto de calentamiento.
- Disponibilidad.
- Limpieza, composición, pH.
- Compatibilidad con materiales aglomerantes.

Con respecto al tamaño de partícula de la arena, se puede hacer mención que los granos pequeños proporcionan mejor acabado superficial en la pieza, sin embargo, la permeabilidad de los gases generados es menor que la de los granos grandes. Los moldes hechos de granos irregulares tienden a ser más resistentes que los moldes de granos redondos debido al ordenamiento de los granos, no obstante, estos últimos tienden a disminuir la liberación de los gases producidos dentro del molde. Los proveedores suelen proporcionar el tamaño y la distribución de los granos con el índice AFS, el cual es un parámetro que determina el tamaño medio de los granos en función de su tamaño y el número de éstos. El protocolo de la AFS para determinar este índice es hacer una clasificación granulométrica el cual consiste en tomar una muestra representativa de arena y colocarla en un set estándar de mallas. Una malla o criba es un tejido de alambre definido por el número de aberturas por pulgada lineal. En tanto sea mayor el número de malla menor será la abertura. Las mallas se colocan dentro de un instrumento que reproduce movimientos giratorios y de golpeteo de los tamices, llamado Tyler Ro-Tap®, colocando la mayor abertura en la parte superior, se agita durante 15 minutos permitiendo que la arena migre a través de las aberturas de las mallas, después de transcurrir el tiempo, el retenido de cada malla se pesa y se calcula un promedio siendo este el índice AFS.

El resultado del análisis indicaría si una arena es gruesa, media o fina; la arena gruesa que es un número menor de 45 del índice AFS que podría contener 3% de finos, la ventaja de esta arena es utilizar menor cantidad de arcilla para recubrir los granos, tiene mayor fluidez la mezcla y mejor permeabilidad del molde. La arena fina se considera con un índice AFS mayor a 70, como se aprecia en la **Tabla 2.2**, y un porcentaje de finos mayor a 7%, estos tipos de arena tiene una mayor área superficial lo que otorga propiedades contrarias a las de una arena gruesa. [10]

Tabla 2.2. Clasificación de la arena de acuerdo a su finura según la AFS.

FINURA DE LA ARENA	INDICE DE FINURA AFS	GRANO MEDIO EN MICRONES
Muy fina	100-140	140-110
Fina	70-110	230-140
Media	55-70	300-230
Gruesa	45-55	370-300
Muy Gruesa	25-45	700-370

La forma del grano está determinada por el origen geológicos de la arena y se define en términos de angularidad y que tan esférica es. Las formas de grano de arena son: redondeada, sub-redondeada, sub-angular, angular y completamente redondeado, como se observa en la **Figura 2.1**. Los granos tienen alta, media o poco esférica. La angularidad de la arena se estima mediante examen visual con microscopios de gran aumento y comparación con cartas publicadas. [13]

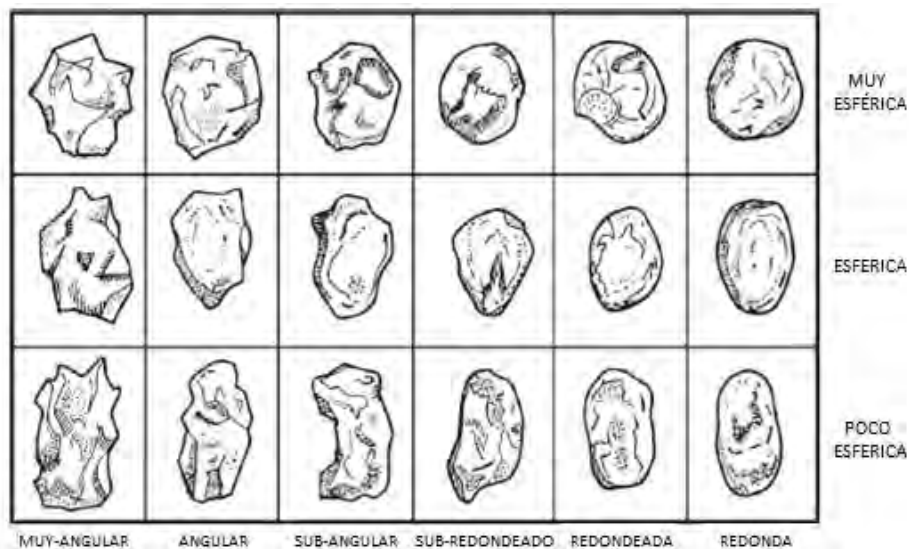


Figura 2.1 Clasificación de la morfología de los granos de arena. [13]

El tamaño y la morfología de grano de arena en conjunto determina la superficie específica de un material, que se define como el área superficial total de los granos. La superficie puede determinarse a partir de una relación empírica sobre la base de mediciones de permeabilidad y densidad. El valor resultante se puede utilizar en conjunto con los datos de propiedades mecánicas para determinar el coeficiente de angularidad. Los moldes elaborados con arena de grano irregulares tienden a ser más fuertes que los moldes de arena con granos redondos debido al entrelazado de los granos, pero poseen una menor permeabilidad y los granos redondeados con esfericidad media permite buena permeabilidad y alta resistencia con bajos contenidos de aglutinantes. ^[12]

1.2. Arcillas

Como se mencionó anteriormente el medio de moldeo no sólo implica arena ya que es una mezcla de arena sílice, arcilla (ejemplo: bentonita), agua y aditivos.

Las arcillas son el segundo componente de la mezcla del moldeo en verde. La arcilla son silicatos de aluminio hidratados cuya fórmula genérica podría ser $nSiO_2 \cdot mAl_2O_3 \cdot xH_2O$, obtenidos como productos meteorizados de rocas de silicato y cuando son sometidas a agua, produce una masa plástica o semi-plástica. Para la American Foundry Society (AFS), la arcilla se define como aquellas partículas de arena que tienen un diámetro de 20 micras o menos y, cuando se suspende en agua, no se asienta a una velocidad de 25mm por minuto. Las arcillas tienen la forma estructural general de laminar u hojuelas en el rango de tamaño de partículas 0.01-1 μm aproximadamente, y la plasticidad y el enlace se desarrollan mediante la adición de agua. Se generan fuerzas de atracción netas entre partículas de arcillas hidratadas cargadas, y entre estas, y las superficies de grano de arena. La fuerza del enlace iónico depende del área superficial total de las partículas y está fuertemente influenciada por la adsorción de cationes intercambiables en las superficies libres que modifican el equilibrio de las fuerzas locales entre las partículas.

Al secar, la pérdida de agua adsorbida produce una contracción del enrejado y un mayor fortalecimiento del enlace, de modo que los aglutinantes de arcillas son efectivos en condiciones en verde y en seco. La hidratación es reversible a temperaturas muy superiores al rango de secado: por lo tanto, los moldes se pueden secar y la unión se puede regenerar mediante la adición de agua después del ciclo. Sin embargo, el calentamiento a temperaturas progresivamente más altas elimina el agua químicamente combinada y causa la pérdida permanente de la capacidad de unión. La temperatura a la que esto ocurre varía con la arcilla particular, pero la pérdida comienza a aproximadamente 400°C y en todos los casos se completa a 700°C. A temperaturas aún más altas, las arcillas sufren cambios mineralógicos drásticos que implican la cristalización de alúmina y cristobalita y la formación de mullita.

La arcilla efectiva se define como la fracción de la arcilla presente en la arcilla total de la mezcla arena-arcilla con capacidad efectiva de unión similar a la nueva arcilla. Es necesario mantener un control cercano sobre la arcilla efectiva presente en una mezcla de arena durante el moldeo y particularmente en el caso de operaciones de moldeo de máquina de ciclo cerrado.

En base a la composición y estructura, las arcillas utilizadas en la fundición como aglutinante se pueden clasificar en tres grupos, es decir, caolinita, montmorillonita (también llamadas bentonitas) e illita (micas).

Caolinita [Al₂(OH)₄SiO₅] ^[11]

Los cristales de la caolinita están formados por finísimas láminas hexagonales y asimétricas. El tipo de enlaces que presenta entre sus moléculas es lo suficientemente fuerte para impedir que las láminas cristalinas de la caolinita se puedan dilatar y permitir la entrada de moléculas de agua en su interior. Por esa razón, las arcillas caoliniticas apenas reaccionan hinchándose en presencia de un medio acuoso y su aplicación como aglutinante de las arenas de moldeo no se considera óptima.

Montmorillonita [Na_{0,33}Mg_{0,33}Al_{1,67}(OH)₂Si₄O₁₀] ^[11]

Esta arcilla destaca ampliamente por su capacidad para cohesionar los granos de arena, aportando la plasticidad adecuada a las mezclas en las operaciones de moldeo (incluso después de la colada). Con objeto de mantener la neutralidad de cargas en el conjunto cristalino que presenta su estructura cristalina, entre las tricapas (cargadas negativamente en su superficie) aparecen siempre cationes (principalmente Na⁺ o Ca²⁺, aunque también pequeñas cantidades de Mg²⁺) que influyen decisivamente en la capacidad que tiene este tipo de arcillas para absorber las moléculas de agua.

Hoy en día existen dos tipos de montmorillonitas altamente plásticas, conocida generalmente como bentonitas, las cuales son bentonitas sódicas y bentonitas cálcicas:

Las bentonitas sódicas, se caracterizan por tener altas propiedades de hinchamiento, la cuales las más conocida está la Western o bentonita Wyoming ^[16]. Es de esperarse que estas bentonitas tengan un pH alcalino aproximadamente 9 por la presencia del ion Na⁺ en agua. Se ha comprobado que el máximo valor de resistencia a la compresión en verde para la montmorillonita sódica tiene lugar cuando hay tres capas de moléculas de agua por celda unidad del compuesto.

En el caso de la montmorillonita cálcica no suelen hincharse y adsorben solo parcialmente más agua que las caolinitas, en el caso del ion Ca²⁺ es intercambiable donde hay cierta cantidad de hidrógeno por lo que esto le da un comportamiento ácido en su pH. En cuestión de la resistencia a la compresión en verde esta montmorillonita, el máximo valor se alcanza cuando existen cuatro capas de agua por unidad del compuesto. Comparativamente, la resistencia a la compresión en verde es mayor en la variedad cálcica, respecto a la bentonita sódica, debido a que los iones Ca²⁺ y sus esferas de hidratación dan lugar a un mayor número de capas rígidas, formadas por moléculas de agua que han sido absorbidas por la arcilla y, por tanto, dan lugar a uniones más fuertes entre las partículas constituyentes.

Illita [K₂Al₄(OH)₄(Si₆Al₂)O₂₀]^[11]

La estructura cristalina en este tipo de arcillas es muy similar al caso de la montmorillonita. La presencia de catión K⁺ provoca la formación de enlaces muy fuertes entre las tricapas, impidiendo la entrada de las moléculas de agua en los espacios situados entre éstas y perjudicando sus características aglutinantes.

La función básica de la arcilla como aglutinante es producir cohesión entre los granos refractarios en verde o seco, formando una película delgada de recubrimiento alrededor de cada grano. A medida que las capas de unión se vuelven continuas y luego progresivamente más grueso, proporcionalmente se obtendrá menos ventaja de nuevas adiciones.

Dependiendo del porcentaje de arcilla presente, las mezclas en verde pueden clasificarse como saturadas con arcilla o insaturadas con arcilla mezclas. Una mezcla en verde saturada de arcilla se define como una que contiene un porcentaje suficientemente alto de arcilla que sin importa si se le este contenido de arcilla es superado este aumento no causará un aumento en la resistencia a la compresión en verde máxima. Esto significa que la mezcla de arena está completamente unida.

1.3. Arcillas y agua

Dependiendo de la cantidad de agua, todas las arcillas al ser mezcladas con agua, desarrollan propiedades de adhesividad y cohesividad. Si el contenido de agua en la mezcla arcilla-agua es bajo, las arcillas se pegan entre sí y por lo tanto hay cohesividad; mientras que, si el contenido de agua en la mezcla es alto, hay mayor tendencia a adherirse a sustancias extrañas. Esta agua es la que puede mantenerse en los materiales arcillosos sólo a temperaturas relativamente bajas y que puede ser eliminada al calentar el sistema a temperaturas entre 100 y 150 °C.^[16]

Cuando se considera la teoría sobre la naturaleza del alto grado de orden de las capas de agua en contacto íntimo con las placas de arcillas, se toma en cuenta que hay dos tipos de agua en las arcillas; (a) Agua en la superficie y alrededor de los bordes de las partículas, generalmente en los poros de esta y (b) agua interlaminar

entre las capas de las unidades de sílice. El tipo de agua (a) requiere poca energía para su separación, mientras que el tipo (b) exige considerable energía.

La resistencia a la compresión en verde de las montmorillonitas sódica y cálcica en verde, (que en inglés se llama temper point moisture content), difieren a consecuencia de los efectos que los iones Na y Ca más Mg tienen sobre la construcción y la rigidez de las capas de agua adsorbida sobre la montmorillonita.^[16]

El desarrollo de la resistencia de la unión depende de la hidratación de la arcilla. La resistencia a la compresión en verde de la mezcla aumenta con el contenido de agua en la mezcla hasta un valor óptimo determinado por la proporción de arcilla. Por encima de este valor, el agua libre adicional hace que la resistencia verde disminuya. Se cae, sin embargo, la fuerza continúa aumentando a un contenido de humedad original mucho más alto, probablemente debido a la mejor distribución del aglutinante y las densidades aparentes más altas alcanzables. Por lo tanto, mediante la determinación del óptimo contenido de agua, las propiedades de resistencias requeridas se pueden obtener con un uso mínimo de arcilla. El exceso de agua libre puede actuar como lubricante que aumenta la plasticidad, pero que puede también conducir a un descenso de la resistencia de la mezcla de moldeo. Muy poca agua no logra desarrollar la fuerza y plasticidad adecuada. El control de humedad en la mezcla de arena para que se desarrolle las mejores propiedades es una base necesaria para el control de la misma.

1.4. Mezcla (arena, bentonita y agua) y el mezclado

Para que la mezcla de moldeo se pueda usar en la fabricación de los moldes, es necesario que anteriormente se elabore una mezcla con agua y arcillas para que esta mezcla tenga la suficiente resistencia para que permita el ensamblaje, el transporte y el vaciado de los moldes. La resistencia de una mezcla de moldeo, es su capacidad para ofrecer oposición a la aplicación de cierta carga.

Básicamente, el mezclado de las arenas de moldeo tiene dos funciones que son:
(a) Mezclar uniformemente la arena, arcilla, agua y los demás materiales de moldeo

usados como aditivos; y (b) mover y presionar repetidamente la arcilla húmeda, con el objeto de que se desarrollen las propiedades enlazantes. [16]

La naturaleza típica de las mezclas de agua-arcilla es la principal razón por la cual los granos de arena pueden ser recubiertos por una capa de arcilla durante el mezclado y, más tarde, aglomerados durante el proceso de moldeo. Sin embargo, un prerequisite necesario para el desarrollo de la resistencia de las arenas de moldeo es la aparición de la pegajosidad en la arcilla. A menos que aparezca esta propiedad, no se puede formar una unión entre los granos de arena. Una vez que la unión se ha hecho posible, las propiedades de las mezclas de moldeo, tales como la resistencia, deformación, fragilidad, etc., dependerán solamente de las propiedades mecánicas de las arcillas, si se mantiene contrastante todos los demás factores.

Uno de los factores que se pueden modificar en el mezclado es el tiempo de éste, puesto que la resistencia de la mezcla aumenta rápidamente durante las primeras etapas, para permanecer constante después de cierto tiempo, como se puede observar en la **Figura 2.2**.

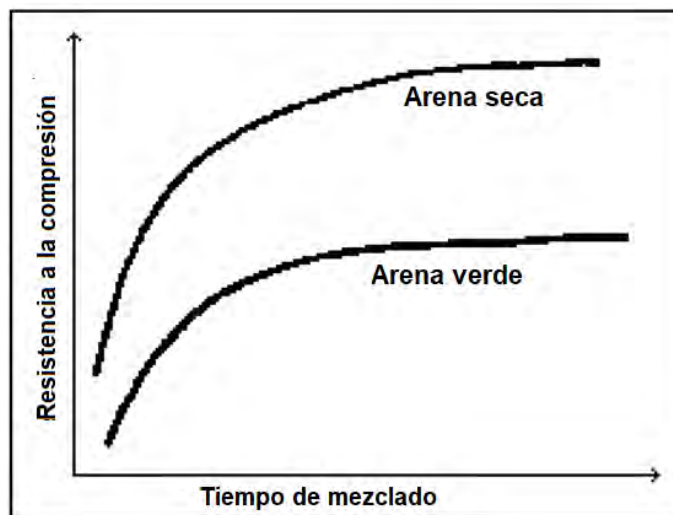


Figura 2.2. Desarrollo de la resistencia en la arena de moldeo como función del tiempo mezclado. [16]

En la **Figura 2.2**, muestra como varía la resistencia a la compresión en verde en función del tiempo de mezclado para una arena seca y una arena verde. Si no hay

desarrollo completo de las propiedades de la arena de moldeo, es necesario el uso de una mayor cantidad de arcilla, lo que conduce a un proceso nada económico, ya que la bentonita es un aditivo costoso a diferencia de la arena de sílice.

Otro factor que afecta notablemente al mezclado es la temperatura, ya que a medida que esta aumenta en una arcilla húmeda se producen cambios, algunos de los cuales son reversible. Esos cambios se pueden resumir de la siguiente manera ^[16]:

- a) Si la arcilla se deja estar al aire libre o a la temperatura ambiente, el agua es removida o es adsorbida; éste, es un cambio reversible. La remoción del agua libre produce un aumento en la resistencia.
- b) Otro cambio reversible que tiene poco efecto sobre las propiedades de la arcilla es la remoción del agua hasta temperaturas del orden de los 300°C.
- c) Cuando las temperaturas alcanzan los 650°C, se produce la remoción del agua de combinación, que es un cambio irreversible para producir lo que se conoce como arcilla latente. Esta pérdida del agua de combinación conduce a pérdidas de las propiedades enlazantes de la arcilla. ^[17]
- d) Si la temperatura aumenta por encima de los 650°C, los constituyentes de la arcilla se rearreglan para producir nuevos compuestos, lo que produce un apreciable aumento de la resistencia. Dado que las bentonitas contienen ^[16] carbonato de calcio bajo la forma de caliza; a temperaturas del orden de los 900 °C teóricamente se produce la descomposición de los carbonatos, para producir gas carbónico. Sin embargo, realmente a 700 °C se produce la descomposición de todo el carbonato y esta degradación térmica tiene interés tecnológico y económico, porque puede conducir a defectos en las piezas vaciadas; en particular, ya que debido a la pérdida de CO₂ de los carbonatos que se han descompuesto, junto a la pérdida de agua de combinación, puede ser una fuente generadora de porosidad gaseosa (pinholes).

e) Cuando las temperaturas son mayores, comienza la fusión y entonces la resistencia decae rápidamente. Por lo tanto, si la arena se mezcla cuando aún está tibia, las propiedades de resistencia caen drásticamente y es por esa razón por la cual, la arena debe enfriarse durante bastante tiempo.

1.5. Aditivos

Aunque los ingredientes básicos de una mezcla de arena son sólo arena, arcilla y agua, a menudo se agregan otros materiales en cantidades pequeñas para moldeo y arenas de corazones para fines especiales. Algunos de los aditivos más importantes incluyen cereal, polvo de carbón, óxido de hierro, melaza, dextrina, etc. Los cuales algunos de ellos se muestran en la **Tabla 2.3**, donde también se menciona su función que se tiene para el moldeo de la mezcla.

Los aditivos pueden ser de naturaleza reductora o fibrosa, o pueden actuar como agentes aglutinantes. Estos también pueden ayudar a mejorar la temperatura, plasticidad y resistencia en caliente, además, producen propiedades de penetración anti-metal e imparten un buen acabado superficial al fundir. Es necesario seleccionar el tipo correcto y determinar la proporción correcta del aditivo para cualquier condición de moldeo y fundición para permitir la producción de piezas fundidas sin defectos.

Tabla 2.3. Funciones de aditivos para moldeo en verde.

Función	Aditivo
Aumentar la colapsabilidad	Cereales, melaza, materiales fibrosos
Reducir los problemas de expansión	Cereales, carbón marino, materiales fibrosos
Aumenta la resistencia en verde	Carbón marino, melaza
Reduce la penetración del metal	Cereales, melaza, resina, aceite de linaza, vidrio soluble
Aumentar la fluidez	Resina, materiales fibrosos
Mejora el acabado superficial	Carbón marino, resina
Aumenta la vida en el silo	Cereales, resina, melaza

Cuando se emplea una arena natural en la que no han de efectuarse adiciones, las únicas precauciones que hay que tener en cuenta son las de añadir el agua lo más

rápidamente posible, para evitar la formación de polvo y poder añadir los aditivos, cuando la arena está húmeda.

En las arenas sintéticas se debe evitar una mezcla preliminar de los constituyentes secos. Generalmente se recomienda al cargar el molino, añadir primero la arena y el agua, durante un corto tiempo y posteriormente los materiales finos.

Aunque algunas ocasiones para provocar mejoramiento en la cohesividad entre los granos de arena, se procura colocar la arena junto con las arcillas, para que estas últimas se adhieran a los granos de arena y con la agregación del agua, exista cohesión entre los granos de arenas ya rodeadas de las arcillas hidratadas.

2. Etapa de moldeo.

Una vez preparadas las mezclas de moldeo, se les moldea sobre el modelo (placa modelo) contenido en las cajas de moldeo. Se entiende^[18] por moldeo, la acción de apisonar (compactar) esta mezcla sobre un modelo determinado de tal manera que cuando se le retire, es decir se haga el desmoldeo quede reproducida perfectamente la forma del modelo en sus mínimos detalles; teniendo propiedades que permitan su posterior manipulación para producir la pieza por vaciado de las aleaciones sobre ese molde.

Desde el punto de vista del moldeo, las propiedades que debe poseer esa mezcla son fundamentalmente^[18]:

1. Que los granos de arena recubiertos de arcilla se agreguen o se compacten de una manera uniforme, bajo el impacto de energía;
2. Que bajo la acción de esta energía adquiera ciertas propiedades mecánicas;
3. Que permita retirar el modelo del molde, lo que quiere decir que permita el desmoldeo.

Cuando la mezcla se descarga del molino, está en forma de agregados que hay que desmenuzar, ya que las mejores superficies en las piezas se conseguirán, teóricamente, cuando cada grano cae individualmente sobre la superficie del

modelo. Para ello, se hace pasar la mezcla por tamices o aparatos que haga la misma función, de desmenuzar la mezcla.

Cuando ya se tenga lista la mezcla se continua con el paso de moldeo, en dónde la presión de moldeo debe de ser suficientemente grande como para poner en contacto los granos de arena, por lo que se produce el aumento del número de puntos de contacto y también se aumenta la sección transversal de cada área de contacto. Durante las primeras etapas del apisonado, los granos se deslizan hasta alcanzar un modelo compacto de empaquetamiento, produciéndose posteriormente presión a través de cada contacto como se esquematiza ^[18] en la **Figura 2.3**.

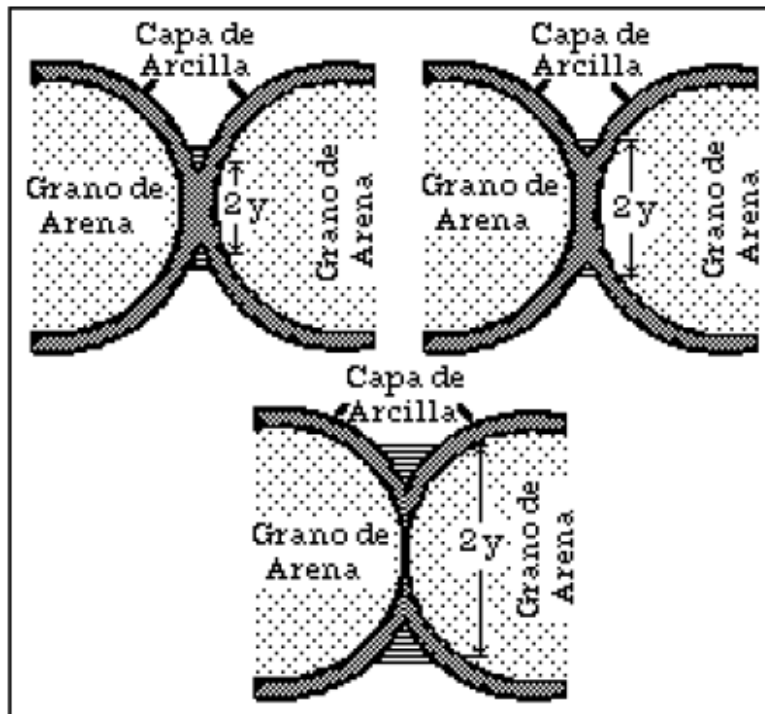


Figura 2.3. Visualización del arreglo en el sistema arena-agua-arcilla durante el moldeo. ^[15]

En la **Figura 2.3** se puede observar que a medida que se va comprimiendo la mezcla de moldeo se produce deslizamiento de los granos de arena recubiertos con arcilla, donde el desplazamiento de ésta es cada vez mayor hacia los bordes, para producir un aumento de la superficie de contacto, definido en ella por la distancia " $2y$ ". ^[15]

Una vez elaborado el molde lo mejor posible, este tiene que tener unas ciertas características y propiedades para que lo hagan útil al colar el metal en él. Existen dos tipos de propiedades que se necesitan saber en muchos casos, las propiedades de molde a temperatura ambiente y las propiedades de molde a altas temperaturas.

Muchas de las propiedades se van derivando del empaquetamiento de las partículas que tienen en la mezcla, puesto que está conformada por partículas de diversos tamaños y formas. Se puede obtener una densidad máxima si cada grano se colocase en su lugar adecuado, los granos pequeños llenarían los vacíos entre lo más grandes y así *ad infinitum* (continuar indefinidamente hasta el tamaño más pequeño de grano en la mezcla). El problema de esta densidad máxima es que la porosidad tendería a cero.

Las adicciones crecientes de arcillas tienen un efecto más o menos pronunciado en la densidad de la mezcla, según el contenido en agua de la misma. Para porcentajes de agua normales, es decir, para márgenes de agua en que las mezclas muestran una gran fragilidad y son difíciles de trabajar, la cantidad de arcilla tiende a aumentar la densidad de las mezclas muy notablemente. Esta misma tendencia se muestra en contenidos muy superiores de agua.

El porcentaje de arcilla también influye en la permeabilidad de la mezcla. En primer lugar, para cada porcentaje de bentonita, existe una permeabilidad óptima. Para porcentajes de agua constantes, la permeabilidad disminuye, rápidamente al principio, y más lentamente después, para contenidos crecientes de arcilla. Este fenómeno parece comprobar el hecho de que la arcilla que recubre cada grano ha sido desplazada hacia los huecos intergranulares, siendo este relleno de los huecos más pronunciados para los primeros incrementos de arcillas. Sin embargo, para considerar el verdadero efecto de la arcilla, deben compararse mezclas en las que las proporciones crecientes de arcilla vayan acompañadas de proporciones de agua, para que la naturaleza de esta mezcla no se altere, ya que una mezcla arcillosa en la que la relación arcilla-agua sea de un 50:50, se comportara diferente en la relación arcilla-agua sea, por ejemplo, 70:30. Si se consideran las mezclas

desde este punto de vista, la disminución de la permeabilidad es casi una relación lineal, dependiente de la cantidad de agua-arcilla.

En general, como las mezclas de agua-arcilla-arena no tienen un comportamiento paralelo, la comparación de sus propiedades para un contenido determinado de agua, no refleja correctamente la diferencia de comportamiento de éstas. En la **Figura 2.4** se muestran los valores máximos de resistencia a la compresión en verde de diversos tipos y cantidades crecientes de arcilla.

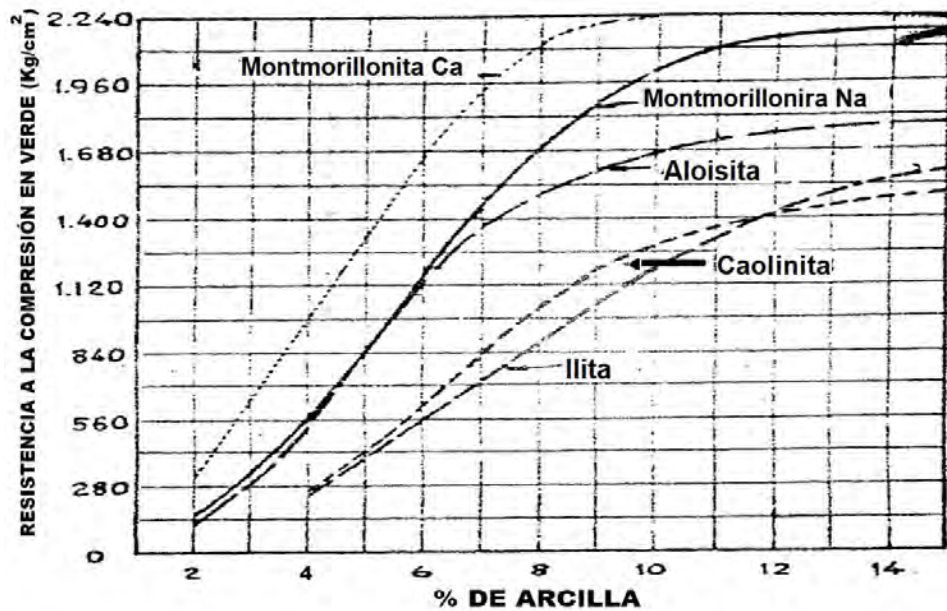


Figura 2.4. Máxima resistencia a la compresión en verde para arenas aglomeradas con distintas arcillas. [22]

Se puede considerar el comportamiento a porcentajes de agua paralelo, a excepción de las bentonitas cálcicas, en las cuales, la disminución de la resistencia a la compresión en verde es tan brusca, que para contenidos de agua del orden de 4% para una mezcla que contenga el 4% de arcilla, se invierten los valores de resistencia mecánica, dando las bentonitas sódicas mayores valores que las cálcicas. Aún dentro del mismo grupo de las bentonitas sódicas, la resistencia varía muy marcadamente, según la cantidad de los cationes absorbidos, además,

también cambia respecto al tipo de cationes, si se habla de bentonita sódica y cálcica

La densidad aparente varía de acuerdo al tipo y naturaleza de la arcilla como se puede observar en la siguiente **Figura 2.5**.

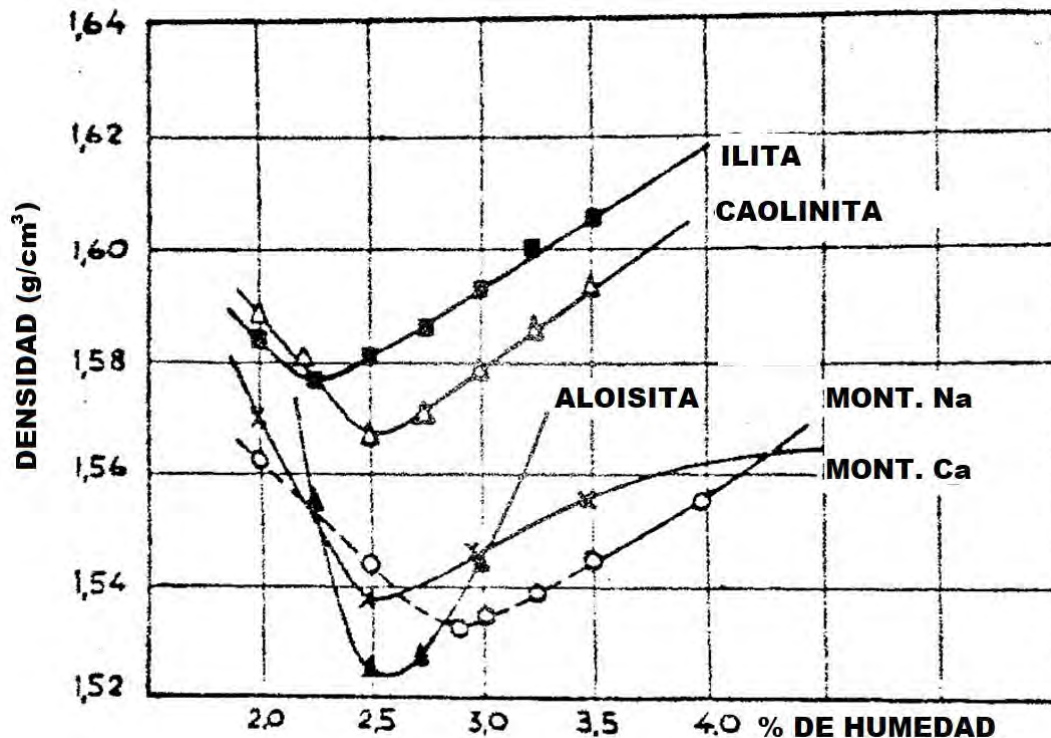


Figura 2.5. Influencia del tipo de arcilla en la densidad de las arenas de moldeo. [22]

La cantidad de agua también tiene una influencia notable en la densidad aparente. Para contenidos crecientes de humedad, la densidad aparente va disminuyendo hasta que llega a un mínimo, a partir del cual, esta propiedad aumenta muy rápidamente. A veces, coincide el mínimo de densidad aparente con el máximo de resistencia, aunque en general, este mínimo está algo desplazado hacia la derecha del punto de máxima resistencia.

Ello es debido a que, para cantidades grandes de agua, la naturaleza de aglomerante arcilloso es tal que se deforma muy fácilmente por presiones ejercidas sobre la masa de moldeo. Ello lleva consigo el que los granos de arena van

adquiriendo resistencias cada vez mayores y evita el empaquetamiento denso de los granos, impidiendo su movimiento hacia los sitios de menor densidad. Este impedimento llega a un cierto máximo y, por lo tanto, a un mínimo de densidad aparente, a partir de esta concentración de humedad, la arcilla pierde sus propiedades adhesivas, comportándose cada grano de arena recubierto con arcilla, como una individualidad separada, incapaz de mostrar cohesión a otras unidades semejantes. Cuando menor es el contenido de agua, menor es el freno que oponen unos granos a otros y la mezcla empieza a comportarse como mezcla seca en la que los granos fluyen libremente, unos sobre otros y tienden, por libertad de impedimento a agregarse densamente. [22]

Como se menciona anteriormente sobre el porcentaje de arcilla que influye en la permeabilidad de la mezcla, cabe mencionar que no sólo en esa propiedad, sino también en la resistencia a la compresión en verde, esto se puede apreciar en la **Figura 2.6**, en donde se muestra fácilmente las relaciones entre la resistencia a la compresión en verde, el contenido de humedad, el contenido de bentonita y la permeabilidad. La resistencia a la compresión en verde de la mezcla aumentó con el incremento de la bentonita, pero hay que tener en cuenta que, para cada contenido de bentonita, hay un aumento rápido de la resistencia en verde con las primeras adiciones de humedad, y luego una disminución gradual en la resistencia a la compresión en verde a medida que aumenta el contenido de humedad. Las líneas discontinuas que se observan en la **Figura 2.6** muestran las diversas permeabilidades que se obtienen para los diversos contenidos de bentonita y humedad. Esto brinda información sobre qué cambios se pueden hacer para corregir las propiedades de la mezcla, y también dar información sobre las combinaciones particulares de aglutinante y humedad para usar en una nueva mezcla para obtener ciertas propiedades deseadas. [2]

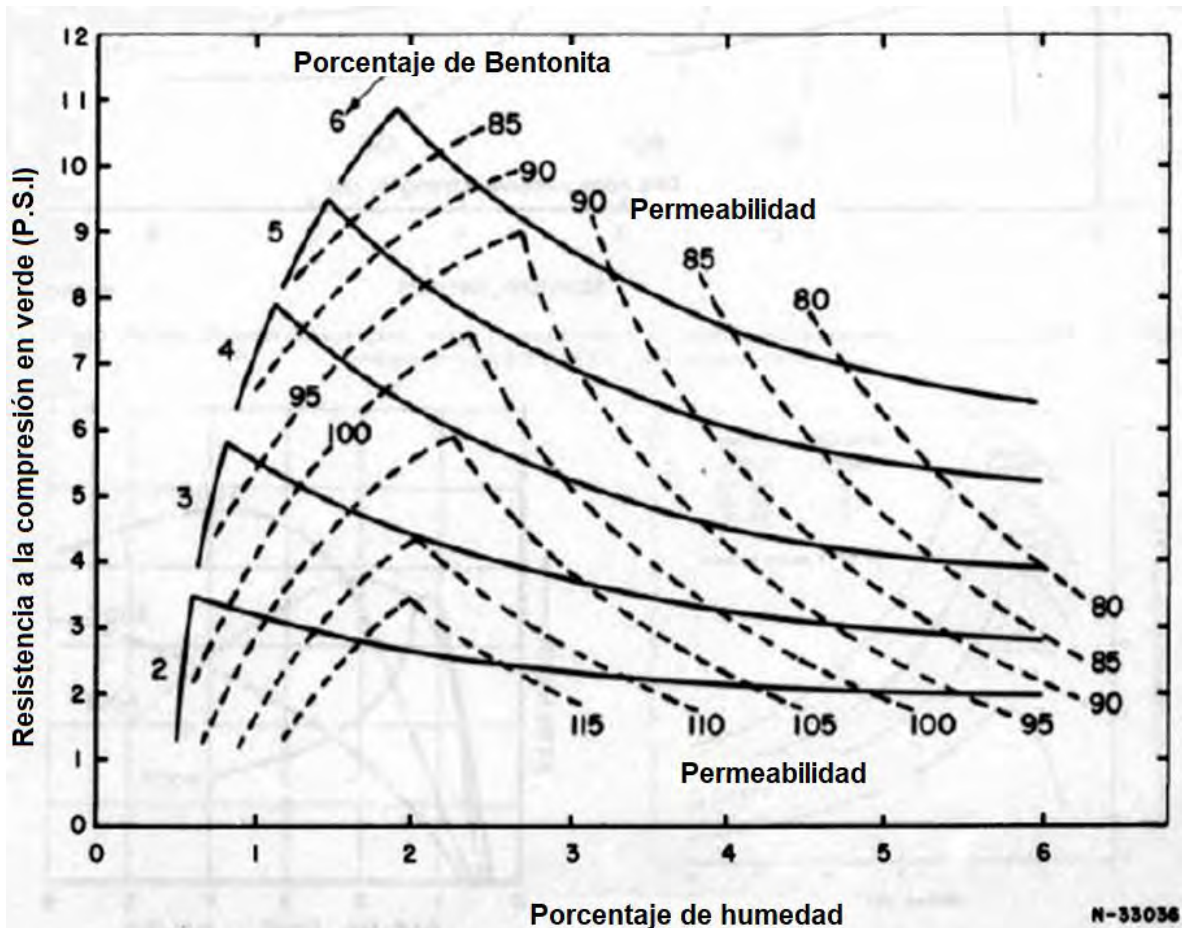


Figura 2.6. Relación entre el porcentaje de humedad, contenido de bentonita, resistencia de compresión en verde y permeabilidad. [2]

Cabe mencionar que también estas propiedades cambian de acuerdo a la forma y tamaño de grano de sílice de la arena, por lo cual, para conocer el comportamiento de una mezcla especial, para unas series de experimentos, es necesario hacer la serie de experimentos de acuerdo a las especificaciones de la arena, bentonita y aditivos que se agregarían.

Las características básicas del molde de arena y términos se aplican también a los modelos de otros procesos de fundición. El molde consiste generalmente en dos mitades: la tapa o semicaja o semimolde superior (Cope) y la semicaja o semimolde inferior (Drag). Ambas están contenidas en la caja de moldeo, que también se divide

en dos partes: una para cada parte del molde; las dos mitades del molde están separadas por la línea de partición, como se observa en la **Figura 2.7**.

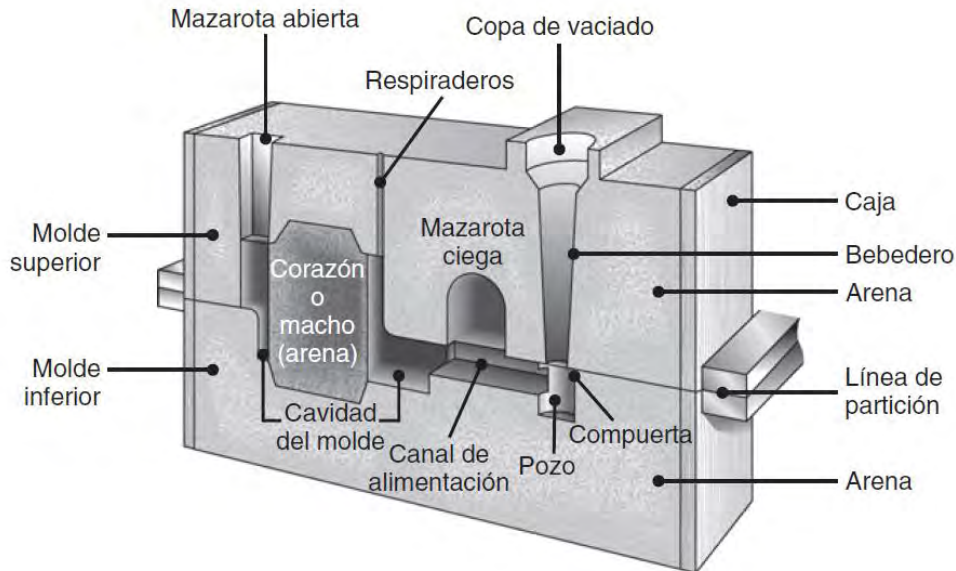


Figura 2.7. Molde horizontal bipartido de la fundición en arena ^[1].

En un molde de mezcla en verde (y otros procesos de molde desechable) la cavidad del molde se forma mediante un modelo de madera, metal, plástico u otro material, que tiene la forma de la pieza que se desea o se requiere. La cavidad se forma al cubrir homogéneamente el modelo con la mezcla, de manera que al remover el modelo quede una cavidad que tenga la forma deseada de la pieza. El modelo se sobredimensiona principalmente para compensar la contracción del metal líquido cuando éste se solidifica y enfría.

Modelo ^[1].

Los modelos se utilizan para dar la forma de la pieza a fabricar; pueden estar hechos de madera, plástico o metal. La selección de un material para el modelo depende del tamaño y la geometría de la pieza, la precisión dimensional, la cantidad de piezas requeridas y el proceso de moldeo. Debido a que los modelos se reutilizan para elaborar moldes, la resistencia y durabilidad del material elegido debe reflejar el número de piezas que dichos modelos producirán. Éstos pueden fabricarse de

una combinación de materiales para reducir el desgaste en regiones críticas, y por lo general se recubren con un agente de separación (desmoldeante) para que la placa modelo se extraiga más fácilmente de los moldes.

3. Bentonita latente

Cuando se vierte metal líquido en un molde de arena en verde, parte de la arcilla se calienta a una temperatura a la cual se descompone y alguna arcilla latente (dead clay) siempre se forma. Parte de esta arcilla puede ser removida con arena adherida al molde, pero algunas quedan atrás y en secuencia de operaciones la cantidad de arcilla latente se acumulará a un ritmo gradualmente decreciente hasta que la cantidad extraída con el molde sea igual a la cantidad producida. No hay forma de eliminar la arcilla latente de una mezcla para moldeo en verde sin eliminar al mismo tiempo arcilla activa (Bentonita Activa) u otro material de grano fino. Además, no es posible estimar la cantidad de arcilla latente en una mezcla que también tiene arcilla activa, con algún grado de precisión. Pero se puede determinar la arcilla activa y hacer la diferencia de la arcilla inicial de la mezcla.

Para determinar los efectos de la arcilla latente sobre las propiedades físicas y mecánicas de una mezcla para moldeo en verde, se produjo unas series de mezclas en las que el contenido de arcilla activa fue constante y la cantidad de arcilla latente se elevó en pasos. En la **Figura 2.8** se muestra la variación de la resistencia en verde a diferentes humedades de un experimento que consiste en:

- Calentar una mezcla con contenido de arcilla conocido hasta que se completara la degradación de las arcillas.
- Se preparó una mezcla sintética a partir de arena de sílice Erith y 5% de bentonita de Western. Se midieron la resistencia en verde y el índice de impacto en un rango de contenido de humedad.
- Cada mezcla probada se preparó a partir de arena y arcilla nueva para que se pudiera mantener un tiempo de mezclado constante y toda la arena se calentó a 800°C durante 1 h.

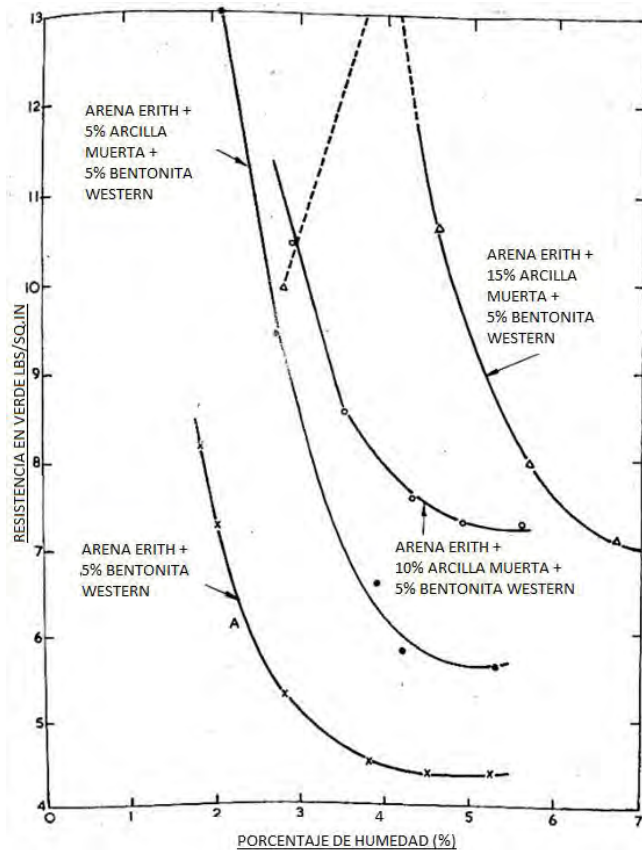


Figura 2.8. Efecto de la bentonita latente (bentonita muerta) en la resistencia en verde. [2]

La **Figura 2.8**, muestra que a medida que aumenta la cantidad de arcilla latente, las curvas se mueven hacia la derecha, es decir, en la dirección de mayor contenido de humedad. La arcilla latente tiene una superficie muy grande, del mismo orden que la arcilla activa, y absorbe una cantidad correspondientemente grande de agua.

Se ha mostrado también que el aumento en la resistencia en verde a un índice de fragmentación (shatter) constante conduce a un aumento en la fragilidad y en un deterioro en las propiedades de moldeo, y que una caída en el índice de fragmentación al constante esfuerzo en verde tiene un efecto similar. El mismo deterioro debe ocurrir en un grado mejorado cuando ocurre un aumento en la resistencia en verde y una caída en el índice de fragmentación.

El índice shatter como su nombre lo indica, solo es un índice de la dureza de la mezcla de arena en verde bajo impacto, por esto en algunos laboratorios metalúrgicos lo denominan ensayo de impacto.

Un método para neutralizar el efecto de la arcilla latente, es reducir la adición de arcilla lo suficiente para mantener la resistencia en verde constante. Sin embargo, el índice de fragmentación se puede elevar sin aumentar la resistencia en verde mediante la adición de una pequeña cantidad de dextrina o uno de los otros aglutinantes en verde utilizados en las mezclas de aceite y arena, y se puede mantener las propiedades de la mezcla. Se necesitan pruebas muy frecuentes sobre las propiedades de la mezcla, ya que una pequeña cantidad de aglutinante orgánico produce un gran aumento en el índice de fragmentación. Los aglutinantes orgánicos se descomponen más fácilmente que las arcillas hay una reducción en la cantidad presente en la mezcla de la ya utilizada y en el momento apropiado existe una caída rápida en el índice de rotura de la misma. No es fácil prever el tiempo exacto cuando la arena deficiente en el aglutinante llega al molino y hacer los ajustes necesarios.

La forma de mayor éxito para rescatar las operaciones en el proceso de moldeo en verde, más seguro y a largo plazo económico, para evitar la necesidad de tales medidas de seguridad es agregar una cantidad adecuada de mezcla nueva.

4. Control de la Mezcla. ^[2] ^[16]

Cuando se vierte metal líquido en un molde de arena en verde, ocurren los siguientes cambios en la mezcla:

- I. Se pierde humedad.
- II. Se descompone una fracción de aditivo (por ejemplo, carbón marino o brea).
- III. Parte de la arcilla se calienta a la temperatura a la que se destruyen sus propiedades de aglutinar.

Con respecto a la humedad que se pierde cuando la mezcla se retira de un molde que se ha colado, la parte interna está caliente y seca, y la parte externa está relativamente fría y húmeda. Esto tiene como consecuencia que:

- Las proporciones de los dos pueden variar ampliamente.
- La cantidad de mezcla húmeda disminuye a medida que aumenta la relación metal/mezcla.

- También la cantidad de mezcla húmeda disminuye con el aumento del tiempo entre vertido del metal líquido y de su desmoldeo.

Además, la mezcla contiene rebabas, principalmente de derrames durante el vertido, y de corazones (machos), si son elaborados con aglutinantes orgánicos o silicato de sodio. Antes de que la mezcla pueda prepararse para su reutilización, el material extraño debe eliminarse y la mezcla debe enfriarse. Sin embargo, la arena de limpieza y enfriamiento plantea problemas que pueden diferir enormemente en las fundiciones que utilizan diferentes métodos de producción.

En un extremo están los moldeadores, manualmente llevan a cabo todas las operaciones, excepto la fusión real del metal: verter, sacudir y limpiar parcialmente las piezas moldeadas, y volver a acondicionar el moldeo de la mezcla. Limpiar la mezcla es una operación algo larga. Cualquier fragmento grande de metal se retira de la parte superior del molde antes de desmoldearlo, pero la separación completa de los pequeños gránulos es imposible, y en estas condiciones la mezcla con frecuencia contiene un porcentaje de metal. Esto, por regla general, no causa problemas graves, ya que bajo las condiciones anteriores se utiliza una mezcla de revestimiento que contiene una gran proporción de arena nueva, reduciendo la proporción de metal por dilución y la mezcla se tamiza en el patrón que elimina todo excepto las piezas muy pequeñas. El enfriamiento en la mezcla no es un problema.

Cuando la producción es lenta y la mezcla no se reutiliza varias veces al día, y existe una delimitada entrada de calor, la arena se puede extender a lo largo de un área grande que favorece el enfriamiento. Finalmente, el uso de una proporción relativamente grande de mezcla nueva y fría reduce la temperatura en un momento en que la mezcla no está muy caliente.

En el otro extremo está la fundición mecanizada, en la cual toda la mezcla que sale de una máquina, que separa las piezas de la mezcla por sacudidas, pasa sobre una polea magnética para eliminar el metal (en caso de los hierros colados) y a través de una rejilla para eliminar las piezas metálicas no magnéticas y otros materiales extraños. La limpieza no presenta ninguna dificultad, pero la mezcla se puede usar

varias veces al día, la entrada de calor aumenta y el tiempo de enfriamiento es reducido. Este tiempo de enfriamiento presenta un problema serio.

Como se mencionó anteriormente, la mezcla de arena en verde cerca de la superficie de la pieza se calienta a la temperatura en la cual la arcilla se degrada pierde sus propiedades de aglutinar, en caso de llevar la mezcla carbón marino, éste se descompone y, caso contrario, cuando la mezcla está alejada de la superficie del molde no se verá afectada. Un método para minimizar la pérdida del carbón marino, es usar una mezcla de arena de revestimiento. La mezcla de arena de revestimiento tiene más polvo de carbón y más arena nueva que la mezcla de retorno, y se incurriría en un costo adicional al acercar la mezcla de retorno a la calidad de la mezcla óptima para el proceso, aunque en la práctica, el ahorro en precio en el área de moldeado es insignificante durante un período cuando se utilizan las dos mezclas en lugar de una mezcla de un solo tipo. Una vez que toda la mezcla de arena en la fundición se ha hecho adecuada para volverla de nuevo a la condición óptima para el proceso, el costo de mantenerla en esa condición es solo marginalmente mayor que la de mantener las mezclas de arenas de revestimiento y de reúso independientes.

Las dificultades experimentadas en el control de la mezcla cuando se sacuden moldes en todo el piso de la fundición son reales, y el uso de una mezcla separada no solo permite aplicar un esfuerzo a una cantidad mucho menor de mezcla, sino que también elimina algunas de las incertidumbres que requieren atención en una unidad de mezcla.

Al preparar el siguiente lote de arena de revestimiento, la mezcla devuelta se diluye con una gran proporción de mezcla nueva, lo que reduce aún más la cantidad de polvo de carbón hasta el punto en que puede ignorarse. Al mismo tiempo, la gran dilución con mezcla nueva evita cualquier acumulación seria de arcilla latente.

Cuando se utiliza arena de revestimiento separada en una planta mecanizada, en la mayoría de los casos es por una u otra de tres razones:

1. Los intentos de enfriar la mezcla de retorno no han tenido éxito y la mezcla de nueva se utiliza para mantener la mezcla de arena caliente alejada del patrón. Generalmente no hay dificultad para enfriar la pequeña cantidad de arena usada que se necesita en un revestimiento, y la adición de una cantidad comparativamente grande de arena nueva completa el trabajo.
2. La capacidad de mezclado es inadecuada y se pueden obtener mejores resultados en el departamento de fabricación de moldes al concentrar la mitad de la mezclada disponible en un silo de la arena a tratar.
3. Se está realizando una amplia gama de fundiciones, y se requiere un acabado superficial mejor que el habitual para un tipo particular, o uno es de un diseño tal que es probable que se forme una costra.

Es necesario cierto control de la arena en verde mezclada con la nueva, porque no es posible, en una mezcla que contenga arena en verde usada, recuperar las propiedades obtenidas con todos los materiales nuevos.

Cuando se retiran las piezas moldeadas y se prepara la arena en verde para su reutilización, se producen tres cambios adicionales (algunas de ellas ya mencionadas anteriormente):

- a) Se elimina el material fino en forma de polvo, que puede consistir en los granos más finos de la arena original o los productos de descomposición del carbón.
- b) Se elimina algo de arena con el molde.
- c) Se agrega un poco de arena nueva para reemplazar la que se eliminó con los moldes y para mantener el volumen de arena en el sistema

El alcance de estos cambios depende de una serie de factores, de los cuales los más importantes son la relación entre el peso del metal vertido y el peso de la mezcla en las cajas y el tiempo entre el vertido y el desmoldeo. Se podría esperar que, si sólo se estaba produciendo una fundición particular en un sistema, todos los cambios serían constantes y se podrían obtener propiedades constantes de la

mezcla simplemente agregando una proporción fija de agua, arena nueva, arcilla y aditivos (la selección de los aditivos depende de la aleación a fabricar).

En la práctica, esto no es exitoso, porque el equilibrio así obtenido puede alterarse por cualquiera de una serie de contratiempos que es probable que ocurran de vez en cuando. Si, por ejemplo, hay un obstáculo en el desmoldeo, las coladas calientes permanecen en el molde durante más tiempo de lo normal y se elimina más agua. Si la cantidad de agua añadida es constante, una cierta cantidad de mezcla con un contenido de humedad demasiado bajo llega a las máquinas de moldeo, por lo que, se elaborarán malos moldes que no se vierten, y dado que la única forma conveniente de tratarlos es en la sacudida, un lote de la mezcla ingresa al sistema con un contenido de humedad superior al habitual, causando aún más problemas en las máquinas de moldeo. En poco tiempo, el sistema se vuelve completamente fuera de control, lo que demuestra que el equilibrio previo era inestable.

El objeto de las pruebas de control (caracterización de las mezclas) es advertir sobre los cambios en las propiedades de la mezcla y permitir que se tomen medidas correctivas antes de que se produzcan efectos nocivos en la fundición.

El control de las arenas de moldeo mediante ensayos normalizados, aun cuando esos ensayos se han diseñado para reproducir la práctica de fundición, si el muestreo es adecuado, por lo tanto, los resultados serán confiables para la predicción de una determinada cantidad de mezcla que entra y sale del molino, denominada en inglés batch; y como se mencionó, sirven, cuando se analizan correctamente, para ayudar a eliminar o para controlar las causas que originan defectos de fundición.

Estos ensayos, fundamentalmente se clasifican en: (a) los que miden la consistencia de la arena en verde que se prepara; y (b) los que evalúan propiedades físicas y químicas requeridas para la producción de piezas de calidad. Para garantizar precisión y reproducibilidad, es necesario hacer un mínimo de tres muestras por propiedad a evaluar.

Entre los ensayos que miden la consistencia de una mezcla de moldeo en verde, se tienen: porcentaje de humedad, porcentaje de compactibilidad, peso de la muestra (peso de la probeta norma), permeabilidad, resistencia a la compresión en verde, y resistencia a la compresión en seco.

Los ensayos que miden características físicas y químicas son: contenido de arcilla, análisis de granulométrico de la arena base, y temperatura de la arena de moldeo.

Cuando se ensayan propiedades de las mezclas de arena en verde, es necesario diferenciar entre: (1) Resistencia en Verde, es decir, la resistencia de la mezcla en el estado húmedo tal como ha sido preparada, (2) Resistencia en Seco o resistencia en el estado de curado o cocido, (3) Resistencia en Caliente o resistencia de una mezcla en verde o de un macho después de vaciado, y (4) Resistencia Superficial, que es la resistencia a la abrasión, ofrecida por las capas superficiales del molde, que depende del desmoronamiento (dureza).

4.1 Control de humedad

De todas las pruebas de control, el contenido de humedad es, por mucho, el más importante. En primer lugar, el contenido de humedad en la mezcla reusada varía más ampliamente y más rápidamente que cualquier otra propiedad. Por ejemplo, si se deja la pieza colada mucho tiempo en el molde, produce un aumento apreciable en la cantidad de arcilla latente formada o aditivos descompuestos, pero si se deja un período mucho más corto tiene una influencia considerable solo en la cantidad de agua eliminada. En segundo lugar, un cambio no deseado en el contenido de humedad puede causar problemas en la distribución de la arena y en la fabricación de moldes, y puede provocar un aumento de rechazos.

Otro problema con la humedad de las mezclas de arena en verde, es que generalmente estas tienden a pegarse en las tolvas, y la adherencia es más pronunciada cuando el contenido de humedad es alto, el efecto más serio de los cambios en la humedad es el efecto sobre la alimentación de dispositivos como la

tolva cilíndrica vertical con una mesa giratoria. Si el contenido de humedad es alto, la velocidad de alimentación se reduce y si es baja, la tasa aumenta.

Tal cambio puede conducir a una medición incorrecta de los constituyentes de la mezcla preparada, pero su efecto es más grave cuando ésta debe alimentarse a una velocidad constante a una máquina tal como un molino. En un caso particular, la llegada de un lote de mezcla de arena en verde con un bajo contenido de humedad dio como resultado la descarga inmediata de todo el contenido de la tolva durante 2 segundos aproximadamente, inundando el área inmediata y deteniendo la producción. Pequeños cambios en el contenido de humedad conducen a cambios menos espectaculares, pero no menos importantes en el comportamiento de la máquina que producen moldes de dureza irregular.

Cuando se habla de apisonar, un aumento moderado en el contenido de humedad conduce a un aumento en la tenacidad, que a su vez conduce a un aumento en las diferencias de dureza entre las partes del molde, lo que puede conducir a la dilatación de la cavidad del molde en casos particularmente susceptibles. Un gran aumento en el contenido de humedad conduce a la adherencia de la mezcla en la placa modelo. La extracción se puede mejorar calentando el patrón, pero esto no debería ser necesario, ya que, si se lleva demasiado lejos, puede conducir a la producción de piezas defectuosas. La superficie del molde se eleva a una temperatura tal que tiene lugar el secado al aire, y la superficie del molde se vuelve friable, particularmente en los bordes de la cavidad del molde. Si es necesario insertar corazones, existe un mayor riesgo de que los granos de arena se desplacen durante la operación y aparezcan como inclusiones en las piezas fundidas. Se encuentran dificultades similares, y a veces más pronunciadas, cuando la mezcla está caliente. En este caso, la humedad se condensa la placa modelo formando una capa de alto contenido de humedad en la cara, y la mezcla se comporta de la manera indicada anteriormente cuando la mezcla estaba demasiado húmeda.

Dado que el contenido de humedad tiene una influencia pronunciada en las propiedades de la mezcla, en particular la resistencia en verde, la tenacidad y la

resistencia en seco, y también forma la mayor parte del gas que se genera cuando el metal se vierte, puede ser responsable de casi cualquier defecto que se deba al fallo del molde. Los más importantes son: ^[2]

- Baja humedad. Esto causa arena quebradiza y malas elevaciones, y baja resistencia al secado que conduce a inclusiones y costras de erosión.
- Alta humedad. Esto causa alta y prolongada evolución de gas que conduce a grietamientos y fallas en secciones delgadas y rugosidad, y costras en secciones gruesas, empaque irregular que conduce a un mal acabado superficial, y alta deformación y baja resistencia, lo que produce hinchazón y falta de solidez, y ruptura.
- Permeabilidad. Cuando se vierte metal fundido en un molde en verde, la mayor parte del gas emitido es vapor de agua y este tiene que escapar a través de la pared del molde. Se podría esperar, por lo tanto, que hubiera una relación directa entre la permeabilidad del molde calculada a partir de la permeabilidad de la mezcla, la dureza del molde y el grosor del molde, el contenido de humedad y la incidencia de golpes. En la práctica esto no es necesariamente así.

Por la influencia que tiene el agua en las propiedades del medio de moldeo es necesario mantener un control. A continuación, se mencionarán dos métodos generales para el control del contenido de humedad.

Método Directo ^[2]: Se han diseñado tres métodos de medición rápidos para complementar el método estándar bastante largo. Los métodos disponibles son

1. El método estándar; Un peso conveniente de arena, generalmente 20 g, se calienta a una temperatura entre 105 y 110 ° C hasta que su peso sea constante. La muestra debe enfriarse en un desecador antes de cada pesaje. La pérdida de peso, expresada como un porcentaje del peso de la arena tomada, es el contenido de humedad.

2. Secado a una temperatura más alta; La prueba puede llevarse a cabo sin ningún aparato especial, por ejemplo, al usar un horno calentado a 250 °C o una placa calefactora, pero es más conveniente usar uno de los equipos diseñados para tal fin. En el probador de humedad Ridsdale-Dietert se coloca una muestra de 50 g de la mezcla en un tamiz de apertura fina que se sujeta al cuerpo del instrumento mediante un clip. Cuando se enciende el instrumento, un ventilador sopla aire caliente a través de la muestra que, cuando está seca, se deja enfriar y luego se vuelve a pesar. En el probador Fischer se coloca una muestra de 50 g de mezcla en una bandeja y se sujeta al cuerpo del instrumento donde se calienta mediante un calentador de infrarrojos. Cuando está seco, la arena se enfría y se vuelve a pesar.
3. Un instrumento autónomo independiente de las instalaciones de laboratorio; El probador de humedad "Speedy" no requiere instalaciones de laboratorio y es utilizado por fundiciones que no tienen laboratorio. También se puede usar, incluso cuando hay un laboratorio disponible, para obtener resultados en la fundición más rápidamente de lo que de otro modo sería posible.
4. Instrumentos que dan una medida instantánea del contenido de humedad; Un método para leer el contenido de humedad directamente ha sido descrito por Godding que extrae una muestra de mezcla de un molino cada determinado tiempo, se compacta y el contenido de humedad del compacto se obtiene a partir de la medición de la absorción de potencia del horno de microondas. Toda la acción es automática y permite mantener un registro casi continuo del contenido de humedad. También se ha desarrollado una forma alternativa, adecuada para dar una sola lectura en la arena en un molino.

Método indirecto; En vista de la influencia del agua en las propiedades físicas de la mezcla, es posible obtener el contenido de humedad aproximado de las propiedades físicas, siempre que otros factores, y particularmente la cantidad de arcilla activa y latente, sean constantes. Los cambios rápidos en la dureza de la mezcla generalmente se deben a cambios en el contenido de humedad, pero el

rendimiento durante un período depende de mantener una cantidad constante de arcilla activa y latente, cómo, por ejemplo, si hay una caída continua en la cantidad de arcilla activa. Se han usado otros métodos indirectos para controlar las propiedades de moldeo mediante el control de la dureza. El más sencillo de estos es mediante la fijación de un acómetro en el circuito eléctrico del motor del molino y la disposición de la puerta de descarga para abrir cuando la corriente alcanza un valor predeterminado. La energía necesaria para conducir un molino aumenta a medida que aumenta la dureza de la mezcla y este procedimiento, como el controlador Dietert, produce una mezcla con una dureza constante. El control depende no del contenido de humedad, sino del tiempo de mezclado, y el éxito depende de mantener contenidos constantes de agua y arcilla.

4.2 Propiedades de las arenas de moldeo. [16]

Para determinar la mayoría de las propiedades de las mezclas de arena de moldeo en verde, es necesario construir una muestra cilíndrica patrón que mide 50 mm de diámetro por 50 mm de altura. Ésta se elabora al pesar una cierta cantidad de mezcla recientemente preparada o almacenada convenientemente para que no pierda humedad, cuyo peso depende de las características de esa mezcla y que puede oscilar entre 140 y 160 gramos. La cantidad calculada se deposita en un molde metálico y se lleva al equipo para preparación de la probeta norma o estandarizada, donde se deje descender lentamente el apisonador (Indicador **C** en la **Figura 2.9**). No se debe girar el tubo espécimen ni la copa de pedestal antes de dar los apisonamientos. Posteriormente se da tres golpes seguidos con el apisonador a una velocidad moderada, en intervalos de aproximadamente uno cada segundo. Al final de esto, el tope del vástago del apisonador (Indicador **B₁** en la **Figura 2.9**) debe quedar dentro de las marcas del aparato, ubicadas en su extremo superior, que determinan los límites de tolerancias dimensionales de ella.

Esta es la prueba diseñada por el Comité Americano 1921-1924. El apisonador utilizado es sustancialmente el diseñado por Dietert al mismo tiempo. Cuando se

usa el sistema métrico, las dimensiones son de 5 cm en lugar de 2 pulgadas, pero de lo contrario la misma pieza de prueba es de uso universal.

El apisonador, como se observa en la **Figura 2.9**, consta de un soporte **A** con dos guías, **B₁** y **B₂**. Una varilla de apisonamiento de acero **C** que se desliza en tres guías, lleva un tope **D** que descansa sobre el brazo de soporte para la guía **B₁**. La cabeza de la varilla apisonadora es un extremo de ajuste deslizante del recipiente utilizado para sostener la **mezcla**. Un peso de 14lb (**H**) descansa en el tope (**D**). La leva (**F**), equipada con un mango, está dispuesta de esta manera que al girar el mango el peso se eleva a una altura de 2 pulgadas y se deja caer libremente sobre el tope. El peso total de la varilla, (el cabezal, el tope y el peso del conjunto de apisonamiento) es de 17lb. Se proporciona un segundo mango (**J**) para elevar el conjunto sin que se forme parte del contenedor. Un rebaje en la base ayuda a ubicar con precisión el contenedor debajo del cabezal apisonador.

En la **Figura 2.9**, una escala (**L**), unida al brazo superior del soporte, lleva tres marcas de tal manera que cuando el extremo superior de la guía (**B₁**) coincide con la marca central, la pieza de prueba tiene exactamente 2 pulgadas de largo. Las otras marcas son $\frac{1}{32}$ de pulgada delante y debajo de la marca central. Para las pruebas de rutina, es suficiente que el extremo superior de la varilla del apisonador esté entre las marcas exteriores.

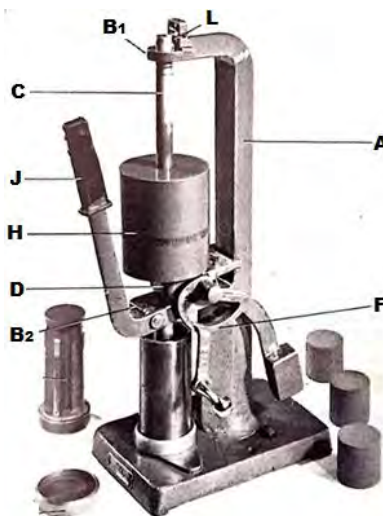


Figura 2.9. Apisonador Ridsdale-Dietert. [2]

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN VERDE.

Es la compresión normal necesaria para producir la ruptura en la probeta norma de la mezcla de moldeo que contiene agua suficiente para que exista la cohesión en los granos de arena y que ha sido compactada por apisonado. Se determina al efectuar la prueba en un equipo para ensayos de resistencia de mezclas de moldeo en verde. Este ensayo debe ejecutarse inmediatamente después de que la probeta norma se haya extraído del tubo donde se le ha apisonado, debido a que la resistencia en verde de una mezcla, aumenta al empezar a secarse al aire. Esta propiedad es importante de tomar en cuenta cuando se quiere prevenir el colapso del molde al extraer el modelo; sin embargo, un aumento en la resistencia en verde produce reducción en la movilidad de las arenas de moldeo.

DENSIDAD DE CONJUNTO, (Bulk Density).

Está definida por la relación entre el peso y la unidad de volumen de arena verde compactada por apisonado. Cuando la mezcla está recién mezclada, su valor es bajo, aproximadamente 0.80 g/cm^3 ; mientras que el máximo valor después de moldeada puede ser tan alta como 1.84 g/cm^3 . La densidad de conjunto varía con la cantidad de agua de hidratación; a medida que aumenta la humedad en la arena de moldeo, la densidad de conjunto aumenta parcialmente y posteriormente decrece hasta un mínimo, para producir un nuevo incremento. El mínimo en la densidad de conjunto se alcanza con una cantidad de agua de hidratación superior a la requerida para máxima resistencia en verde. Estas diferencias son pequeñas para algunas arcillas minerales y apreciablemente grandes para otras.

MOVILIDAD o FRIABILIDAD, (Flowability).

Es la propiedad de una arena de moldeo que le permite fluir para conformar perfectamente la forma que tiene el modelo, con un mínimo de apisonado, prensado (squeezing), o sacudido (jolting). Mide la capacidad de una arena de moldeo de ser compactada a densidad uniforme; por lo tanto, la movilidad reúne dos de las tres características fundamentales de las mezclas de arena de moldeo. Esta propiedad

tiene una marcada influencia sobre las características de pegado de la arena de moldeo a las paredes tanto de las cajas como de los modelos y también afecta a la calidad y al tiempo de mezclado durante la preparación de la misma. La movilidad está relacionada a la capacidad de la arena para formar terrones (lumpiness); estas dos propiedades, dependen de las fuerzas de enlace en los sitios de contacto entre los granos de arena. El aparente aumento inicial en la densidad de la arena de moldeo, es debido a que hay una uniformidad en la compactación y, por lo tanto, la mezcla presenta una buena movilidad, es decir, un mínimo de formación de terrones.

PERMEABILIDAD.

Es la propiedad de la arena de moldeo que permite que los gases producidos al vaciar, pasen a través de ella; y depende de la calidad y cantidad de arcilla, del tamaño y morfología de la arena que se presenta en la mezcla. El Índice de Permeabilidad de una arena de moldeo es una medida de la velocidad, en mililitros/minuto, a la que el aire pasa a través de ella a unas determinadas condiciones de presión. Como la permeabilidad, normalizada por la AFS, American Foundrymen's Society, se determina al medir el tiempo necesario para que 2000 cm³ de aire pasen a través de la muestra patrón mientras está confinada en el tubo a una presión de 10 g/cm², si se mide el tiempo, el número de permeabilidad se define como la velocidad en ml/min. de aire o de gases que pasan a través de un volumen de arena de una sección transversal de 1 cm² y 1 cm de altura bajo una presión de 10 g/cm². A mayor contenido de sílice en la mezcla de moldeo y mayor tamaño de grano, mejor es la permeabilidad y viceversa.

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO.

Se realiza a una muestra seca de arena base a la que se le ha extraído la arcilla mediante el método AFS para determinar su contenido. Los tamices en cuyos números o tamaños queda retenida toda la arena, da la distribución granulométrica de la misma. Esta distribución se puede representar en forma de curva acumulativa o en forma de curva de distribución de Gauss, se ha colocado el tamaño de la

apertura de los tamices en milímetros y que en ella se encuentra información de ensayos mecánicos realizados a dos diferentes tipos de arena base. En fundición, la curva en forma acumulativa de los granos retenidos en cada tamiz presenta la mejor descripción de la distribución de los granos de arena base retenidos en cada uno de esos tamices y es el formato requerido para ejecutar los cálculos del número de tamaño de grano AFS y del área superficial de los granos de arena base.

DEFORMABILIDAD, (Yieldability).

Es la capacidad de una arena de moldeo para contraerse en su volumen y moverse bajo la acción de la contracción líquido-sólido del metal sin que se produzca agrietamiento de ella. Esta propiedad es importante, porque el metal al enfriarse y solidificar, conduce a una disminución del tamaño de la pieza. Como el molde retarda la contracción del metal, se generan esfuerzos que pueden conducir a fracturarlo y crear las denominadas grietas en frío. Aun cuando la capacidad para deformarse un molde sin agrietamiento es importante desde el punto de vista del desmolde del modelo, es perjudicial para contrarrestar la presión metalostática del líquido dentro del molde, lo que conduce a movimiento de las paredes del molde. Un alto movimiento de las paredes del molde, conduce a que la pieza salga hinchada y por lo tanto pierda precisión dimensional junto a incrementos en rechupe; características que se ven afectadas por efectos de las magnitudes en densidad del líquido y amplitud de la zona pastosa, junto a la naturaleza del proceso de solidificación de la aleación.

HOMOGENEIDAD.

La homogeneidad de una mezcla de moldeo en verde es la uniformidad en la distribución de sus constituyentes durante el mezclado; es importante porque a mayor homogeneidad, mayores son la resistencia mecánica y la permeabilidad. Es importante recalcar que no se debe confundir esta característica con el hecho de tener un solo tamaño de grano y que además ese grano sea de morfología esférica; ya que la resistencia mecánica depende fundamentalmente de la superficie de

contacto entre partículas y la permeabilidad depende básicamente del tamaño de los intersticios y no del porcentaje de porosidad.

5. Solidificación.

Como se había mencionado anteriormente la calidad de la pieza, depende de varios parámetros como lo son:

- Geometría de la pieza.
- Propiedades termo físicas del material de moldeo.
- Espesor de la pared del molde.
- Tiempo de llenado del molde.
- Tiempo de solidificación.
- Temperatura de colada.
- Tratamientos al metal líquido.
- Composición química de la aleación, por mencionar algunos.

Ante la variación de concentraciones (segregación) y de la rapidez de enfriamiento del metal líquido y del sólido, la estructura formada a temperatura ambiente será modificada. En la interface sólido-líquido parte de las zonas donde hay mayor extracción de calor, para casos prácticos en la interfase metal líquido-material de moldeo, la forma en que crece depende de la estabilidad del sólido. Por esta extracción de calor que se produce es importante estudiar parámetros o variables que están involucrados en la dirección del calor, uno de ellos es la difusividad térmica que ocurre.

En la solidificación, el intercambio de calor se produce en mayor medida mediante convección y conducción en las zonas en las que el molde está en contacto con el medio ambiente o en las que el metal aún no se ha solidificado, y en menor medida por radiación para las partes no cubiertas por el molde. Estos mecanismos pueden generar distribuciones de temperaturas en las que las discontinuidades que puedan aparecer serán generadas por zonas de separación. De estas distribuciones de

temperaturas se puede obtener información precisa de cómo se produce la solidificación en el interior del molde.

La rapidez de enfriamiento en una pieza esta sujeta por: ^[3]

- La temperatura de colada
- La cantidad de calor producido durante la solidificación, es decir, el calor latente de transformación, el cual dependerá del tipo de molde y espesores de la pieza, por mencionar algunos.

Una forma fácil de predecir como solidificará la pieza es mediante el número de Biot (Bi). Cuando el número de Biot es grande, el calor es transferido rápido desde el metal hasta el molde, pero toma más tiempo en alcanzar la pared del molde desde el seno del fluido, produciendo un alto gradiente de temperaturas en la pieza fundida y un gradiente pequeño en la interfase.

6. Propiedades Termo-físicas.

Para el conocimiento de la solidificación que sufre la pieza y así saber la calidad, propiedades mecánicas y el rendimiento que tendrá la pieza es necesario saber las condiciones con las cuales fue enfriado en el molde. Las condiciones que se mencionan dependen de las propiedades térmicas del medio de moldeo.

Por ello como lo menciona Krajewski en uno de sus artículos ^[14], los procesos de solidificación y alimentación dependen del tamaño de granos del medio del moldeo, que puede controlarse mediante nucleación heterogénea y/o mediante la intensidad de enfriamiento donde esto último depende en gran medida de las propiedades termo-físicas del molde.

Como se ha demostrado, que la cantidad y la velocidad de transferencia de calor que existe desde la fusión de un metal, su vaciado y enfriamiento hasta temperatura ambiente determinan la estructura y las propiedades de la pieza fundida.

La simulación de los procesos de solidificación requiere el conocimiento de varios parámetros de límites, entre otros, los parámetros termo-físicos de la fundición del

sistema-molde-ambiente ^[15]. Para un molde estos son: coeficiente de difusividad térmica, coeficiente de capacidad calorífica, coeficiente de conductividad térmica y densidad de masa. Las propiedades termo físicas de los moldes de las mezclas de moldeo en verde dependen en gran medida de los cambios de temperatura durante el enfriamiento de los moldes vaciados. ^[14]

También es bueno considerar que la cantidad de humedad que contiene el medio de moldeo influye en la conductividad térmica del moldeo, y cabe mencionar que el flujo de calor que tiene el agua incluye la evaporación y la condensación. Esto se puede leer en el artículo de Kubo y Pehlke ^[8], donde muestra distribuciones esquemáticas de temperatura y contenido de humedad en un molde de arena que contiene agua, como se aprecia en la **Figura 2.10**. En un molde de arena que contiene agua en la que se vierta el metal líquido, el agua cerca de la interface metal-molde se evapora y el vapor evolucionado se mueve a una región de baja temperatura, donde el vapor se condensa. El agua condensada se evapora de nuevo más tarde. Este fenómeno ocurre repetidamente, y el calor también se transfiere por este mecanismo además de la conducción normal y la transferencia de calor por convección. La región cercana a la interface metal-molde donde el agua se vaporizó por completo se denomina zona de arena seca. La región donde el contenido de humedad es alto y la temperatura es de aproximadamente 373 K (100°C, temperatura donde existe la evaporación del agua) se llama zona de transporte. La región donde la temperatura se encuentra entre la temperatura ambiente y 373 K y se produce la condensación se denomina zona de condensación. La región donde los cambios de temperatura y contenido de humedad aún no se han producido se llama zona externa.

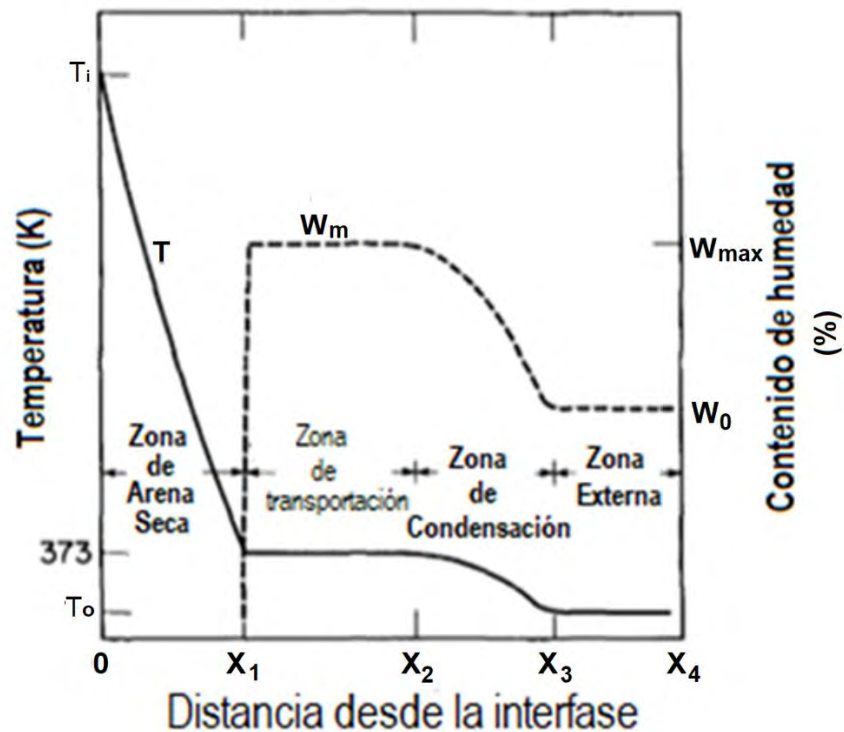


Figura 2.10. Distribución de temperatura y contenido de humedad en un molde de arena que contiene agua. [8]

Por lo cual donde se habla del flujo de calor, menciona que la conducción de calor ocurre en todas las zonas excepto en la zona externa donde no hay gradiente de temperatura. La convección de calor ocurre en la zona de transporte y condensación donde se mueve el gas. La transferencia de humedad por diferencia de presión y flujo de difusión ocurre en las zonas de transporte y condensación. La evaporación ocurre en la zona de transporte y la condensación ocurre en la zona de condensación. [8]

Por lo tanto, debe ser necesario establecer las dependencias de la composición del medio de moldeo (%Humedad, %Bentonita y cantidad de arena sílice) de las propiedades termo-físicas.

Las propiedades termo-físicas de los materiales de moldeo que están en función de la temperatura, y que son necesarias para entender aún más la solidificación y que se les tiene que dar hincapié son:

a) Difusividad térmica (α)

Es una propiedad específica de cada material para caracterizar conducción de calor en condiciones no estacionarias. Este valor describe que tan rápido un material reacciona a un cambio de temperatura.

Para predecir procesos de enfriamiento o para simular campos de temperatura, la Difusividad Térmica debe ser conocida; es un requisito para resolver la Ecuación Diferencial de Fourier para conducción de calor en condiciones no estacionarias.

$$\alpha = \frac{k}{\rho * Cp} \dots\dots\dots \text{Ec. (1)}$$

b) Calor Especifico (C_p)

Es la cantidad de calor que se necesita por unidad de masa para elevar la temperatura un grado Celcio, por cual en la literatura se pueden encontrar si es necesario conocer su valor.

c) Densidad (ρ)

Es la cantidad de masa en un determinado volumen de nuestro medio moldeo, el cual se obtiene con el apisonador No. 315-CI de DIETEER CO.

Conociendo esto, solo es necesario determinar la conductividad térmica o la difusividad térmica, las cuales están relacionadas entre sí.

La difusividad térmica y la conductividad térmica de las arenas de moldeo están en función de:

- a) Tipo de arena.
- b) Tamaño de grano de la arena.
- c) Cantidad y tipo de aglutinante.
- d) Contenido de agua.
- e) Temperatura.

Y además de esto, existe una gran variedad de métodos para determinar estas propiedades, principalmente se basan en dos métodos que son descritos por: M. C. Adams y H. F. Taylor y el de R. D. Pehlke y M. Kirt.

Método de Adams y Taylor

El método de Adams y Taylor es considerando un estado no-estacionario para fusión-solidificación, considerando también el molde como semi-infinito, para calcular la difusividad térmica y la conductividad.

El método consiste en medir el aumento de temperatura con respecto al tiempo, justo después de la colada del metal sin sobrecalentamiento. La difusividad térmica se calculó con la ecuación:

$$\sqrt{\alpha} = \frac{x}{2\sqrt{t} \operatorname{erf}^{-1}\left(\frac{T_i - T_s}{T - T_s}\right)} \quad \dots\dots\dots \text{Ec. (2)}$$

Donde:

α = *Difusividad termica*

x = *Distancia*

t = *tiempo*

T_s = *Temperatura en la interfase metal/molde*

T_i = *Temperatura en la arena de moldeo a una distancia X desde la interfase metal/molde a un tiempo t despues de la colada*

T = *Temperatura inicial del molde*

A partir de la difusividad térmica se obtiene la conductividad térmica con la ecuación:

$$k = \alpha * \rho * Cp \quad \dots\dots\dots \text{Ec. (3)}$$

Donde:

k = *Conductividad termica*

ρ = *Densidad*

Cp = *Calor Especifico*

Método de R. D. Pehlke y M. Kirt

El otro método por R. D. Pehlke y M. Kirt, se fundamenta en la conducción de calor en estado no estacionario para un cilindro infinito. Esto es, que para determinar la difusividad térmica se hace en función de la temperatura con respecto al tiempo y la posición.

Para determinar la difusividad térmica lo hicieron de la siguiente manera:

$$\alpha (t_i) = \frac{\frac{\partial T}{\partial t}}{\frac{1}{\partial r} \left[\left(\frac{\partial}{\partial r} \right) * \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right]} \dots\dots\dots \text{Ec. (4)}$$

Donde:

$\frac{\partial T}{\partial t}$ = Variación de la temperatura con respecto al tiempo.

$\frac{\partial T}{\partial r}$ = Variación de la temperatura con respecto a la posición.

t_i = Tiempo

r = Posición

Estos datos se miden experimentalmente en forma simultánea durante el calentamiento de una probeta de la mezcla de arena de moldeo y se introducen a un programa para calcular $\alpha (t_i)$.

Basándose con prácticas experimentales con estos métodos, se determinaron varias limitaciones, expresadas en sus respectivos trabajos. [4] [5] En el presente trabajo con un diferente método se consideró algunas variables para corregir las limitaciones.

- a) Suministro de calor: En un horno de resistencia se tiene problemas de una distribución no homogénea de temperatura y de una velocidad de calentamiento impuesta por el fabricante.

Se consideró un suministro de calor debido a la solidificación de un metal para una mejor distribución de temperatura, siempre y cuando se mantenga en un recipiente cerrado, sin pérdidas por la atmósfera, solo con la arena.

- b) Tiempo: El método computacional da un rango amplio de datos, no todos son necesarios y el tiempo invertido suele ser largo.
Se considera una sola temperatura que será suficiente.
- c) Probetas estandarizadas: Cuando una probeta y un molde grande son apisonados a mano, no garantiza un comportamiento uniforme.
- d) La preparación total de experimentos debe ser sencilla, la colocación de varios termopares o de grandes contenidos de arena dificulta la manipulación.

Tomando en consideración todo lo mencionado el método utilizado fue diseño con las siguientes características:

1. La probeta de la mezcla bajo estudio, se preparó en forma estándar por el apisonador No. 315-CI de DIETEER CO.
2. Para asegurar la longitud finita se aisló en la parte superior e inferior.
3. La fuente de calor fue un metal fundido y se uso dentro de un recipiente cerrado, el cual fue del mismo medio de moldeo.
4. Se uso un metal puro para prevenir sub-enfriamiento y diferentes temperaturas de solidificación.
5. La solución teórica al problema de transferencia de calor se consultó en la literatura. Las bases de esta solución teórica se describen a continuación:

- a) Flujo térmico en estado no estacionario de cuerpos solidos con forma geométricas sencillas. ^[4]

Los principios básicos del flujo térmico en estado no estacionario para objetos solidos homogéneos de formas geométricas sencillas se basan en la consideración que la trayectoria del flujo térmico se puede dividir de dos maneras:

- i. Conducción dentro del sólido.
- ii. Transferencia térmica entre la superficie del sólido y los alrededores por convección y radiación.

Uno de estos aportará la mayor parte de la resistencia térmica y de esta manera controlará el proceso, pero bajo muchas condiciones es necesario considerar los efectos mancomunados de ambas partes de la trayectoria del flujo calorífico.

b) Ecuación de Fourier sobre conducción de calor en estado no estacionario. [4]

En sistemas no estacionarios la temperatura es función de dos variables, posición y tiempo. Con objetos simétricos, la posición puede ser medida por una sola variable X que se representa, por ejemplo: una distancia desde el centro de una esfera o desde el eje de un cilindro. Para esto la ley de Fourier se expresa con la Ec. (5) y (6) diferencial parcial:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho * Cp} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \dots\dots\dots \text{Ec. (5)}$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \dots\dots\dots \text{Ec. (6)}$$

Donde:

- $\frac{\partial T}{\partial t}$ = Variación de la temperatura con respecto al tiempo.
- x, y, z = Direcciones axiales.
- t = Tiempo
- α = Difusividad Térmica

Los cálculos sobre el comportamiento térmico de un objeto en calentamiento o enfriamiento, cuando el proceso es dominado por la resistencia al flujo calorífico dentro del objeto, requieren una solución de la ecuación anterior, para las condiciones de límite (t_1, t_2), y la geometría involucrada.

Tanto de la superficie como del interior, debe resolverse la ecuación anterior usando la Ec. (7), como una de las condiciones límite

$$q = h * A * (T_1 - T_2) \dots\dots\dots \text{Ec. (7)}$$

Se han publicado soluciones numéricas en forma de tablas y gráficas que se usan fácilmente en la solución de problemas, ya que la solución a la ecuación suele ser

compleja. Estas soluciones se presentan como relaciones entre variables adimensionales.

c) Variables adimensionales de flujo térmico en estado no estacionario. [4]

Las principales variables físicas del flujo térmico no estacionario incluyen: temperatura, tiempo, posición, área, volumen del objeto, calor específico, densidad, coeficiente de transferencia calorífica y conductividad térmica.

Solo se necesita de cuatro variables adimensionales para describir el flujo calorífico no estacionario. Estos grupos son:

- I. Temperatura Relativa: C_θ
- II. Posición Relativa: n
- III. Tiempo Relativo: Θ
- IV. Resistencia de Superficie Relativa: m

Una esfera, un cilindro infinito y la placa infinita son formas geométricas más comunes de sólidos que son importantes en problemas de calentamiento y enfriamiento. En cada caso el tamaño es dado por la distancia r_0 desde el centro a la superficie. Para una placa r_0 es la mitad del espesor y para un cilindro o esfera r_0 es el radio. Similarmente debido a la simetría de estas formas, la posición es dada por la distancia r desde el centro, ya que todos los puntos a una distancia dada desde el centro tendrán el mismo comportamiento durante el calentamiento o el enfriamiento.

La variable adimensional de la posición relativa n , es dada por la relación $r/r_0 = n$.

La variable adimensional tiempo relativo Θ , se define en términos de la difusividad térmica, el tiempo real t , el radio o mitad del espesor r_0 y es igual a $\Theta = \alpha t / r_0^2$. Así para un valor dado de tiempo relativo: el tiempo real es proporcional al cuadrado del tamaño del objeto e inversamente proporcional a la difusividad térmica.

La temperatura relativa: $C_{\theta} = \frac{(T - T_2)}{(T_1 - T_2)}$, donde T es la temperatura media real en un tiempo dado del objeto, T_1 es la temperatura inicial del objeto a $t=0$ y T_2 es la temperatura del medio o temperatura final cuando $t=\infty$.

En cualquier proceso de calentamiento o enfriamiento completo C_{θ} disminuye desde 1 en un tiempo cero hasta acercarse a 0, según se acerca la temperatura a realizar para el equilibrio al cambio de la temperatura total en el proceso completo, desde el comienzo hasta el equilibrio.

La resistencia de superficie relativa, m, está dada por la expresión $m = \frac{k}{h * r_0}$. Este número permite una comparación directa de la resistencia al flujo calorífico donde la superficie al medio ambiente (l/h), con la resistencia al flujo térmico dentro del objeto (r_0/h), para las condiciones bajo las cuales, la resistencia al flujo dentro del objeto es pequeña comparada con la resistencia al flujo calorífico.

7. Fundamento del método de cilindro finito en estado estacionario. [4]

Muchos métodos diferentes de mediciones de las propiedades termo-físicas están disponibles en la literatura y su descripción está más allá del alcance de este trabajo, por ello se tomará solo uno, el elaborado por Rosendo García Rivas [4] y que se hará mención a continuación.

El método se basa en considerar el cilindro como un cilindro finito en estado no estacionario. El desarrollo de una ecuación que permita desarrollar un experimento e interpretar los resultados, se hace considerando un cilindro, el cual se representa en la **Figura 2.11**.

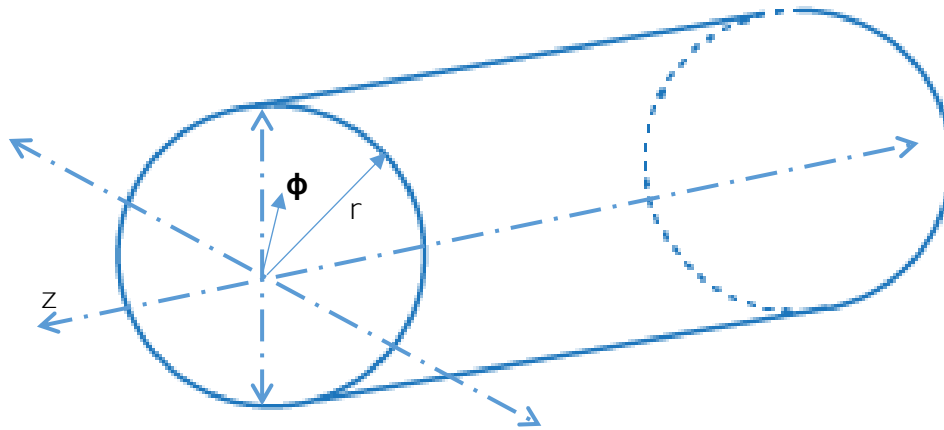


Figura 2.11. Representación esquemática del cilindro de estudio, en sus 3 dimensiones.

Asumiendo una simetría en ϕ . El problema se reduce a una conducción radial en estado no estacionario. La ecuación de calor que se obtiene a partir de la ecuación general en coordenadas cilíndricas son generación de calor (desarrollo de la ecuación en el **Anexo I**). [4]

$$\frac{dT}{dt} = \frac{d^2T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} \quad \dots\dots\dots \text{Ec. (8)}$$

Considerando por el momento que existe una distribución inicial de temperatura en el cilindro y que es función solamente de r . Las condiciones iniciales se pueden escribir de la siguiente manera:

$$T = f(r) \quad 0 \leq r \leq r_0 \quad t \leq 0 \quad \dots\dots\dots \text{Ec. (9)}$$

Si el cilindro transfiere calor por convección a una temperatura de T_f , las condiciones límites en la superficie $r=r_0$ se pueden expresar:

$$\left(\frac{dT}{dr}\right)_{r=r_0} = -\frac{h}{k} T(r_0, t) \quad r = r_0 ; r > 0 \quad \dots\dots \text{Ec. (10)}$$

La solución analítica del problema expresado en las ecuaciones anteriores es:

$$T(r, t) = \sum_{n=0}^{\infty} \lambda_n e^{-\alpha \lambda_n^2 t} J_0(\lambda_n r) \quad \dots\dots\dots \text{Ec. (11)}$$

El problema para determinar la difusividad térmica se simplifica con el uso de las variables adimensionales, la temperatura relativa y el tiempo relativo, ya que sólo es necesario medir con precisión el intervalo de tiempo y el cambio de temperatura.

Se consideran los valores de la temperatura relativa de la siguiente manera:

$$C_{\theta} = \frac{T-T_2}{T_1-T_2} \dots\dots\dots \text{Ec. (12)}$$

Donde:

- T= Temperatura media real en un tiempo dado del cilindro de la mezcla de moldeo en verde.
- T₁ = Temperatura inicial del “objeto” bajo estudio a t=0.
- T₂ = Temperatura de solidificación.

Y para el tiempo relativo:

$$\theta = \frac{\alpha t}{r_0^2} \dots\dots\dots \text{Ec. (13)}$$

Donde:

- t= Tiempo real, es el tiempo final menos el tiempo inicial durante el calentamiento del cilindro de la mezcla de moldeo en verde.
- r₀² = Radio del cilindro de la mezcla de moldeo en verde.
- α = Difusividad térmica.

Los valores obtenidos que se obtienen para C_θ se determina directamente, pero los valores de θ se encuentran tabulados en las cartas de F. C. W. Olson y O. T. Schultz.

[1]

Con los valores de C_θ y θ se determina fácilmente la difusividad térmica.

Capítulo III. Metodología experimental

1. Equipo, material y reactivos.

A continuación, se enlistan los materiales, equipos e materiales utilizados en el presente trabajo.

- Arena Sílice No. AFS 90-100 de WEDRON SILICA COMPANY.
- Aluminio Puro Comercial.
- Bentonita sódica y cálcica.
- Agua.
- Molino Chileno.
- Apisonador No. 315-CI de Dietert CO.
- Máquina de tracción Universal. No 400-1.
- Balanza Analítica.
- Báscula.
- Durómetro.
- Criba con malla No. 10.
- Caja de Moldeo.
- Vaso de precipitado
- Guantes.
- Lentes de seguridad.
- Adquisidor de datos Personal Daq 56.
- Termopares Tipo K.
- Lap Top.
- Tabla 2m x 1m.
- Caja de moldeo.
- Horno de resistencias eléctricas.
- Mufla.
- Soporte Universal.
- Espátula.

Caja de moldeo: las cajas de moldeo constan de dos partes, un cope y drag, el drag es una caja de madera con las dimensiones representadas en la **Figura 3.1**.

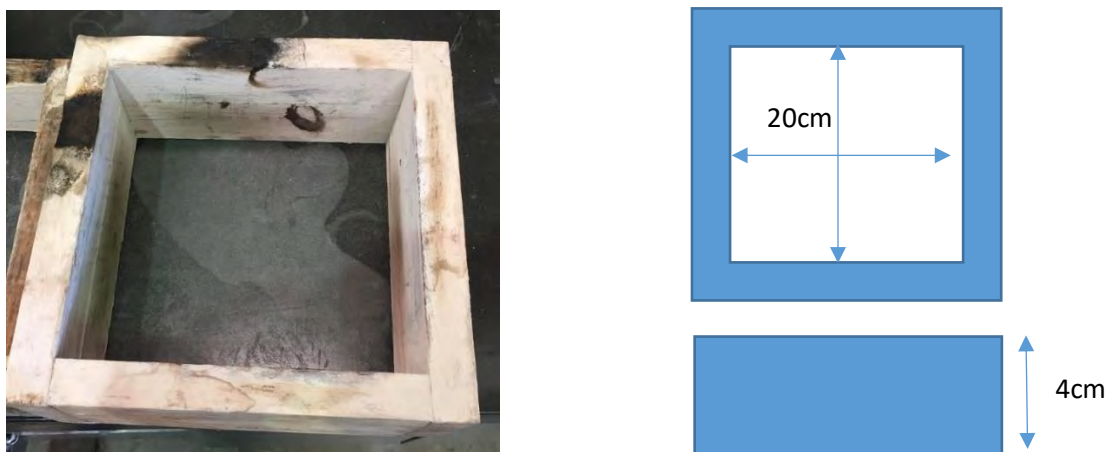


Figura 3.1. Indica las dimensiones de la caja de molde correspondiente al drag.

El drag solo contendrá el medio de moldeo, como base de la pieza.

El cope será el más importante, ya que en este estará la impresión de la pieza a fabricar, como se observa en la **Figura 3.2**.

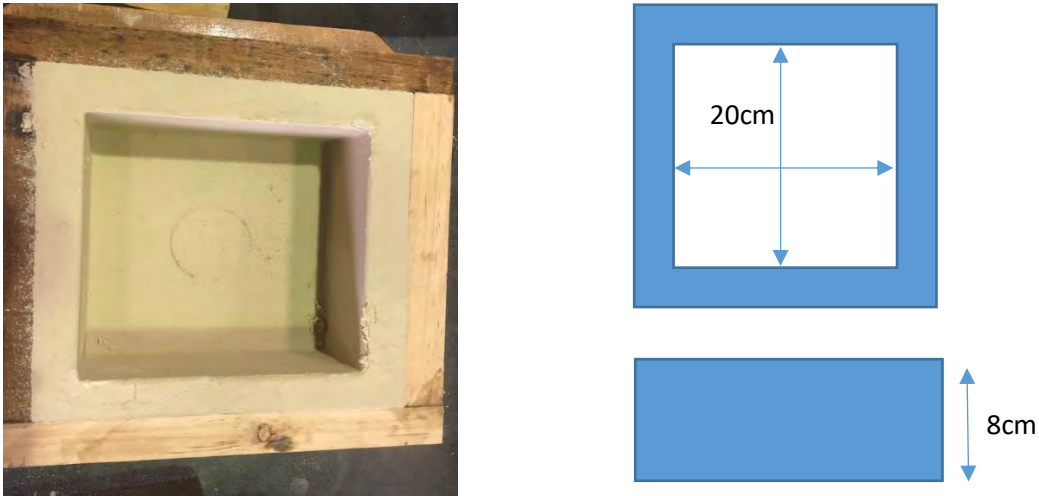


Figura 3.2. Indica las dimensiones de la caja de molde correspondiente al cope, mostrando en la imagen de la izquierda ya con la forma de la placa modelo.

La placa modelo como se observa en la **Figura 3.3**, se colocó en el cope para darle forma cuadrada al sistema en donde se vació el aluminio, además de marcar el lugar donde va a colocarse la probeta.

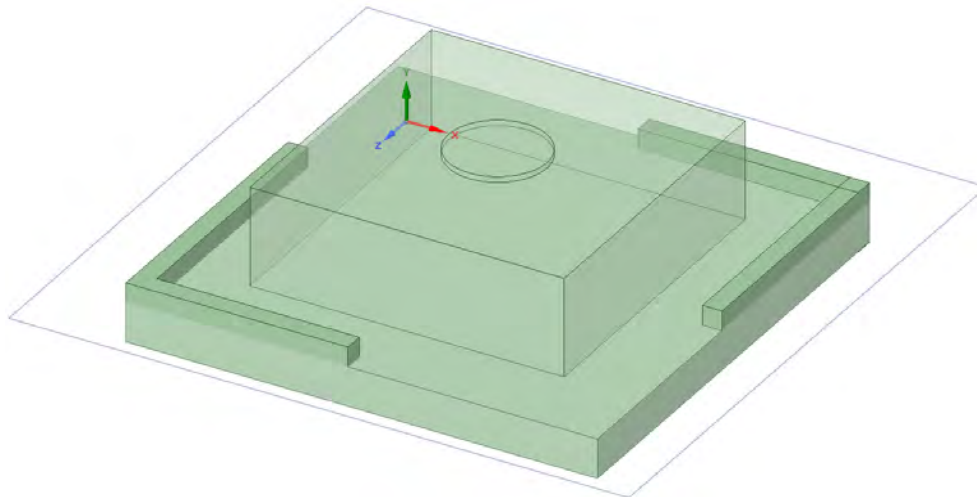


Figura 3.3. Placa modelo del experimento.

2. Arreglo experimental

El arreglo experimental, con el adquisidor de datos y computadora se muestra en la **Figura 3.4**.

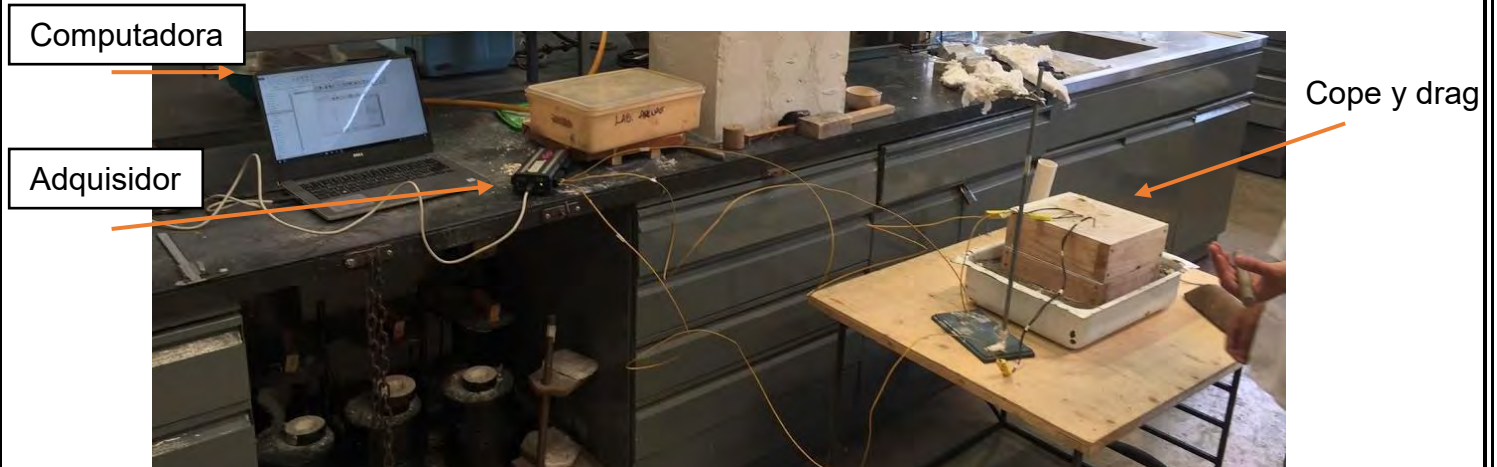


Figura 3.4. El lado derecho se observa el contenedor de la pieza de trabajo, dentro del cope y drag, el lado izquierdo se observa el adquisidor con la computadora para el adquisidor de los datos.

Las dimensiones del cilindro, el cual fue el objeto de estudio que se elaboró de los diferentes medios de moldeo, se representa en la **Figura 3.5**.

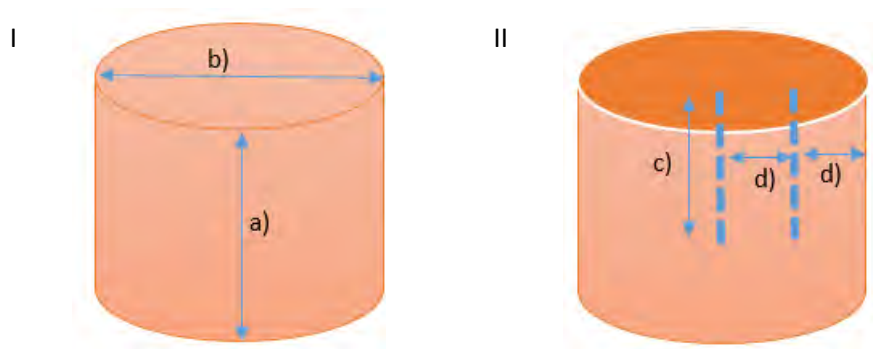


Figura 3.5. I.- Dimensiones de la probeta norma. a) $5.08 \pm 0.0025\text{cm}$, b) $5.08 \pm 0.00793\text{cm}$, II.- Colocación de termopares dentro de la probeta norma. c) $2.50 \pm 0.04\text{cm}$, d) $1.25 \pm 0.04\text{cm}$

Las probetas cilíndricas fueron obtenidas con el Apisonador Dietert, el cual se emplea para la elaboración de las probetas norma AFS.

En la instrumentación de la probeta, como se puede observar con mayor detalle en la **Figura 3.6**, en donde cuenta con dos termopares, estos se encuentran a una profundidad de 2.5cm (en el centro de la probeta, respecto a la altura). La colocación de los termopares respecto al diámetro del cilindro, se encuentran separados 1.25cm, con lo que uno se posicionó en el centro de la probeta (2.5cm) y el otro a la mitad del centro y la periferia de la probeta (1.25cm respecto a la periferia).

Cabe mencionar que además de la colocación de los anteriores termopares, se colocó otro termopar en el Al, el cual tiene como objetivo la adquisición de la historia térmica del metal y está colocado en el lado opuesto a la copa de vaciado, por lo cual se le realizó el orificio en el molde para la colocación de este termopar.

En la **Figura 3.6** se muestra la instrumentación del molde.

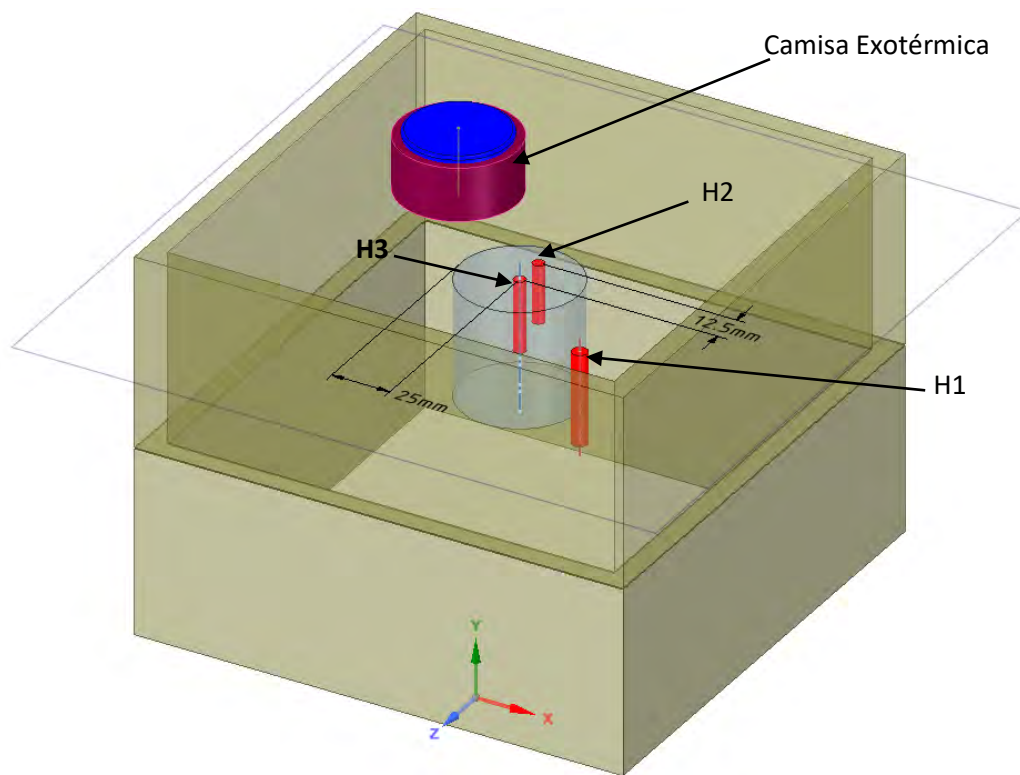


Figura 3.6. Visualización del equipo montado, con cilindros rojos señalan colocación de termopares, con cilindro azul la copa de vaciado y con azul claro el cilindro del medio del moldeo, ubicado en el centro de la cavidad de la pieza moldeada.

3. Preparación y técnica de moldeo de la mezcla en verde.

Para el diseño de experimentos se elaboraron diferentes mezclas, en las cuales se va cambiando el porcentaje de Bentonita activa, así como la relación de Bentonita Cálcica y la Bentonita Sódica, además se fue variando el porcentaje de agua como se observa en la **Tabla 3.1**.

Tabla 3.1. Condiciones de experimentación variando la relación de Bentonita Cálcica (BCa) y Bentonita Sódica (BNa) del total de bentonita activa en la mezcla y a diferentes porcentajes de agua.

CONDICIONES	Porcentaje de Bentonita activa (%)	Relación de BCa y BNa (%) BCa-BNa	%Humedad
1	4	100 BCa	5
2	4	90-10	5
3	4	80-20	5
4	4	70-30	5
5	4	100 BCa	4
6	4	90-10	4
7	4	80-20	4
8	4	70-30	4
9	4	100 BCa	3
10	4	90-10	3
11	4	80-20	3
12	4	70-30	3
13	5	100 BCa	5
14	5	90-10	5
15	5	80-20	5
16	5	70-30	5
17	5	100 BCa	4
18	5	90-10	4
19	5	80-20	4
20	5	70-30	4
21	5	100 BCa	3
22	5	90-10	3
23	5	80-20	3
24	5	70-30	3

En la preparación de la mezcla de careo para moldeo en verde, y tomando como referencia una base de cálculo de 10 kg de mezcla total, se utilizaron los siguientes

insumos, la cantidad de los insumos depende de la condición de la mezcla de moldeo en verde que se manejó, como se observa en la **Tabla 3.2**:

Tabla 3.2. Insumos utilizados para la mezcla de moldeo en verde en la condición 1.

Insumo	Arena sílice con No. AFS 90-100	Bentonita activa (4%)		Humedad (5%)
		Cálcica (100%)	Sódica (0%)	
Cantidad	9.1Kg	400 g.	0 g.	500 mL.

La preparación de la mezcla consistió en agregar primeramente la arena sílice y el agua en el molino y se mezclaron ambos insumos durante 3 minutos.

Posteriormente se agregó la bentonita dando un tiempo de mezclado de 4 minutos, por lo que, el tiempo total de mezclado fue de 7 minutos.

Para la elaboración del molde, se empezó con el cope, el cual al ponerse en la placa modelo, como se observa en la **Figura 3.2** y **Figura 3.3**, se formó un espacio en el cual se empezó la adición de la mezcla. Se colocó una camisa exotérmica para la copa de alimentación (bajada), la cual permitirá que el rechupe del aluminio sea localizado y no se vea afectado el aluminio que rodeo el cilindro. La adición de la mezcla se vertió de manera homogénea sobre la placa modelo, y con la colocación de la mezcla se hizo la compactación manual con ayuda de apisonadores de madera disponibles. Se procuró hacer solo dos compactaciones en todo el proceso de elaboración.

Al terminar de moldear el cope, se procedió con el drag, que para este caso representa la base en donde se colocó el cilindro.

Posteriormente, al término de la elaboración del cope y drag, se hicieron los orificios para la colocación de los termopares y la colocación de la probeta, para que al final, al juntar las dos piezas, como se observa en la **Figura 3.6**, se obtuviera el sistema completamente listo para el vaciado del aluminio.

4. Fusión y colada.

Como se observa en la **Figura 3.4**, el sistema ya estando totalmente montado, por lo cual ya se llevo a cabo el vaciado del aluminio.

Fusión del aluminio puro comercial.

- 1) Se encendió y programó el horno de resistencia eléctrica a una temperatura de 800°C, en cuyo interior se colocó un crisol de SiC totalmente pintado con pintura refractaria (pintura de zircón).
- 2) Al mismo tiempo se encendió una mufla y se programó a una temperatura de 600°C.
- 3) Una vez que la mufla llegó a la temperatura de 600°C, se colocaron los lingotes de aluminio (5 kg) en el interior para proceder con el precalentamiento de los mismos.
- 4) Cuando el horno de resistencias alcanzó los 800°C, se procedió a cargar los lingotes precalentados dentro del crisol.
- 5) Durante el tiempo de la fusión del aluminio, se llevó a cabo la configuración del adquisidor de datos para la adquisición de un dato de temperatura cada 0.5 segundos y a continuación se colocaron los termopares de acuerdo al arreglo mostrado en la **Figura 3.6**.
- 6) Una vez fundido todos los lingotes, se comenzó con la adquisición de datos y se procedió a colar el metal líquido a una temperatura de $760 \pm 10^\circ\text{C}$.
- 7) La adquisición de datos se paró cuando los tres termopares registraron casi la misma temperatura ($\pm 5^\circ$) durante el enfriamiento.
 - Lo pasos anteriores se realizaron para todos los experimentos.

Cabe hacer mención que para cada mezcla de moldeo en verde se les realizo la medición de propiedades mecánicas y físicas: resistencia a la compresión en verde, resistencia al corte, resistencia a la tracción, dureza, % de compactibilidad, permeabilidad, densidad y resistencia al impacto. Para medirlas se usó la probeta normalizada, la máquina universal Dieter para arenas de moldeo y los diversos aditamentos y aparatos calibrados según la American Foundry Society (AFS).

5. Modelo Matemático

A continuación, en la **Figura 3.7** se mostrará un ejemplo de una curva obtenida experimentalmente marcando los valores de Temperatura que se tomaron en cuenta para la obtención de difusividad térmica donde T es la temperatura media real en un tiempo dado del cilindro de arena, T_1 es la temperatura inicial del “objeto” bajo estudio a $t=0$ y T_2 es la temperatura de solidificación, y cabe indicar que las demás historias térmicas se encuentran en **Capítulo VI. Anexo 2**.

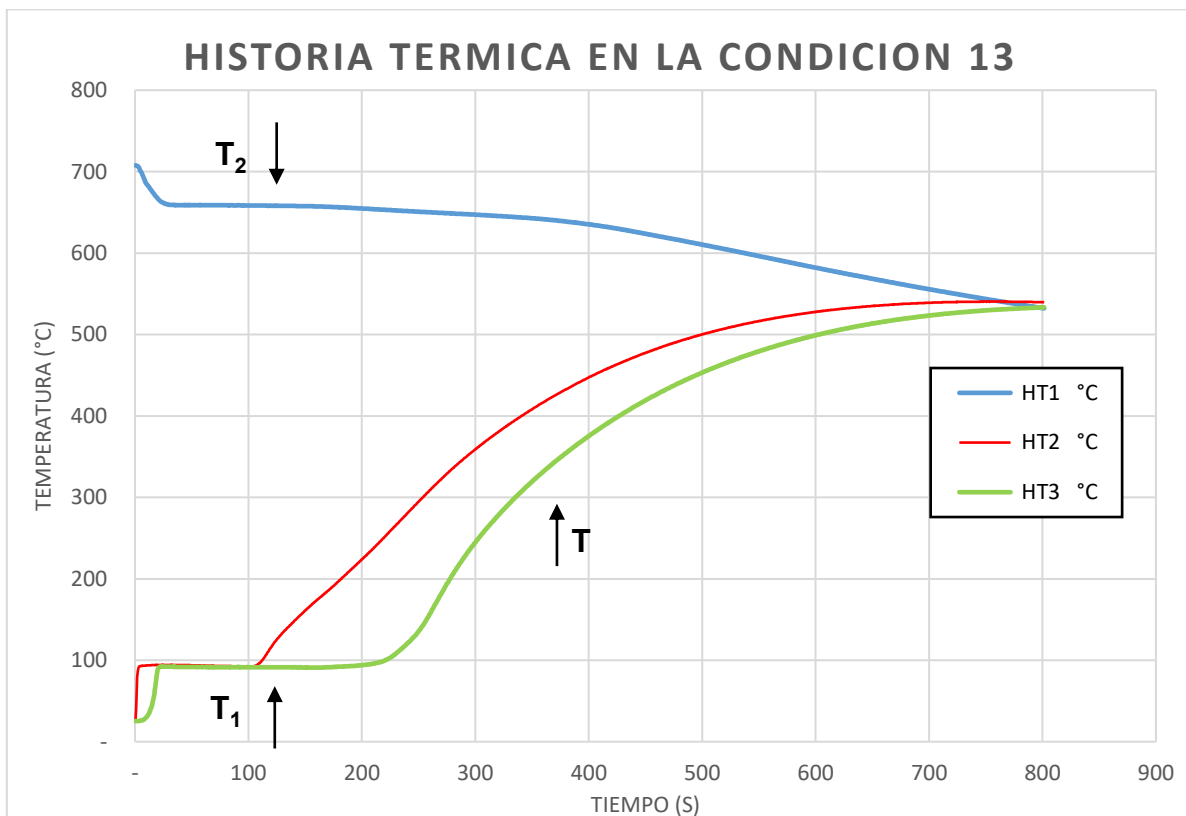


Figura 3.7. Historia térmica en moldeo en verde con 5% de bentonita activa, 100% bentonita cálcica y 5% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde.

Con los datos obtenidos experimentalmente se dio uso a la Ec. (13) del marco teórico el cual proporcionará el valor de la difusividad térmica en cm^2/s como se muestra a continuación.

Tomando los valores de la temperatura de la siguiente manera:

$$C_{\theta} = \frac{T-T_2}{T_1-T_2} \dots\dots\dots \text{Ec. (12)}$$

Donde:

- T= Temperatura media real en un tiempo dado del cilindro de arena.
- T₁ = Temperatura inicial del “objeto” bajo estudio a t=0.
- T₂ = Temperatura de solidificación.

Y para el tiempo relativo:

$$\theta = \frac{\alpha t}{r_0^2} \dots\dots\dots \text{Ec. (13)}$$

Donde:

- t= Tiempo real, es el tiempo final menos el tiempo inicial durante el calentamiento del cilindro de arena en verde.
- r₀² = Radio del cilindro de arena en verde.
- α = Difusividad térmica.

Los valores obtenidos que se obtienen para C_θ se determina directamente, pero los valores de θ se encuentran tabulados en las cartas de F. C. W. Olson y O. T. Schultz.

Al localizar el valor de θ, se despeja la difusividad térmica:

$$\alpha = \frac{\theta r_0^2}{t} \dots\dots\dots \text{Ec. (14)}$$

Y así es como se obtienen los valores de la difusividad térmica, que se plasmaron en el área de resultados.

Capítulo IV. Resultados y análisis de resultados.

A continuación, como se observa en la **Tabla 4.1 y 4.2**, se presentan los valores tomados para el cálculo la difusividad térmica, contando los valores leídos en las cartas de F. C. W. Olson y O. T. Schultz acomodados de acuerdo a las condiciones expresadas en la **Tabla 3.1**.

Tabla 4.1. Valores de difusividad térmica que se obtienen para la arena de moldeo con las temperaturas y tiempos leídos conforme a las condiciones en la **Tabla 3.1**, donde se indica el porcentaje de bentonita activa y la relación de bentonita cálcica y bentonita sódica, con sus respectivas humedades.

a) 4% Bentonita activa, relación 100% Bentonita Cálcica

Humedad (%)	Tiempo (s)	Temperatura (°C)	C_e	Θ	α (cm ² /s)	$\alpha \cdot 10^{-3}$ (cm ² /s)	Promedio $\alpha \cdot 10^{-3}$ (cm ² /s)
3	300.0	308.933	0.614	0.164	0.004	3.526	3.505
	400.0	400.563	0.449	0.219	0.004	3.531	
	500.0	461.275	0.340	0.268	0.003	3.457	
4	300.0	278.973	0.668	0.148	0.003	3.182	3.207
	400.0	375.371	0.498	0.201	0.003	3.241	
	500.0	440.979	0.382	0.248	0.003	3.199	
5	300.0	251.978	0.713	0.136	0.003	2.924	2.914
	400.0	343.329	0.549	0.184	0.003	2.967	
	500.0	402.348	0.444	0.221	0.003	2.851	

b) 4% Bentonita activa, relación 90-10 de Bentonita cálcica y bentonita sódica.

Humedad (%)	Tiempo (s)	Temperatura (°C)	C_e	Θ	α (cm ² /s)	$\alpha \cdot 10^{-3}$ (cm ² /s)	Promedio $\alpha \cdot 10^{-3}$ (cm ² /s)
3	200.0	184.950	0.832	0.105	0.003	3.386	3.370
	300.0	298.464	0.632	0.159	0.003	3.419	
	400.0	380.255	0.488	0.205	0.003	3.306	
4	300.0	276.490	0.674	0.147	0.003	3.161	3.169
	400.0	370.775	0.508	0.200	0.003	3.225	
	500.0	435.297	0.394	0.242	0.003	3.122	
5	300.0	295.777	0.641	0.156	0.003	3.354	3.362
	400.0	393.267	0.470	0.211	0.003	3.402	
	500.0	456.452	0.359	0.258	0.003	3.328	

Tabla 4.1. CONTINUACIÓN.

c) 4% Bentonita activa, relación 80-20 de Bentonita cálcica y bentonita sódica.

Humedad (%)	Tiempo (s)	Temperatura (°C)	C_e	Θ	α (cm ² /s)	$\alpha \cdot 10^{-3}$ (cm ² /s)	Promedio $\alpha \cdot 10^{-3}$ (cm ² /s)
3	200.0	241.202	0.812	0.110	0.004	3.548	3.626
	300.0	357.709	0.584	0.173	0.004	3.720	
	400.0	433.274	0.437	0.224	0.004	3.612	
4	300.0	270.829	0.685	0.144	0.003	3.096	3.057
	400.0	361.951	0.524	0.192	0.003	3.096	
	500.0	421.425	0.419	0.231	0.003	2.980	
5	400.0	338.43	0.5475	0.184	0.003	2.967	2.912
	500.0	408.21	0.4275	0.228	0.003	2.941	
	600.0	453.54	0.3495	0.263	0.003	2.827	

d) 4% Bentonita activa, relación 70-30 de Bentonita cálcica y bentonita sódica.

Humedad (%)	Tiempo (s)	Temperatura (°C)	C_e	Θ	α (cm ² /s)	$\alpha \cdot 10^{-3}$ (cm ² /s)	Promedio $\alpha \cdot 10^{-3}$ (cm ² /s)
3	300.0	256.86	0.7078	0.137	0.003	2.95	2.962
	400.0	349.92	0.5435	0.186	0.003	3.00	
	500.0	416.12	0.4265	0.228	0.003	2.94	
4	300.0	285.509	0.657	0.151	0.003	3.247	3.249
	400.0	379.340	0.491	0.204	0.003	3.290	
	500.0	442.151	0.380	0.249	0.003	3.212	
5	400.0	336.063	0.569	0.178	0.003	2.870	2.809
	500.0	404.991	0.447	0.220	0.003	2.838	
	600.0	449.116	0.369	0.253	0.003	2.720	

En la **Tabla 4.1** y **Tabla 4.2** la temperatura de fusión fue $658 \pm 2^\circ\text{C}$, y el tiempo en que se consideró calcular la difusividad térmica en la mayoría de los experimentos fue de 300, 400 y 500 segundos, con sus excepciones, y se tomó un promedio de estos tiempos para considerar la baja y alta difusividad térmica que se tiene en ese medio con el paso del tiempo.

En estos datos por si solos no implicaría el uso de este medio de moldeo, puesto que será necesario corroborarlos con las propiedades mecánicas para poder escoger un medio necesario para su uso.

En estos caso, la condición de la mezcla en la que se obtuvo una menor magnitud de difusividad térmica fue en la relación 70-30% de Bentonita cálcica y Bentonita

sódica respectivamente, en un porcentaje total de bentonita activa en la mezcla de 4% y siendo más específica fue en la de 5% de humedad, esto quiere decir que el calor se propaga con menor rapidez y los cambios de temperatura se producen con dinámica baja, por lo cual el enfriamiento en estas piezas va a hacer más lento. Por lo tanto, en la condición de 100% de bentonita cálcica y la relación de 80-20% de Bentonita cálcica y Bentonita sódica y con la humedad 3% tienen el valor de difusividad térmica más alta de todas estas mezclas, como se observa en la **Tabla 4.1**, lo que indica que el calor se propaga con rapidez y los cambios de temperatura se producen con dinámica elevada. Lo anterior es válido, ya que al existir un mayor porcentaje de humedad habrá una mayor generación de vapor de agua y por ende una mayor condensación, teniendo como consecuencia una mayor saturación térmica y, por lo tanto, la propagación de calor sea menor.

A continuación, se presentan los valores de difusividad térmica con el porcentaje de bentonita activa de 5% en toda la mezcla con sus respectivas humedades y relación de bentonita cálcica y bentonita sódica.

Tabla 4.2. Valores de difusividad térmica que se obtuvieron para la arena de moldeo con las temperaturas y tiempos leídos conforme a las condiciones en la **Tabla 3.1**, donde se indica el porcentaje de bentonita activa y la relación de bentonita cálcica y bentonita sódica, con sus respectivas humedades.

a) 5% Bentonita activa, relación 100% Bentonita Cálcica

Humedad (%)	Tiempo (s)	Temperatura (°C)	C_e	Θ	α (cm ² /s)	$\alpha \cdot 10^{-3}$ (cm ² /s)	Promedio
3	300.0	256.060	0.710	0.139	0.003	2.989	2.999
	400.0	353.350	0.539	0.187	0.003	3.015	
	500.0	422.340	0.418	0.232	0.003	2.993	
4	300.0	361.898	0.6902	0.142	0.003	3.05	3.060
	400.0	425.909	0.5240	0.192	0.003	3.10	
	500.0	468.618	0.4112	0.235	0.003	3.03	
5	300.0	298.815	0.634	0.158	0.003	3.397	3.494
	400.0	406.622	0.445	0.221	0.004	3.564	
	500.0	472.065	0.329	0.273	0.004	3.522	

Tabla 4.2. CONTINUACIÓN.

b) 5% Bentonita activa, relación 90-10 de Bentonita cálcica y bentonita sódica.

Humedad (%)	Tiempo (s)	Temperatura (°C)	C_e	Θ	α (cm ² /s)	$\alpha \cdot 10^{-3}$ (cm ² /s)	Promedio
3	400.0	335.885	0.568	0.178	0.003	2.870	2.839
	500.0	406.760	0.443	0.222	0.003	2.864	
	600.0	455.020	0.357	0.259	0.003	2.784	
4	300.0	270.475	0.685	0.144	0.003	3.096	3.099
	400.0	366.370	0.516	0.195	0.003	3.144	
	500.0	428.676	0.406	0.237	0.003	3.057	
5	300.0	247.334	0.723	0.133	0.003	2.860	2.957
	400.0	353.312	0.538	0.188	0.003	3.032	
	500.0	420.500	0.420	0.231	0.003	2.980	

c) 5% Bentonita activa, relación 80-20 de Bentonita cálcica y bentonita sódica.

Humedad (%)	Tiempo (s)	Temperatura (°C)	C_e	Θ	α (cm ² /s)	$\alpha \cdot 10^{-3}$ (cm ² /s)	Promedio
3	300.0	266.182	0.691	0.142	0.003	3.053	3.060
	400.0	361.181	0.523	0.192	0.003	3.096	
	500.0	425.413	0.410	0.235	0.003	3.032	
4	300.0	281.326	0.666	0.149	0.003	3.204	3.171
	400.0	372.199	0.506	0.200	0.003	3.225	
	500.0	429.829	0.405	0.239	0.003	3.083	
5	300.0	293.830	0.644	0.155	0.003	3.333	3.180
	400.0	372.552	0.506	0.199	0.003	3.201	
	500.0	423.824	0.415	0.233	0.003	3.006	

d) 5% Bentonita activa, relación 70-30 de Bentonita cálcica y bentonita sódica.

Humedad (%)	Tiempo (s)	Temperatura (°C)	C_e	Θ	α (cm ² /s)	$\alpha \cdot 10^{-3}$ (cm ² /s)	Promedio
3	300.0	281.067	0.666	0.149	0.003	3.204	3.196
	400.0	373.021	0.503	0.200	0.003	3.225	
	500.0	438.361	0.388	0.245	0.003	3.161	
4	300.0	303.344	0.622	0.161	0.003	3.462	3.507
	400.0	403.311	0.447	0.221	0.004	3.564	
	500.0	467.639	0.334	0.271	0.003	3.496	
5	300.0	253.005	0.710	0.137	0.003	2.946	3.014
	400.0	355.309	0.531	0.190	0.003	3.064	
	500.0	423.365	0.411	0.235	0.003	3.032	

En la **Tabla 4.2**, sólo se consideró las mezclas con 5% de Bentonita activa en la mezcla. Esto indica que la mezcla tiene más bentonita que pueda absorber la humedad y no perderla tan fácil por evaporización, por lo cual se comprobó con que los valores de difusividad térmica son mayores en estas mezclas que con las mezclas de 4% de bentonita activa, excepto en la humedad 3%, pero la mayoría osciló en valores de difusividad térmica de $0.003 \text{ cm}^2/\text{s}$. Como se mencionó anteriormente, este comportamiento sólo se aprecia con mezclas de 4 y 5 % de humedad, puesto que en la mayoría de los casos el valor de difusividad térmica es mayor en mezclas con mayor porcentaje de bentonita activa, sin embargo tienen mayor valor de difusividad térmica las mezclas que tienen menos cantidad de bentonita y menor humedad, por lo cual se aprecia que existe un grado de humedad óptima para cada % de bentonita activa en la mezcla, ya que al querer meter poca agua en las mezclas que tiene una gran cantidad de bentonita, hace que la mezcla pierda la capacidad de propagar el calor, que algunas condiciones esto sea benéfico para la solidificación del metal, pero si el caso es que quisieran tener una mayor valor de difusividad térmica, se tendrá que meter el suficiente porcentaje de humedad para que toda la bentonita pueda adquirirla, sin llegar a la saturación de esta.

En el caso de 5% de bentonita activa los valores de difusividad térmica fueron más variados respecto a la relación del tipo de bentonita, y los valores más alto fue para la relación de 70-30% bentonita cálcica y bentonita sódica respectivamente respecto al porcentaje total de bentonita activa en la mezcla (BCa-BNa) en una humedad de 4% y para 100% BCa a una humedad de 5%. Los valores menores generalmente fueron para la relación de 90-10% (BCa-BNa).

En las siguientes **Figuras 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4** se muestran las representaciones de los valores de difusividad térmica (α) respecto a la propiedad mecánica de resistencia a la compresión en verde, la cual es básica en las pruebas mecánicas que se elaboran en la industria y de las más rápidas.

Cabe mencionar que en el **Capítulo VII. Anexo 3**, se encuentran todos los valores obtenidos de los ensayos mecánicos que fueron sometidas las mezclas que se usaron en el presente trabajo.

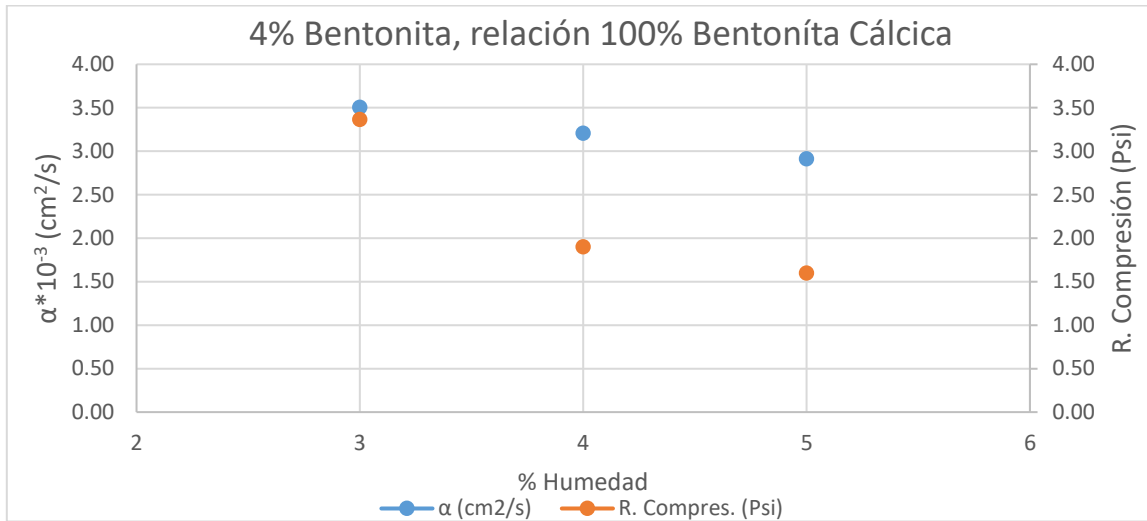


Figura 4.1. Representación de los valores difusividad térmica (α) y la resistencia a la compresión en verde, de la mezcla con las condiciones 1,5 y 9, que son 4% de Bentonita activa con 100% de Bentonita cálcica en sus diferentes humedades.

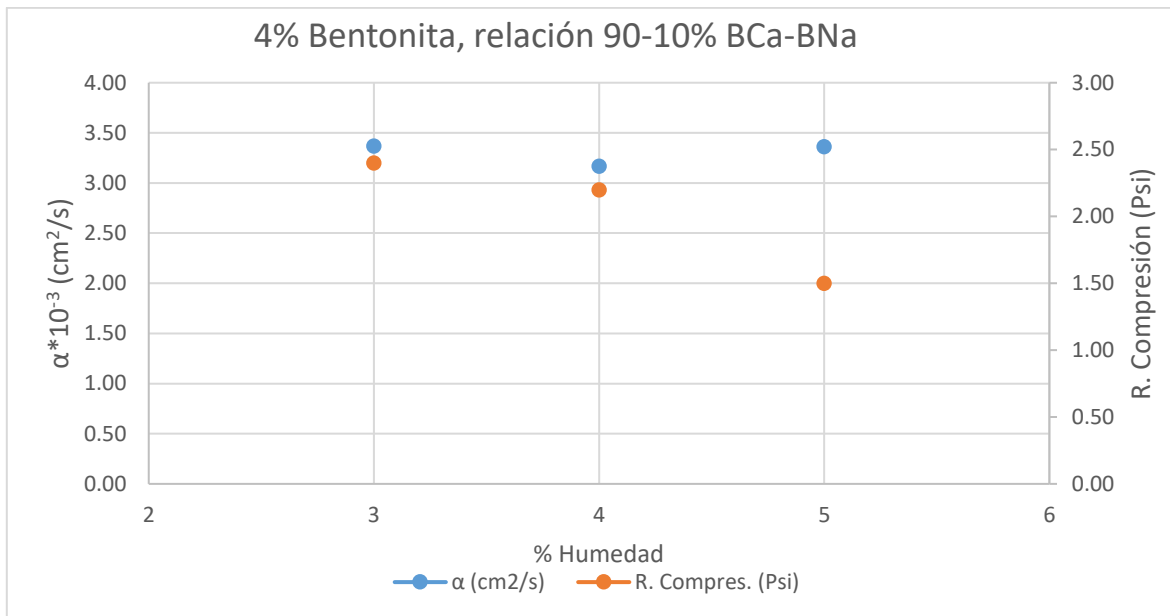


Figura 4.2. Representación de los valores difusividad térmica (α) y la resistencia a la compresión en verde, de la mezcla con las condiciones 2,6 y 10, que son 4% de Bentonita activa con 90-10% de Bentonita cálcica y Bentonita sódica en sus diferentes humedades.

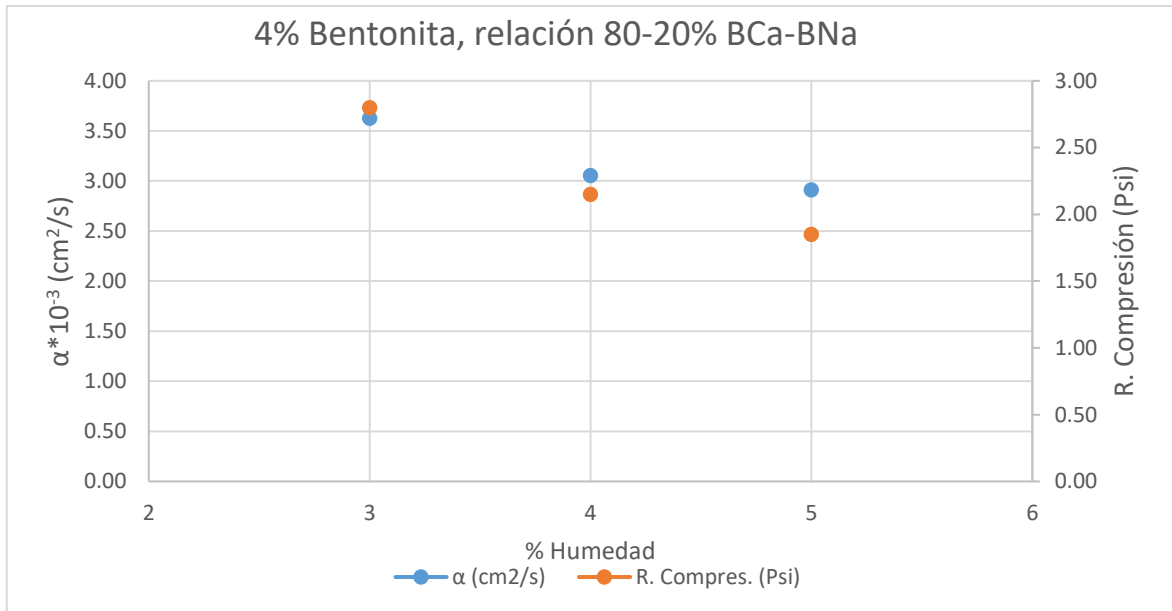


Figura 4.3. Representación de los valores difusividad térmica (α) y la resistencia a la compresión en verde, de la mezcla con las condiciones 3,7 y 11, que son 4% de Bentonita activa con 80-20% de Bentonita cálcica y Bentonita sódica en sus diferentes humedades.

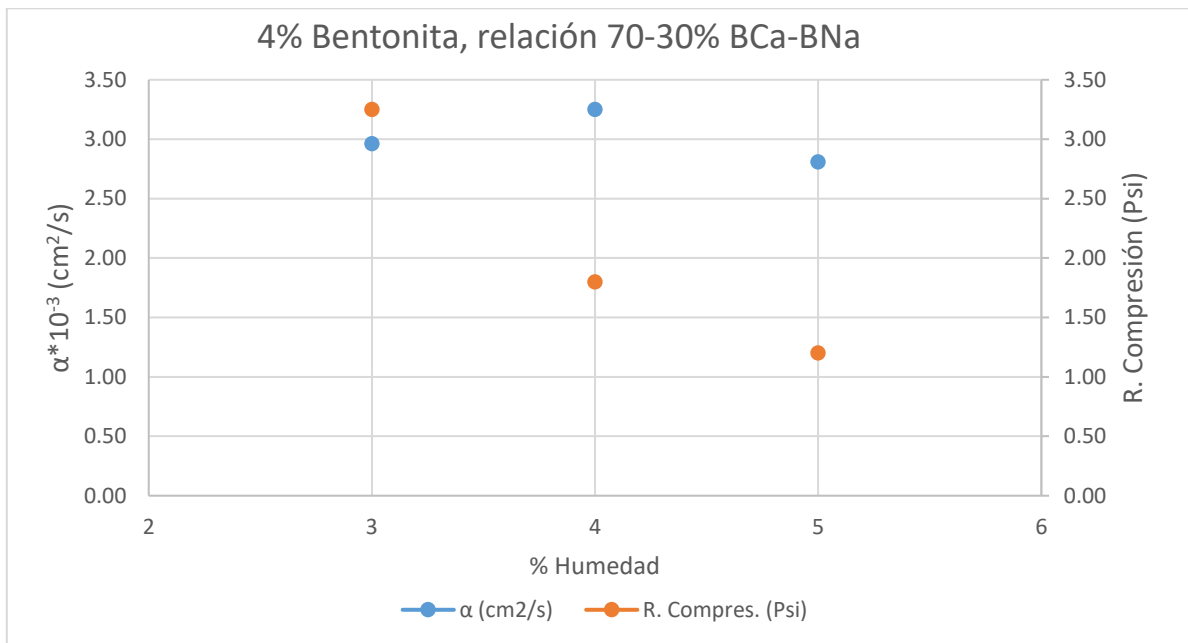


Figura 4.4. Representación de los valores difusividad térmica (α) y la resistencia a la compresión en verde, de la mezcla con las condiciones 4,8 y 12, que son 4% de Bentonita activa con 70-30% de Bentonita cálcica y Bentonita sódica en sus diferentes humedades.

En las **Figuras 4.1 a la 4.4**, se muestra una representación de la difusividad térmica y la resistencia a la compresión en verde en relación al % de humedad, en las condiciones de 4% de Bentonita activa en la mezcla con su respectiva relación de bentonita cálcica y bentonita sódica. Se considero tomar la resistencia a la

compresión en verde, de aquellas propiedades tomadas de las mezclas, ya que esta propiedad es importante de tomar en cuenta cuando se quiere prevenir el colapso del molde al extraer el modelo y además de ser una propiedad para determinar el punto temper o punto de templado.

De acuerdo con la literatura, el desarrollo de la resistencia de la unión entre los granos de arena depende de la hidratación de la arcilla, la resistencia a la compresión en verde de la mezcla aumenta con el contenido de agua en la mezcla hasta cierto punto donde el agua libre adicional hace que la resistencia verde disminuya. Esto también depende de la relación de bentonita sódica y cálcica en la mezcla, puesto que la presencia de los diferentes cationes de las bentonitas tiene diferentes cualidades, como es el caso de la bentonita cálcica que presenta un %hinchabilidad muy bajo y, por tanto, adsorben menos agua que la bentonita sódica.

Esto tiene como efecto que en la representación de esta propiedad en la mayoría de las condiciones de la mezcla de bentonita activa y relación de la misma, al aumentar la humedad, la resistencia a la compresión en verde tiende a disminuir, esta variación suele ser en la mayoría de las mezclas (relación 100%BCa, 80-20% BCa-BNa y 70-30% BCa-BNa) más de una unidad de diferencia en cada una de las humedades, además, de que la conductividad térmica suele tener también este comportamiento, pero a diferencia de la resistencia de la compresión en verde, estos cambios no son tan grandes excepto en la relación de 70-30% de BCa y BNa.

Es indispensable conocer la resistencia a la compresión en verde mínima que debe tener la mezcla para que no ocurra un colapso del molde cuando se vacie el metal líquido, puesto que al conocer esta o definirse, se impondrá las condiciones a las cuales se van a manejar las relaciones de bentonita cálcica y bentonita sódica, así como el porcentaje de bentonita activa total de mezcla para tener una difusividad térmica que se desee.

Como se ha demostrado que con una predicción precisa de la velocidad de enfriamiento dentro del molde y conociendo las propiedades termofísicas del mismo,

se hace posible evaluar la capacidad del proceso para producir microestructuras favorables (esencialmente con bajo SDAS*) y, por lo tanto, altas propiedades mecánicas, y además de prevenir defectos tales como porosidad, micro porosidad y cavidades por contracción. Por lo cual puede ser subjetivo mencionar cual es la condición óptima de la mezcla para los procesos, ya que cada proceso o material a elaborar debe cumplir con los requisitos estipulados por el cliente.

A continuación de la **Figura 4.5** a la **Figura 4.8**, se presentan los valores de difusividad térmica (α) respecto a la propiedad mecánica de resistencia a la compresión en verde con el 5% de Bentonita activa en la mezcla.

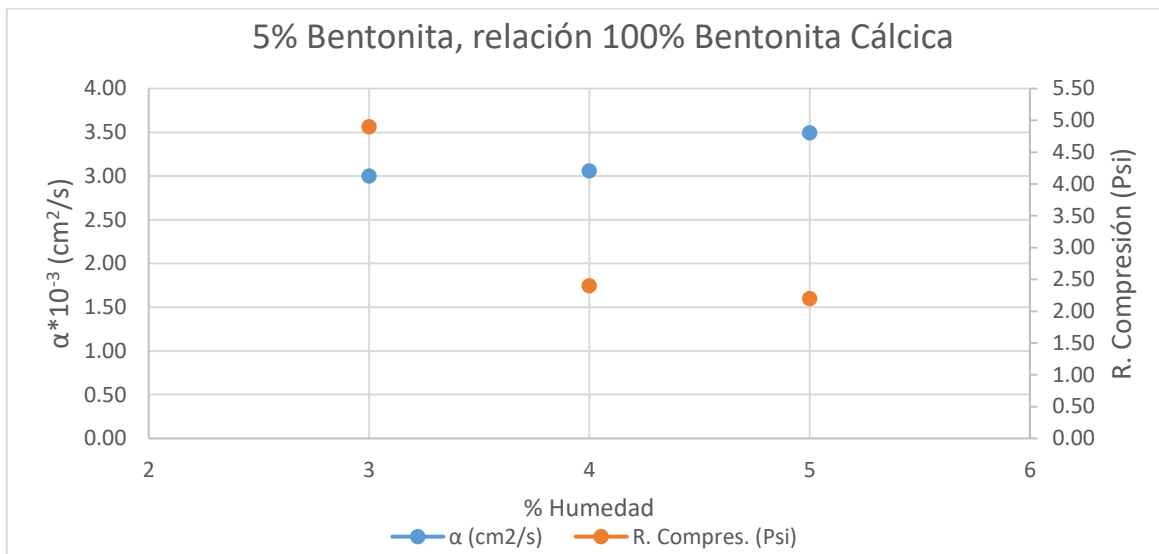


Figura 4.5. Representación de los valores difusividad térmica (α) y la resistencia a la compresión en verde, de la mezcla con las condiciones 13,17 y 21, que son 5% de Bentonita activa con 100% de Bentonita cálcica en sus diferentes humedades.

*SDAS: Secondary Dendrite Arm Spacing, espaciado dendrítico secundario

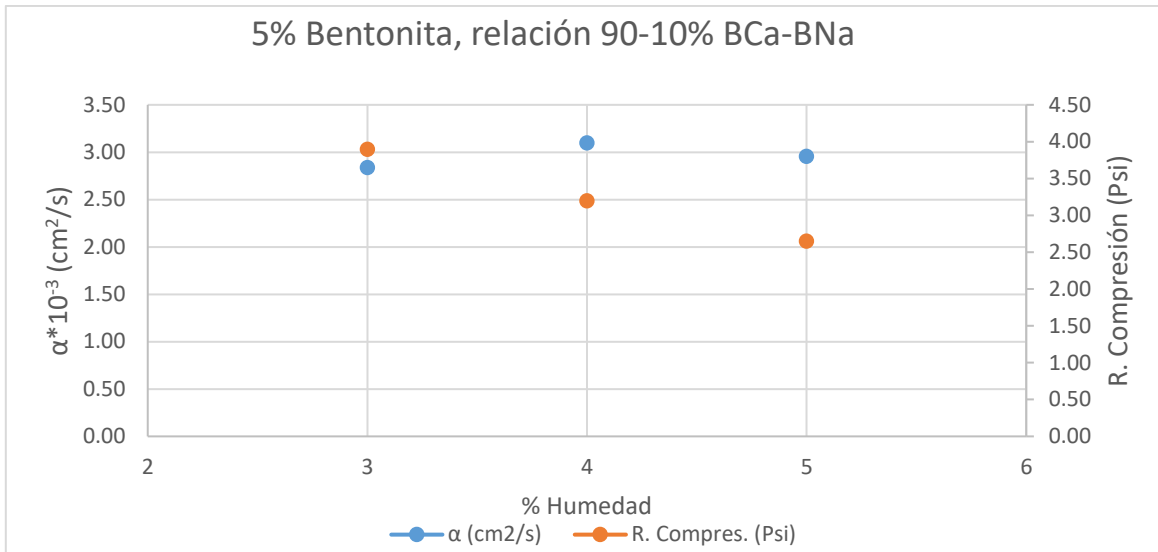


Figura 4.6. Representación de los valores difusividad térmica (α) y la resistencia a la compresión en verde, de la mezcla con las condiciones 14, 18 y 22, que son 5% de Bentonita activa con 90-10% de Bentonita cálcica y Bentonita sódica en sus diferentes humedades.

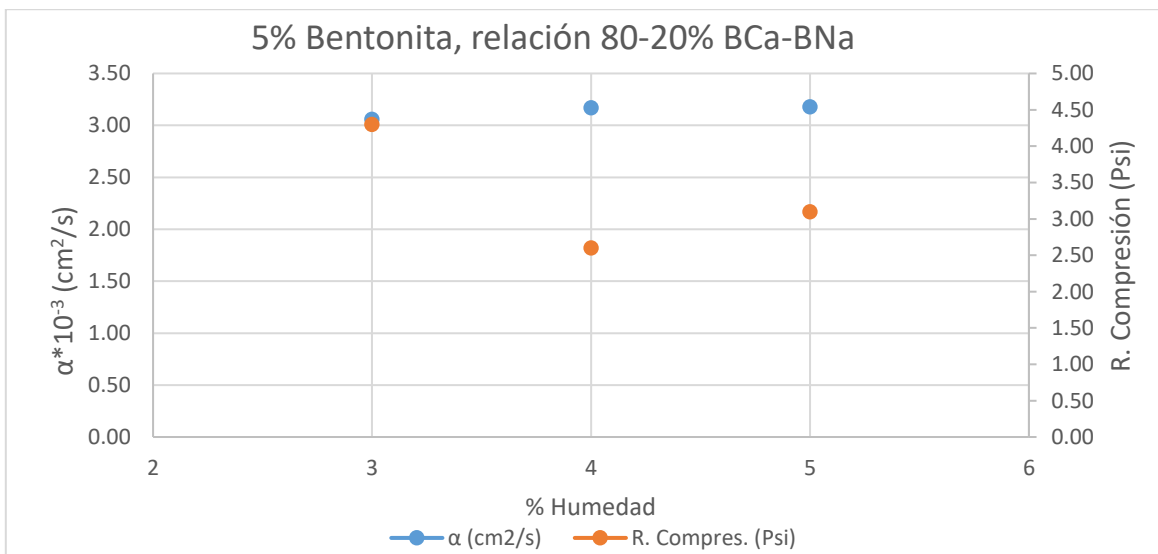


Figura 4.7. Representación de los valores difusividad térmica (α) y la resistencia a la compresión en verde, de la mezcla con las condiciones 15, 19 y 23, que son 5% de Bentonita activa con 80-20% de Bentonita cálcica y Bentonita sódica en sus diferentes humedades.

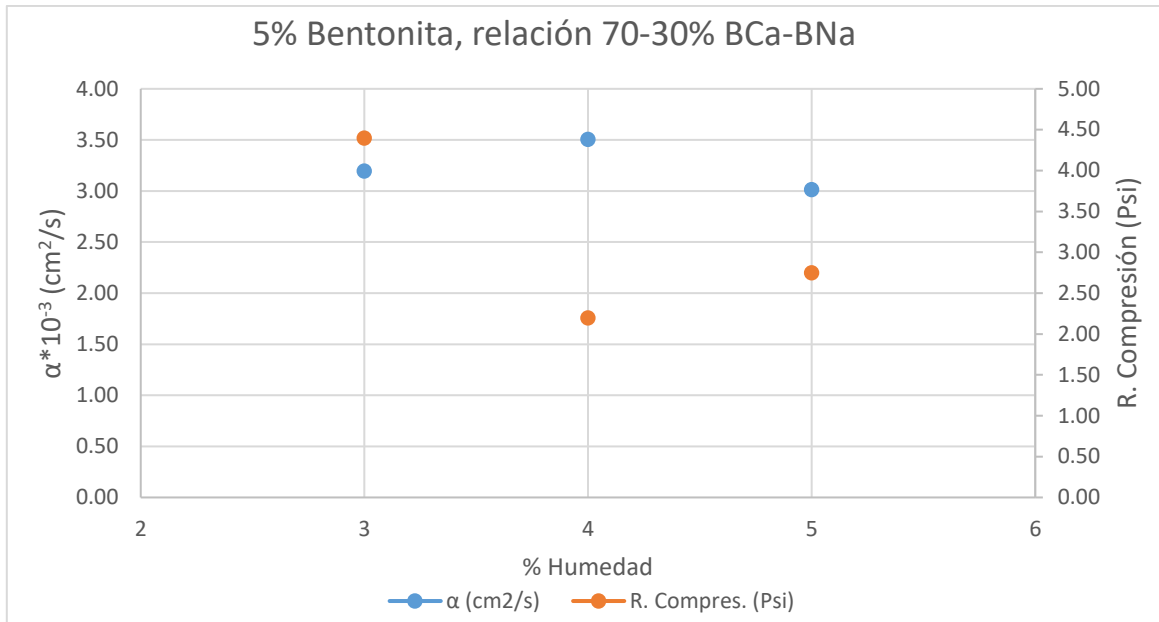


Figura 4.8. Representación de los valores difusividad térmica (α) y la resistencia a la compresión en verde, de la mezcla con las condiciones 16,20 y 24, que son 5% de Bentonita activa con 70-30% de Bentonita cálcica y Bentonita sódica en sus diferentes humedades.

De la **Figura 4.5** a la **Figura 4.8**, son una representación gráfica de los valores de difusividad térmica calculada y el valor promedio de la resistencia a la compresión en verde que se hicieron a las mezclas con las condiciones experimentales del 13 al 24, de la **Tabla 3.1**, cuyo porcentaje de Bentonita activa de la mezcla es de 5%, cambiando la Relación de BCa y BNa dentro de la mezcla y el % de humedad.

Estas representaciones muestran una relación diferente a las mezclas de 4% de Bentonita activa en la mezcla. Para las mezclas con 5% de bentonita activa, primeramente, se observa que al incrementar el % de humedad, la resistencia a la compresión en verde disminuye y al obtener los resultados de la difusividad térmica para esta condición aumentan.

Cabe mencionar que, en el caso de estas mezclas, al aumentar la humedad, la cantidad de agua libre es menor en comparación con las mezclas anteriores (4% de bentonita activa), debido a que aumenta el porcentaje de bentonita activa dentro de la mezcla, la cual ocasiona que esta absorba mayor cantidad de agua. Conforme la humedad va creciendo, la resistencia de la capa arcillosa que envuelve cada grano de arena va adquiriendo resistencias cada vez mayores y evita el empaquetamiento denso de los granos, impidiendo su movimiento hacia los sitios de menor densidad,

sin embargo cuando se aumenta el porcentaje de humedad, que pudiera ser este caso, la arcilla pierde sus propiedades aglutinantes, comportándose cada grano de arena recubierto con arcilla, como una individualidad separada, incapaz de mostrar cohesión a otras unidades semejantes. Lo anterior puede ser una razón de lo que pudo existir con estas mezclas (porcentaje de humedad de 3 y 4%), pero no solo esto puede provocar los cambios de resistencia a la compresión en verde de las mezclas, sino también a los cationes absorbidos.

Cabe mencionar que en la literatura se indica que la resistencia a la compresión en verde de las montmorillonitas sódica y cálcica, difieren a consecuencia de los efectos que los iones Na y Ca más Mg que tienen sobre la construcción y la rigidez de las capas de agua adsorbida sobre éstas. Para la montmorillonita sódica, su máxima resistencia en verde se produce cuando hay tres capas moleculares de agua rígida por celda unitaria adsorbida sobre ella. Para la cálcica, ocurre cuando hay adsorción de cuatro capas rígidas sobre su celda unitaria. En consecuencia, la resistencia máxima en verde se encuentra en la montmorillonita cálcica debido a las características de hidratación al contener mayor cantidad de agua rígida que conduce a un mayor enlace interpartículas.^[16] Esto se aprecia a que los valores de resistencia a la compresión en verde son mayores en los experimentos en cuya cantidad de Bentonita activa en la mezcla es de 5% y que en donde el 100% de la bentonita presente es cálcica presenta la mayor resistencia a la compresión en verde.

Con la mención a lo anterior, está escrito en la tesis de Garcia Rosendo^[4], en un artículo de B. Rao y D. Williams, explica que el aumento de las propiedades térmicas se justifica en base a la interacción granular de la arena, es decir, cuando la arena se encuentra seca, el área de contacto entre granos es muy pequeña en comparación a cuando existe un alto porcentaje de humedad, ya que solo contiene aire entre los mismos como medio propagador de calor. Como la conductividad térmica del aire es muy pequeña en comparación con la de los granos sólidos y estos se encuentran en contacto en solo una pequeña área, entonces, la conductividad de la mezcla es muy baja. Cuando se adiciona el agua los granos se

agrupan entre ellos por este medio, es decir, el agua aumenta el área de contacto entre los granos de arena debido al incremento de las fuerzas de adhesión agua-arena, siendo el agua más de 20 veces mayor en su conductividad térmica que la del aire, se presenta por lo tanto un incremento de la conductividad térmica.

Como se mencionó anteriormente, cuando existe una gran cantidad de agua, la arcilla, pierde sus propiedades adhesivas, comportándose cada grano de arena recubierto con arcilla, como una individualidad separada, incapaz de mostrar adherencia a otras unidades semejantes y con este excedente de agua, los granos se agrupan entre ellos por este medio provocando que exista el incremento de la conductividad térmica.

De la **Figura 4.9** a la **Figura 4.10**, será una recopilación de las difusividades térmicas y la resistencia a la compresión en verde, para poder apreciar más cualitativamente con respecto a otras condiciones, las cuales de acuerdo a la **Tabla 3.1**, las condiciones del 1 al 12 (4% de Bentonita activa dentro de la mezcla) serán representadas con un símbolo de rombo mientras que las condiciones del 13 al 24 (5% de Bentonita activa dentro de la mezcla) se representaras mediante un circulo.

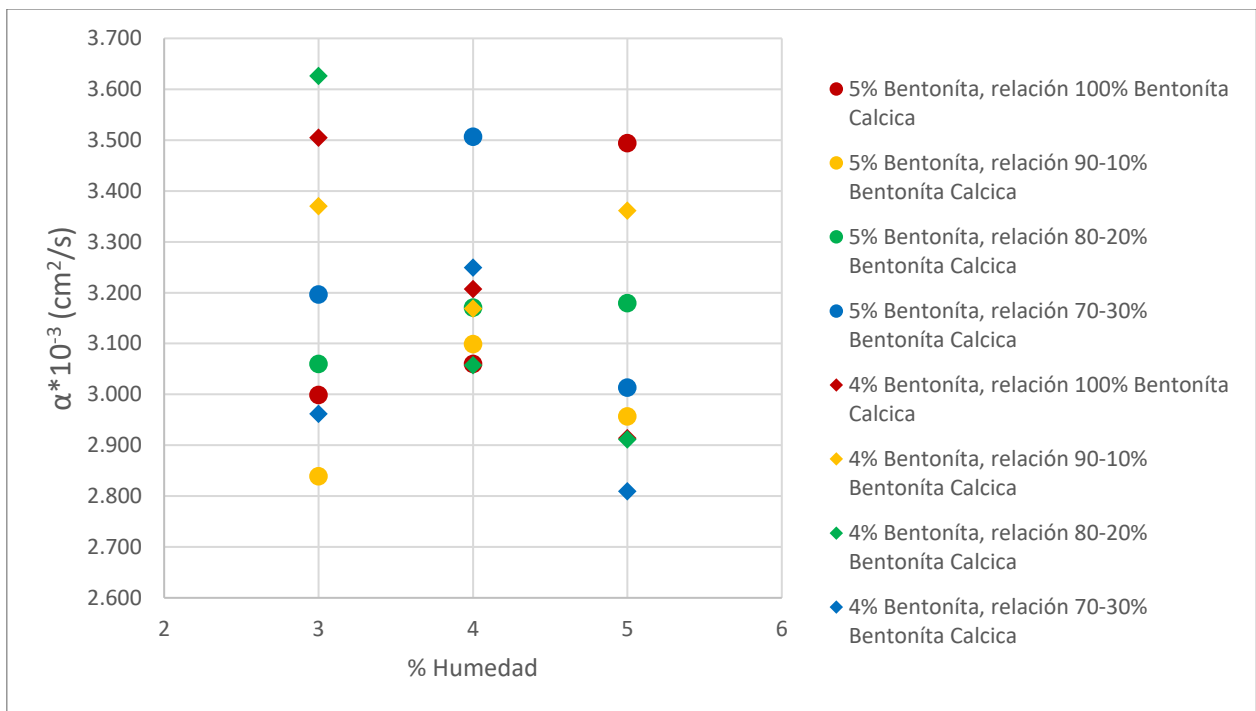


Figura 4.9. Recopilación de todos los valores de difusividad térmica de los experimentos de la **Tabla 3.1.**

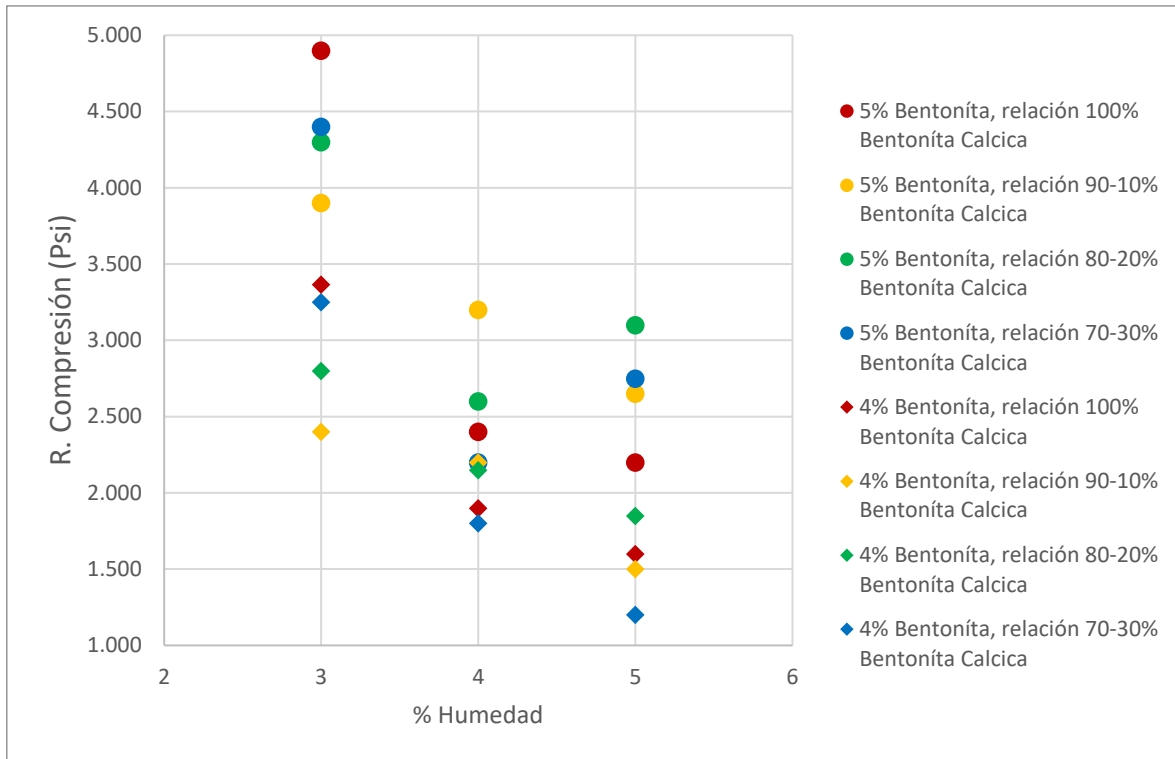


Figura 4.10. Recopilación de la resistencia a la compresión en verde de todas las mezclas preparadas de la Tabla 3.1.

Como se mencionó anteriormente, si se aprecia la **Figura 4.9**, los valores de difusividad térmica son las mayormente más altas en las mezclas con 4% de bentonita activa y 3% de humedad (condiciones de la 1 a la 12, de la **Tabla 3.1**), respecto con las mezclas de 4% de humedad, y los valores difusividad térmica de las mezclas de 4% de humedad son similares con respecto con las mezclas de 5% de humedad. Los valores de la difusividad térmica son más altos en su mayoría en las mezclas de 5% de Bentonita activa (condiciones de la 13 a la 25, de la **Tabla 3.1**).

Respecto a la **Figura 4.10**, los valores más altos de la resistencia a la compresión en verde se presentan en las mezclas con 5% de Bentonita activa en todos los porcentajes de humedades, sin embargo, también se debe tomar en cuenta las variaciones de los valores con respecto a la relación de Bentonita cálcica y Bentonita sódica dentro de la mezcla, puesto que no tienen el mismo comportamiento cuando solo hay en la mezcla bentonita cálcica o existe presencia de la bentonita sódica.

En 3% de humedad, se aprecia en las 4 relaciones de BCa-BNa (100% BCa, 90-10% BCa-BNa, 80-20% BCa-BNa y 70-30 BCa-BNa), que existe un comportamiento similar al de 4 y 5% de Bentonita activa en la mezcla, teniendo el mayor valor de la resistencia a la compresión en verde, en la relación de 100% BCa y seguida de forma descendiente 70-30% BCa-BNa, 80-20% BCa-BNa y con la menor resistencia a la compresión en verde la relación 90-10% BCa-BNa.

Respecto a 4% de humedad se tiene el mayor valor, la relación de 90-10% BCa-BNa y de forma descendiente 80-20%, 100%BCa y con la menor resistencia a la compresión en verde la relación 70-30%.

Por último, con el 5% de humedad, los valores más altos los tienen la relación 80-20% y 70-30% de BCa-BNa, respectivamente y los valores de resistencia a la compresión en verde de menor valor las relaciones de 100% BCa y 90-10% de BCa-BNa, con el menor valor los de 100% de BCa.

Cabe mencionar que estas variaciones de la resistencia a la compresión en verde eran de esperarse puesto que cada mezcla tiene diferente comportamiento por la naturaleza de las bentonitas. En la humedad de 4% se aprecia la transición de la influencia que tienen los cationes absorbidos de la mezcla y también tomando como ejemplo la **Figura 2.6** del marco teórico se aprecia el aumento de la resistencia a la compresión en verde al crecer la cantidad de bentonita en la mezcla.

Como antes se mencionó, la resistencia a la compresión en verde es mayor en la bentonita cálcica, respecto a la bentonita sódica, porque es debido a que los iones Ca^{2+} y sus esferas de hidratación dan lugar a un mayor número de capas rígidas, formadas por las moléculas de agua que han sido absorbidas por la arcilla. Por ello los valores de la resistencia a la compresión en verde de las mezclas con una relación de 100% de bentonita cálcica son las más altas, como se aprecia en la **Figura 4.10**. Parkes^[2] menciona en su libro, que existen lo que él denomina "exchangeable bases", esto se refiere que cuando se agrega una sal de sodio a una solución de bentonita de calcio, parte del calcio se reemplaza por el sodio y esta sustitución puede continuar hasta que se haya reemplazado todo el calcio o se haya

agotado todo el sodio. En ocasiones el agua puede entrar entre las placas de algunas bentonitas de sodio, pero no de calcio, haciendo que la arcilla se hinche. Estas son algunas razones por las que se tuvieron estos cambios de la resistencia a la compresión en verde de las mezclas.

Aunque es muy difícil hacer una comparación de valores de Difusividad térmica, debido, a la cantidad de variables que intervienen y que no se especifican siempre con toda claridad en la literatura; se seleccionaron algunos de ellos que pudieran ser más cercanos a la composición del medio del moldeo utilizada en este trabajo, aunque en algunos casos se desconocen las condiciones de las mezclas, como el % de humedad y las condiciones de bentonita.

A continuación, la **Tabla 4.3** muestra los valores de la difusividad térmica en cada una las condiciones que se trabajaron las mezclas, además de la **Tabla 4.4**, donde se muestra algunos valores de difusividad térmicas y condiciones de las mezclas que se utilizaron.

Tabla 4.3. Valores de difusividad térmica en cada una las condiciones de la experimentación.

CONDICIONES	Porcentaje de Bentonita activa (%)	Relación de BCa y BNa (%)	%Humedad	$\alpha \cdot 10^{-3}$ (cm ² /s)
1	4	100	5	2.914
2	4	90-10	5	3.362
3	4	80-20	5	2.912
4	4	70-30	5	2.809
5	4	100	4	3.207
6	4	90-10	4	3.169
7	4	80-20	4	3.057
8	4	70-30	4	3.249
9	4	100	3	3.505
10	4	90-10	3	3.370
11	4	80-20	3	3.626
12	4	70-30	3	2.962
13	5	100	5	3.494
14	5	90-10	5	2.957
15	5	80-20	5	3.180
16	5	70-30	5	3.014
17	5	100	4	3.060
18	5	90-10	4	3.099
19	5	80-20	4	3.171

Tabla 4.4. CONTINUACIÓN.

CONDICIONES	Porcentaje de Bentonita activa (%)	Relación de BCa y BNa (%)	%Humedad	$\alpha \cdot 10^{-3}$ (cm ² /s)
20	5	70-30	4	3.507
21	5	100	3	2.999
22	5	90-10	3	2.839
23	5	80-20	3	3.060
24	5	70-30	3	3.196

Tabla 4.4. Datos en la literatura sobre valores de coeficiente de difusividad térmica.

Investigación	$\alpha \cdot 10^{-3}$ (cm ² /s)	Observaciones
Sashadri (India) ^[4]	2.5	-
Pehlke (U.S.A) ^[4]	3.8	-
Narayama (India) ^[4]	1.9	5% Bentonita Sódica
Virolle (Francia) ^[4]	2.0	-
Marotto (México) ^[21]	1.7	4.5% Bentonita Sódica y 3% humedad
Llanos (México) ^[5]	1.8	4% Bentonita Sódica y 2.5% humedad
García (México) ^[4]	2.46-2.66	6% Bentonita Sódica y 4% humedad
García (México) ^[4]	2.67-3.18	6% Bentonita Cálcica y 4% humedad
Juárez (México) ^[21]	1.9-1.69	5% Bentonita Sódica y 4% humedad
Juárez (México) ^[21]	2.0-1.097	5% Bentonita Cálcica y 5% humedad

En los experimentos anteriores a diferencia de este trabajo, ninguno vario la relación de bentonita sódica y cálcica dentro de la mezcla, ya que solo manejaron un solo tipo de bentonita en una mezcla.

Los valores que se encuentran en la **Tabla 4.4** que son de otras investigaciones sobre la difusividad térmica dentro de las mezclas de moldeo, a comparación con los obtenidos en el trabajo actual, como se observa en la **Tabla 4.3**, no cambian respecto a la magnitud, esto quiere decir que oscilan entre $1-3 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{s}$, sin embargo, en los valores obtenidos en este trabajo son de los más altos excepto por los obtenidos del experimento de Pehlke, donde obtuvo un valor de 3.8. Cabe mencionar que cada uno de esos experimentos, como se aprecian en la **Tabla 4.4**, los valores de difusividad térmica se obtuvieron por diferentes métodos.

De los métodos antes mencionados, el cual se tiene fundamento este trabajo fue el elaborado por Rosendo García, por ello es posible que las variaciones que se tienen

no solo tienen que ver el porcentaje de bentonita ni del porcentaje de humedad, sino también del control de las preparaciones de la mezcla, ya que pueden cambiar en la naturaleza de la arena, el tamaño de grano, naturaleza del aglutinante, aditivos, etc.

Respecto al trabajo de Rosendo García, se utilizó el mismo método para la obtención de los valores de difusividad térmica, pero se cambiaron las condiciones y la materia prima del medio de moldeo, como es la granulometría de la arena, por ejemplo, en el trabajo de Garcia se utilizó Arena Sílica con No. AFS 40-50 y en el presente trabajo No. AFS que se empleo fue 90-100, otro cambio que se aprecia es que en el trabajo de Garcia, se utilizaron porcentajes de bentonita activa mayores a 6% y sin manejar las relaciones de Bentonita cálcica y Bentonita sódica dentro de la mezcla.

Cabe dar mención que los rangos de los valores de difusividad térmica, entran también en los intervalos de valores obtenidos en el presente trabajo, pero como escribe Llanos^[5] en su trabajo, los autores Narayama y Ramakriahnan justifican los cambios de la difusividad térmica a la disminución del área de contacto entre granos por perdida de humedad en la película de bentonita alrededor de ellos, y el aumento de la difusividad térmica, es debido por el aumento de radiación intergranular, por ello como la película de bentonita depende del tamaño de grano donde esta adherida, esta área de contacto entre los granos suele ser mayor en partículas más pequeñas como es el caso de arena con No. AFS de 90-100 a comparación de No. AFS de 40-50.

Efecto de la temperatura sobre la humedad de las mezclas.

Es importante señalar que el comportamiento del agua en un molde de arena en verde es muy complicado porque el flujo de calor incluye evaporación y condensación del agua, y estos fenómenos no se han comprendido bien. Sin embargo, el vapor de agua transformado a partir del agua en un molde de arena en verde se considera una de las causas principales de los defectos de fundición, como los blow holes (porosidad por gases, en especial, vapor de agua). Por otra parte, el flujo de calor en un molde de arena en verde determina la velocidad de solidificación,

y es necesario un conocimiento de la transferencia de calor en los moldes de arena para controlar la solidificación, por lo tanto, es importante realizar un análisis de transferencia de calor y humedad en un molde de arena en verde que contiene agua, tanto para el control de la solidificación como para la prevención de defectos en las piezas.

Las distribuciones de temperatura a través de los diferentes espesores de moldes para un molde de arena en verde que contiene agua, se muestran en la **Figura 2.10**, en el capítulo 2 del apartado de Propiedades Termo-físicas.

Realmente en un molde de arena en verde cuando se vierte el metal líquido, el agua contenida en la mezcla, y la que se encuentra cerca de la interface metal/molde, prácticamente se evapora, y el vapor generado se va transportando a una región de baja temperatura (que corresponde a una distancia “x” de la interfase metal/molde) y se condensa. El agua condensada y que se ubica a la distancia “x” de la interfase metal/molde, se evapora de nuevo a cierto tiempo, por lo que, este fenómeno ocurre repetidamente. En la **Figura 4.11**, este fenómeno que se describe se puede observar en las curvas de enfriamiento obtenidas por el análisis térmico. La zona dónde los cambios de temperatura no se han presentado y que no existe pérdida de humedad, se le llama *zona externa*. En esta zona aún no se ha vertido el metal líquido y la temperatura registrada en ambos termopares a cierta distancia de la interfase metal/molde es la temperatura ambiente, para este caso es de 27.95°C. Posteriormente se observa que hay un incremento de la temperatura que registran los dos termopares (El metal líquido se ha colado dentro del molde), esto es debido principalmente a que el agua empieza a evaporarse en la interfase metal/molde y comienza a transportarse a través del espesor del molde (probeta norma) hasta llegar a una temperatura aproximada de 91.5 °C, a esto se le llama *zona de condensación*. La siguiente zona que se presenta es cuando la temperatura se mantiene constante por un cierto intervalo de tiempo y se le conoce como *zona de transportación*, además es la zona en dónde se presenta una gran saturación de agua. De acuerdo a la altura en la Ciudad de México, 2250 metros sobre el nivel del mar y a la presión atmosférica a esa altura, la temperatura de ebullición del agua es

$92 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$, por lo que éste dato coincide con el valor reportado en la **Figura 4.12** de la zona de transportación (91.5°C). Después de pasar esta zona, la temperatura comienza a subir, por lo que, toda la humedad presente dentro de la probeta norma se pierde por completo, a esta zona se le llama *zona seca*.

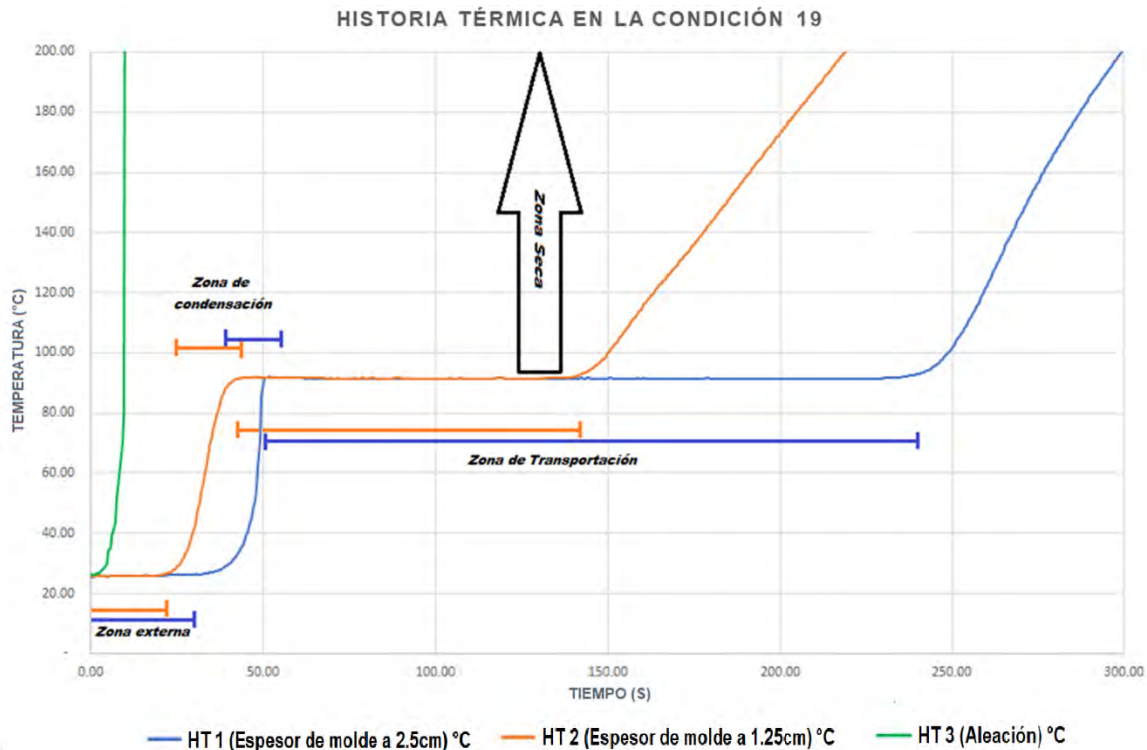


Figura 4.11. Zonas de distribución con respecto a la humedad que presenta la probeta norma a cierta distancia de la interfase metal/molde en moldeo en verde con 5% de bentonita activa, 80% bentonita cálcica, 20% de bentonita sódica y con 5% de humedad. HT2: Historia Térmica en la probeta norma con un termopar ubicado a una distancia de 1.25 cm de la interfase. HT3: Historia Térmica en la probeta norma con un termopar ubicado a una distancia de 2.5 cm de la interfase.

A continuación, en la **Tabla 4.5** se presentan las temperaturas registradas en la zona externa y de condensación para cada condición de las mezclas.

Tabla 4.5. Temperaturas registradas durante los experimentos para cada condición de las mezclas bajo estudio.

Condición	%Humedad	Temperatura de la zona externa (°C)	Temperatura de la zona de transportación (°C)	Tiempo aprox. de la zona de transportación (s)
1	5	25.64	91.85	235
2	5	27.41	91.24	215
3	5	22.94	90.71	230
4	5	23.94	90.95	229
5	4	25.56	91.31	214
6	4	23.94	91.26	192
7	4	25.97	92.03	198
8	4	23.95	91.92	219
9	3	22.93	92.52	169
10	3	25.19	89.45	148
11	3	22.84	116.15	---
12	3	25.43	91.42	178
13	5	24.88	91.39	198
14	5	26.16	92.23	236
15	5	27.97	91.50	188
16	5	21.93	90.53	223
17	4	25.11	90.51	190
18	4	25.09	92.02	214
19	4	24.03	92.11	210
20	4	22.02	88.98	206
21	3	22.89	91.11	173
22	3	25.92	92.25	191
23	3	25.55	91.48	185
24	3	26.20	91.73	182

La tabla anterior, es la corroboración de la *zona de transportación*, en donde todas las mezclas preparadas (excepto la condición 11) se encuentran a la temperatura de ebullición del agua que es $92^{\circ} C$ y en estos casos esta temperatura oscila $92 \pm 3^{\circ} C$.

Asimismo, se aprecia como la cantidad de agua influye en el tiempo de la duración de la *zona de transportación* que existe dentro del molde, haciendo que los mayores tiempos son aquellos que comparten mayor porcentaje de agua y menor cantidad de bentonita, puesto que existe mayor cantidad de agua libre dentro de la mezcla.

Así como la tendencia de que el tiempo de la *zona de transportación* es mayor en las mezclas donde existe un aumento en la cantidad de bentonita sódica, esto es posible que se deba, ya que esta bentonita suele hincharse más y tiene en la superficie mayor cantidad de agua.

Capítulo V. Conclusiones

De los resultados obtenidos se pueden hacer las siguientes conclusiones:

- Tanto el % de bentonita activa, el % de humedad y la relación de bentonita cálcica y bentonita sódica, tienen una influencia en los valores de difusividad térmica.
- En la mezcla con 5% de bentonita activa y 3% de humedad, se obtiene la máxima resistencia a la compresión en verde y el mínimo valor de difusividad térmica.
- En la mezcla con 4% de bentonita activa (80-20% BCa-BNa) y 3% de humedad, se obtiene la máxima resistencia a la compresión en verde y el valor máximo de difusividad térmica.
- Las mayores resistencias a la compresión en verde fueron en las mezclas donde predomina la bentonita cálcica, debido a que los iones Ca^{2+} y sus esferas de hidratación dan lugar a un mayor número de capas rígidas.
- Los valores mínimos de difusividad térmica se presentan en las mezclas con 4% de bentonita activa (70-30% BCa-BNa) y 5% de humedad, con 5% de bentonita activa (90-10% BCa-BNa) y 3% de humedad.
- Todas las mezclas en sus respectivas condiciones, presentan de acuerdo a K. Kubo and R. D. Pehlke ^[8], las zonas de: arena seca, transportación, condensación y externa.

Capítulo VI. Bibliografía

- [1]. Kalpakjian, S., Schmid, S. R., (2008). Manufactura, ingeniería y tecnología. México: Pearson Educación.
- [2]. Parkes, W. B. (1978). Clay-Bonded Foundry Sand. London: Applied Science Publisher LTD.
- [3]. Castillo, I. (2011). Determinación de los Coeficientes de Transferencia de Calor Arena Sílice-Aluminio 319, en el Proceso de Fundición Nematik (Tesis de licenciatura). F.Q.: UNAM.
- [4]. García, R. (1997). Determinación de las propiedades térmicas de arenas de moldeo mediante un nuevo método "Cilindro Finito" (Tesis de Licenciatura). F.Q.: UNAM.
- [5]. Llanos, A. (1977). Determinación de propiedades térmicas en arenas de moldeo mediante el método de fusión-solidificación (Tesis de Licenciatura). F.Q.: UNAM.
- [6]. Gandón, J. (2007). Determinación experimental de la conductividad térmica de arenas para moldes de fundición. La Habana, Cuba: Eco Solar.
- [7]. Gonzales, R. M. (2014). Química: Serie Universitaria Patria. Mexico: Patria.
- [8]. Kubo, K. & Pehlke, R. D. (Diciembre 1986). Heat and Moisture Transfer in Sand Molds Containing Water. Metallurgical Transactions B, Volumen 17, 903–911.
- [9]. Sertucha, J. and Suárez, R. (2004). Arenas de moldeo en verde. Durango (Bizkaia): Maristas-Azterlan.
- [10]. Gonzales, J. R. (2001). Efecto de la temperatura sobre las propiedades físicas de moldes y corazones producidos por el proceso Fenol-Uretano en caja fría (Tesis de Licenciatura). Nuevo León: Universidad Autónoma de Nuevo León.
- [11]. Sertucha, J. & Suárez, R. (Julio-septiembre 2005). Materiales inorgánicos aplicados en la fabricación de piezas de fundición. Anales de la Real Sociedad Española de Química, Volumen 3, pag 17-27.
- [12]. Villacis, E. N. (2015). Análisis de la conducta de mezclas de moldeo para fundición aglomeradas con resinas autofraguante fenólico uretanas (Tesis de Licenciatura). Ecuador: Escuela Politécnica Nacional.
- [13]. Brown, J. (1999). Foseco non-ferrous foundryman's handbook. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- [14]. Krajewski, P.K., Piwowarski, G. & Buraś, J.. (2016). Thermal Properties of Foundry Mould Made of Used Green Sand. Archives of Metallurgy and Materials, Vol. 16, pag. 29-32.

- [15]. Krajewski, P.K., Piwowarski, G., Suchy, J.S. (2012). *Formulating the boundary conditions for numerical model of heat transfer in a system heat source – heat sink*. Thermal conductivity of the system, Proceedings of the 1st International Workshop "90 Years of Foundry Engineers Educating by the AGH University of Science and Technology", Faculty of Foundry Engineering.
- [16]. Quintero, O. (2009). Principios de tecnología de la fundición. Caracas: Equinoccio Simón Bolívar.
- [17]. Guy, A. M. & Hren, J. J. (1974). Elements of Physical Metallurgy. New York: Oxford e LPC.
- [18]. Korol'kov, A. M. (1960). Casting Properties of Metals and Alloys. USA, NY: Consultants Bureau.
- [19]. Kondic, V. (1968). Metallurgical Principles of Founding. London: E. Arnold Pub. Ltd.
- [20]. Departamento de la Armada, Oficina de Barcos. (1958). Foundry Manual. EE. UU.: Oficina de Imprenta del Gobierno de EE. UU
- [21]. Juárez, A. J. (1977). Influencia de la preparación del sistema de moldeo sobre propiedades térmicas del mismo (Tesis de Licenciatura). México F.Q.: UNAM.
- [22]. Navarro, J. M. (1962). Tecnología de las tierras de moldeo para fundición. Madrid: Montecorvo.

Capítulo VII.

Anexo 1.

Ecuación de conducción en sistema de coordenadas cilíndricas

Considerando un sistema cilíndrico como el que muestra en la **Figura 6.1.1**:

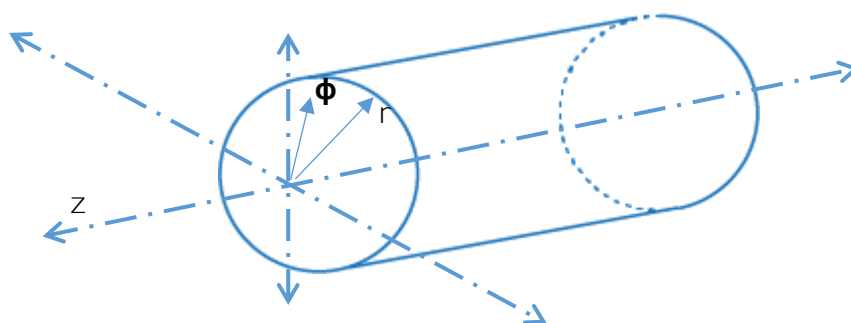


Figura 7.1.1. Cilindro que se puede representar en x, y y z , o r, z y Θ .

Las variables especiales son: la distancia radial r , la distancia axial z y el ángulo Θ , como se refiere a la descripción de la **Figura 6.1.1**, estas variables están relacionadas con x, y y z de la siguiente manera:

$$x = r * \text{Cos } \theta$$

$$y = r * \text{Sen } \theta$$

$$z = z$$

Usando esta relación y la regla de la cadena de diferenciación, la ecuación:

$$\alpha \left[\frac{\delta^2 T}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} \right] + \frac{q(x,y,z)}{\delta z^2} = \frac{\delta T}{\delta t} \quad \dots\dots\dots \text{Ec. (15)}$$

Se puede expresar de la siguiente manera:

$$\left[\frac{1}{r} \frac{\delta}{\delta r} \left(r \frac{\delta T}{\delta r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\delta^2 T}{\delta \theta^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} \right] + \frac{q(r,\theta,z)}{\rho C p} = \frac{\delta T}{\delta t} \quad \dots\dots\dots \text{Ec. (16)}$$

O bien

$$\frac{\delta^2 T}{\delta r^2} + \frac{1}{r} \frac{\delta T}{\delta r} + \frac{1}{r^2} \frac{\delta^2 T}{\delta \theta^2} + \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} + \frac{q(r,\theta,z)}{K} = \frac{1}{\alpha} \frac{\delta T}{\delta t} \quad \dots\dots\dots \text{Ec. (17)}$$

En ausencia de conducción de calor en la dirección axial, $\frac{\delta T}{\delta z} = 0$ y $\frac{\delta^2 T}{\delta z^2} = 0$. Si, en suma, el flujo de calor es uniforme en la dirección radial, los componentes que contienen Θ serán cero y la Ec. (17) se reduce a:

$$\frac{\delta^2 T}{\delta r^2} + \frac{1}{r} \frac{\delta T}{\delta r} + \frac{q(r)}{K} = \frac{1}{\alpha} \frac{\delta T}{\delta t} \quad \dots\dots\dots \text{Ec. (18)}$$

Finalmente, en ausencia de generación de calor, la ecuación 18 quedara:

$$\frac{\delta^2 T}{\delta r^2} + \frac{1}{r} \frac{\delta T}{\delta r} = \frac{1}{\alpha} \frac{\delta T}{\delta t} \quad \dots\dots\dots \text{Ec. (19)}$$

Anexo 2.

Historias Térmicas

A continuación, se presentan las historias térmicas que se obtuvieron de cada una de las condiciones de las mezclas que se trabajó.

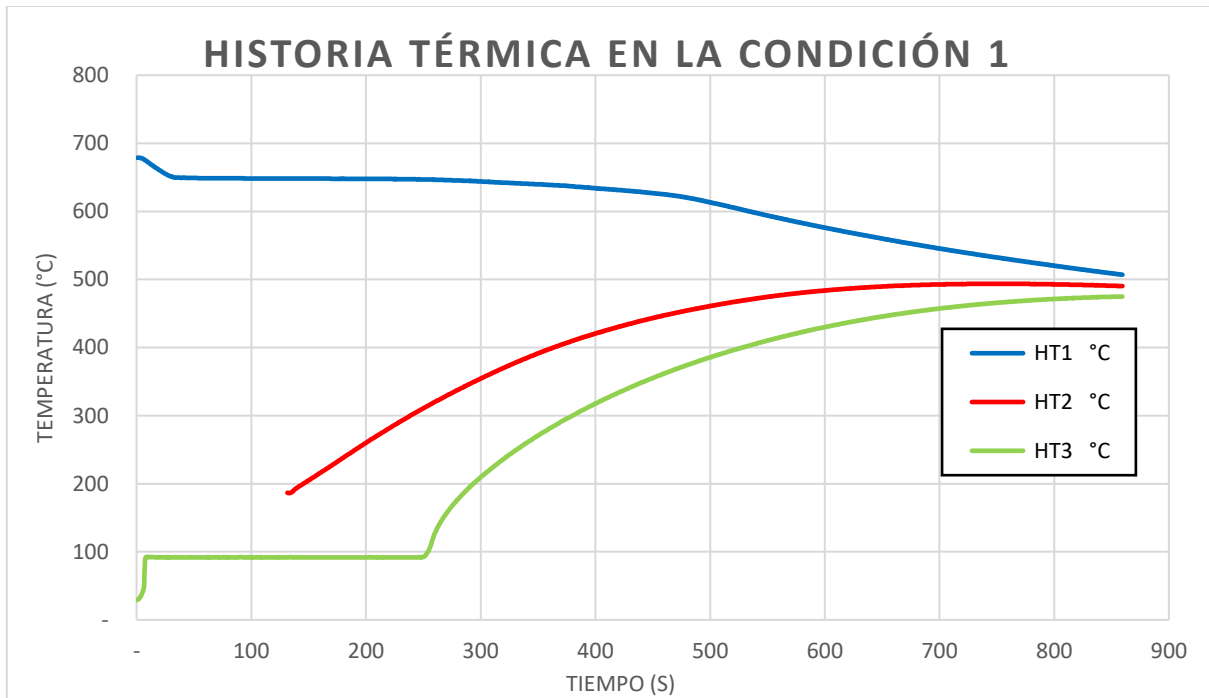


Figura 7.2.1. Historia térmica en moldeo en verde con 4% de bentonita activa, 100% bentonita cálcica y 5% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde.

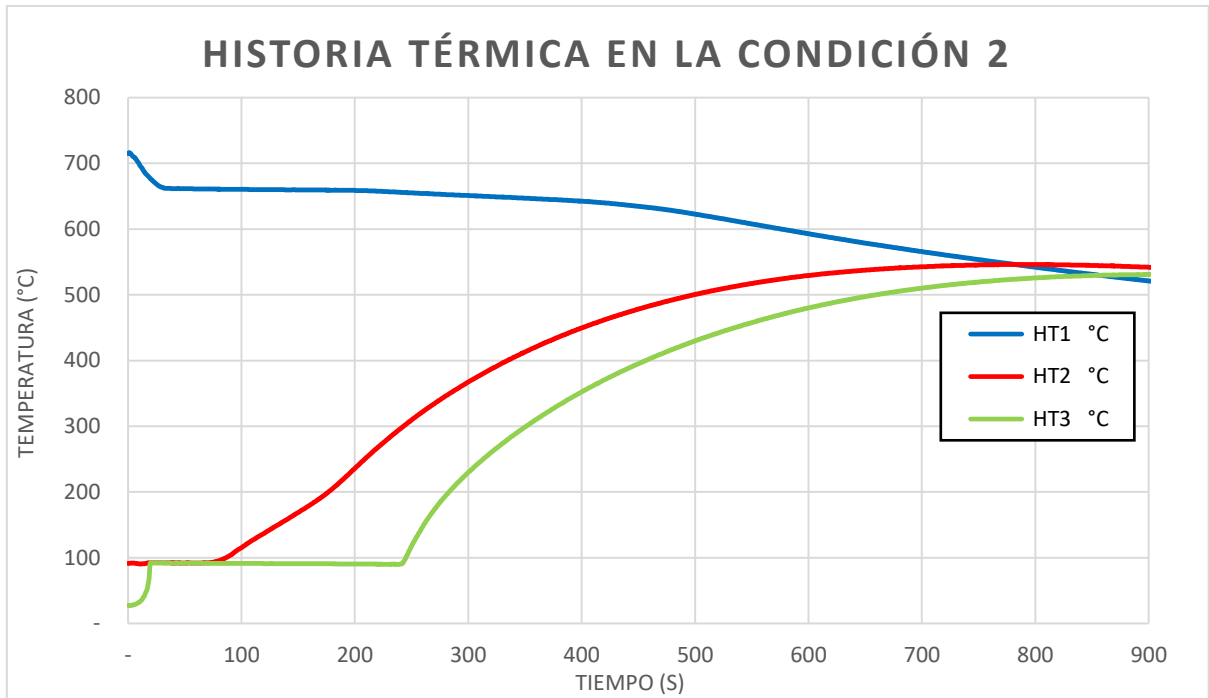


Figura 7.2.2. Historia térmica en moldeo en verde con 4% de bentonita activa, 90% bentonita cálcica, 10% de bentonita sódica y 5% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde.

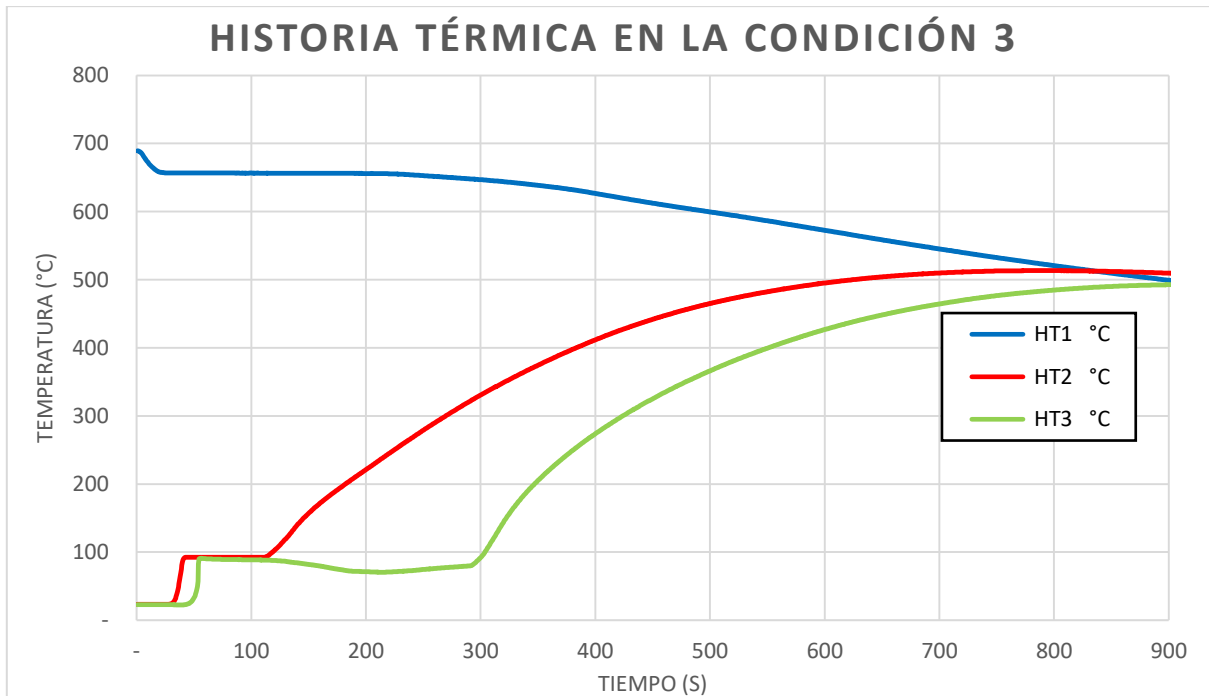


Figura 7.2.3. Historia térmica en moldeo en verde con 4% de bentonita activa, 80% bentonita cálcica, 20% de bentonita sódica y 5% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde.

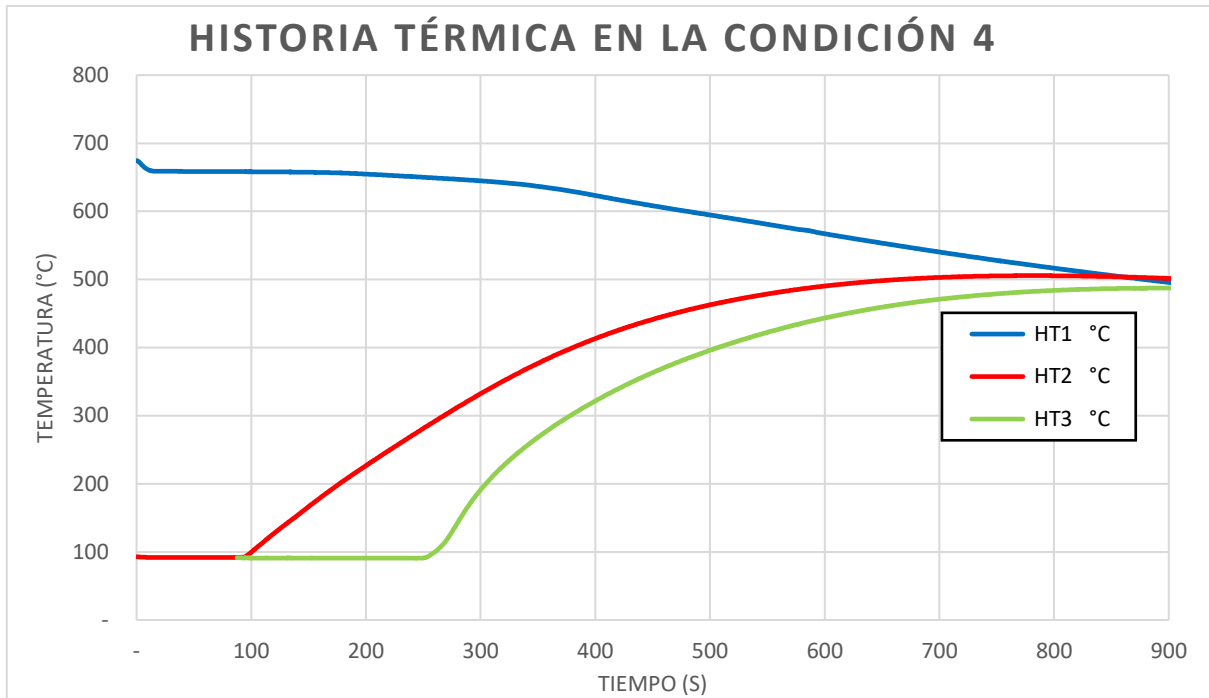


Figura 7.2.4 Historia térmica en moldeo en verde con 4% de bentonita activa, 70% bentonita cálcica, 30% de bentonita sódica y 5% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde.

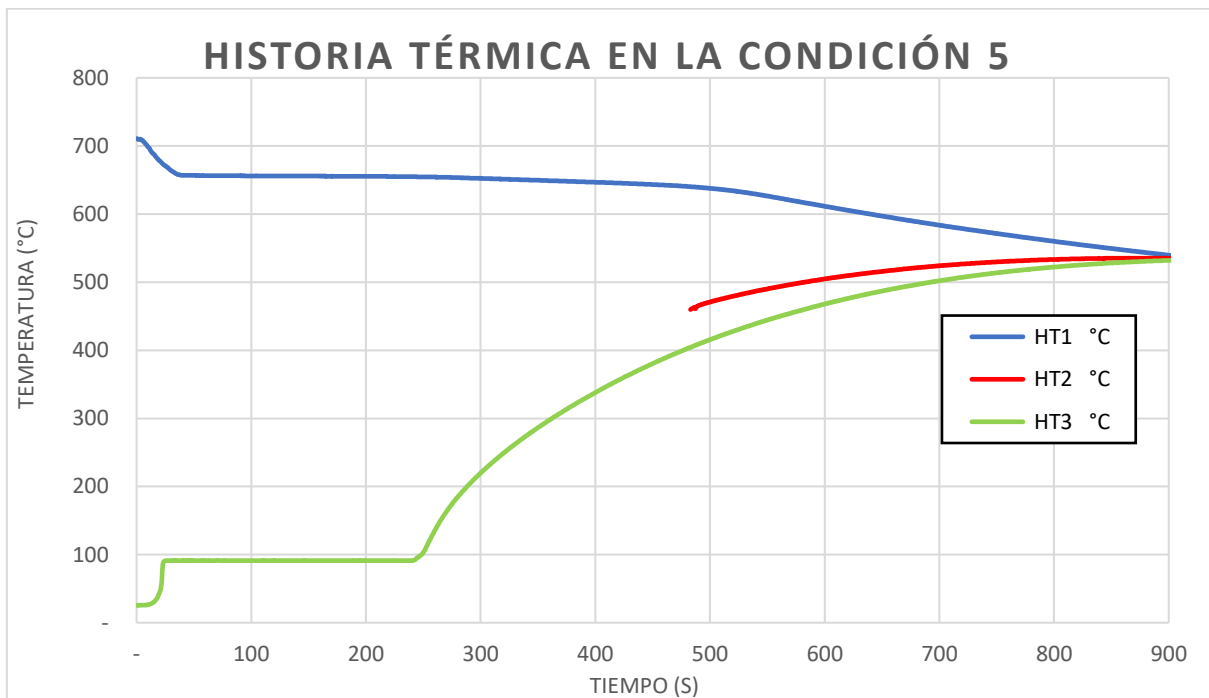


Figura 7.2.5. Historia térmica en moldeo en verde con 4% de bentonita activa, 100% bentonita cálcica y 4% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde.

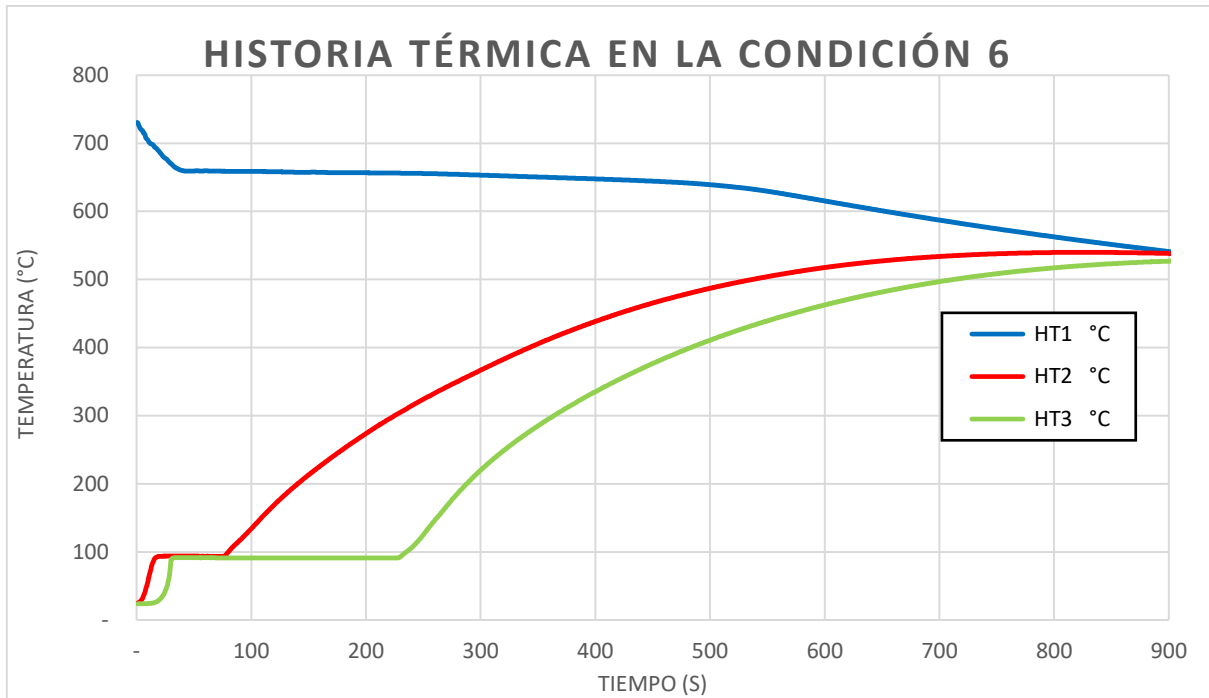


Figura 7.2.6. Historia térmica en moldeo en verde con 4% de bentonita activa, 90% bentonita cálcica, 10% de bentonita sódica y 4% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde.

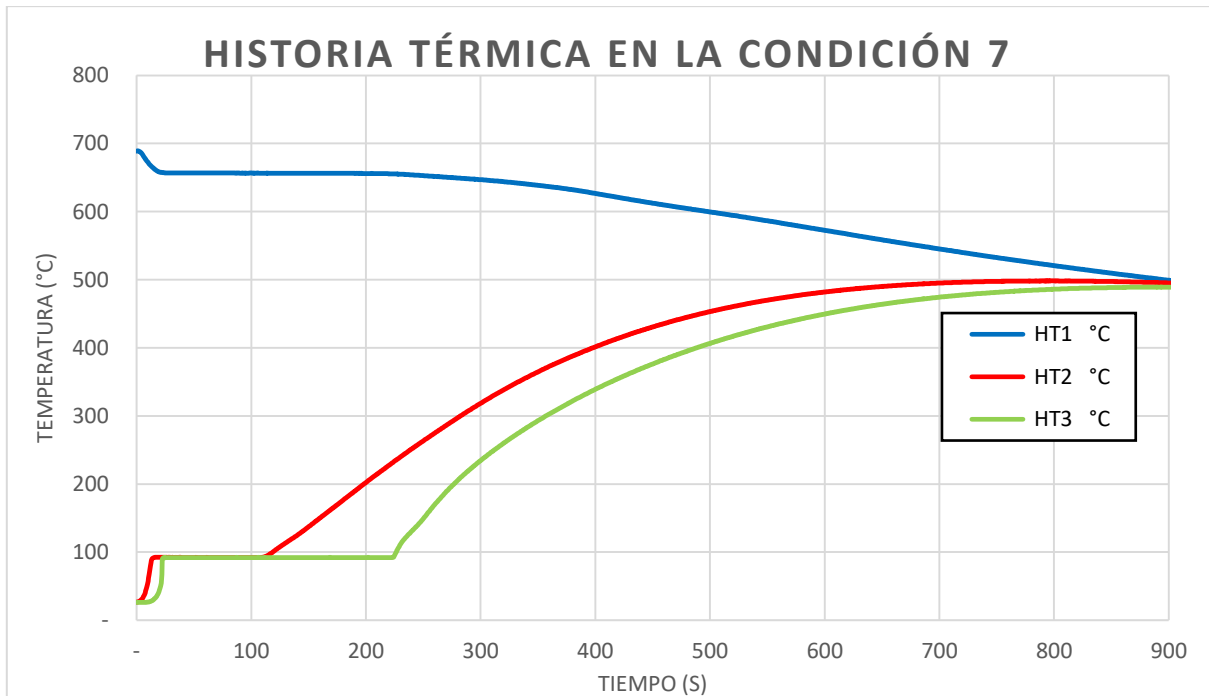


Figura 7.2.7. Historia térmica en moldeo en verde con 4% de bentonita activa, 80% bentonita cálcica, 20% de bentonita sódica y 4% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde.

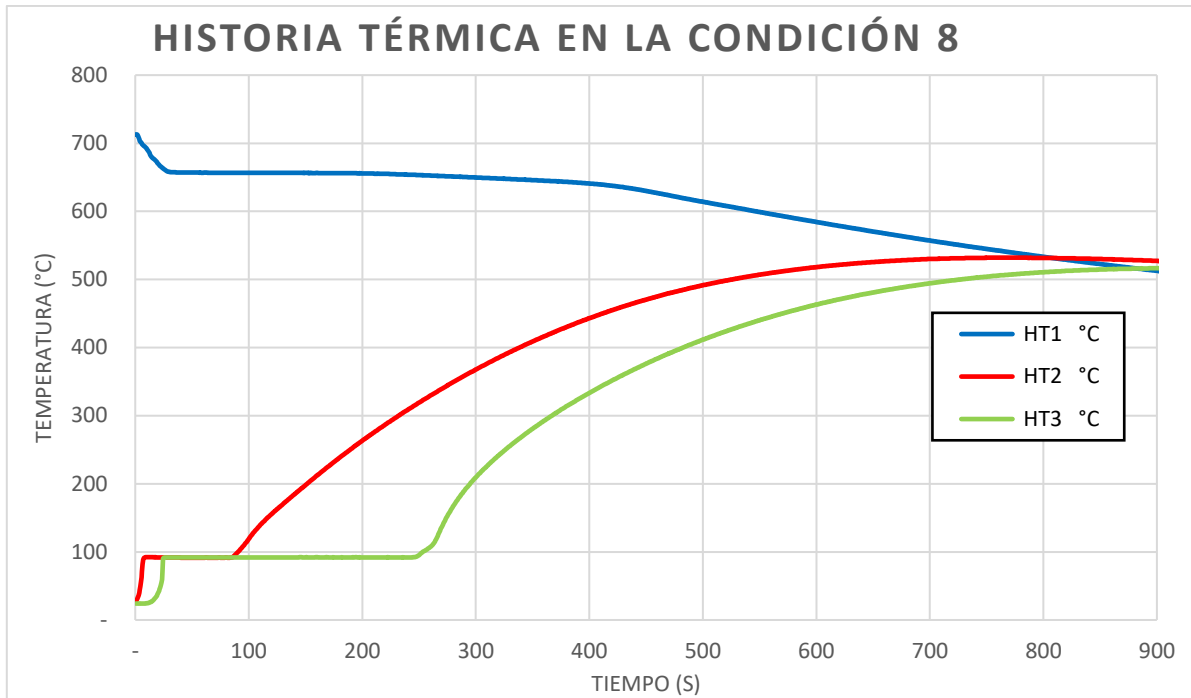


Figura 7.2.8. Historia térmica en moldeo en verde con 4% de bentonita activa, 70% bentonita cálcica, 30% de bentonita sódica y 4% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde.

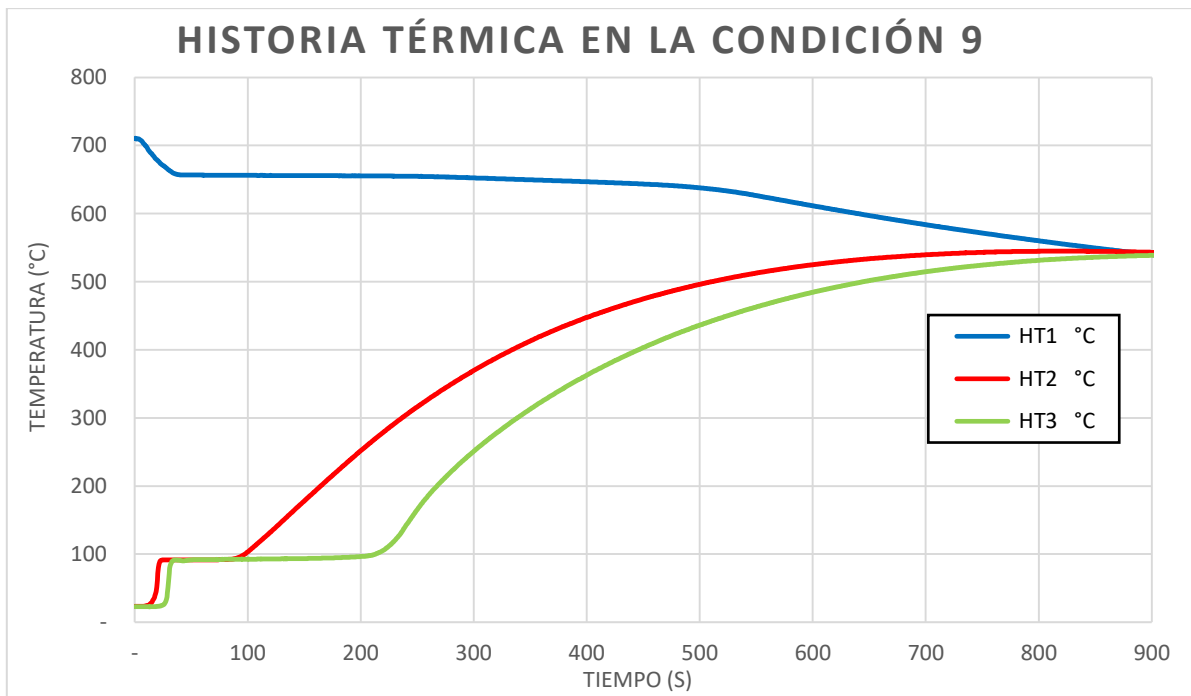


Figura 7.2.9. Historia térmica en moldeo en verde con 4% de bentonita activa, 100% bentonita cálcica y 3% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde.

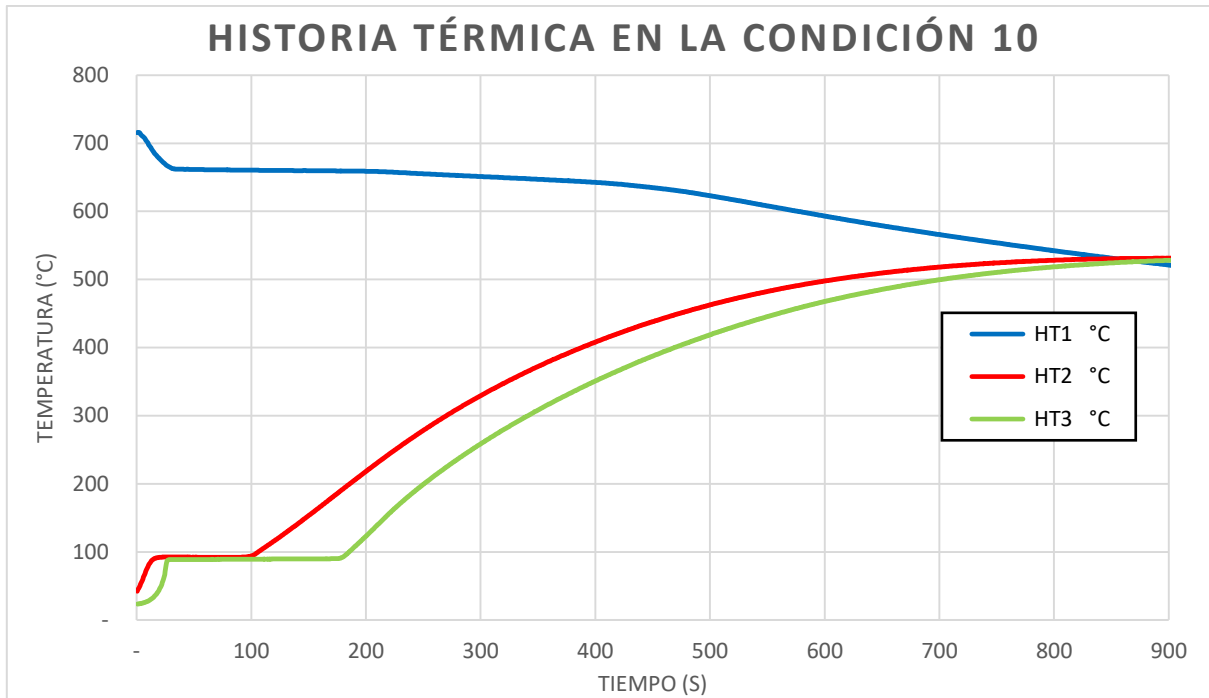


Figura 7.2.10. Historia térmica en moldeo en verde con 4% de bentonita activa, 90% bentonita cálcica, 10% de bentonita sódica y 3% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde.

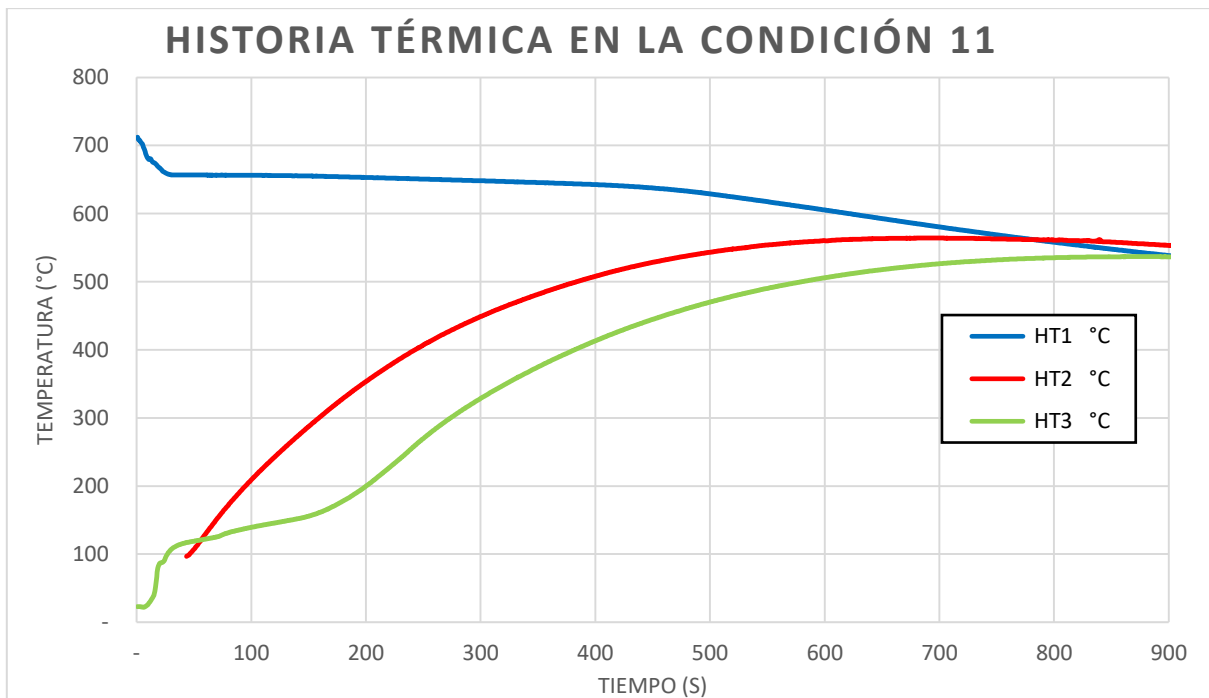


Figura 7.2.11. Historia térmica en moldeo en verde con 4% de bentonita activa, 80% bentonita cálcica, 20% de bentonita sódica y 3% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde.

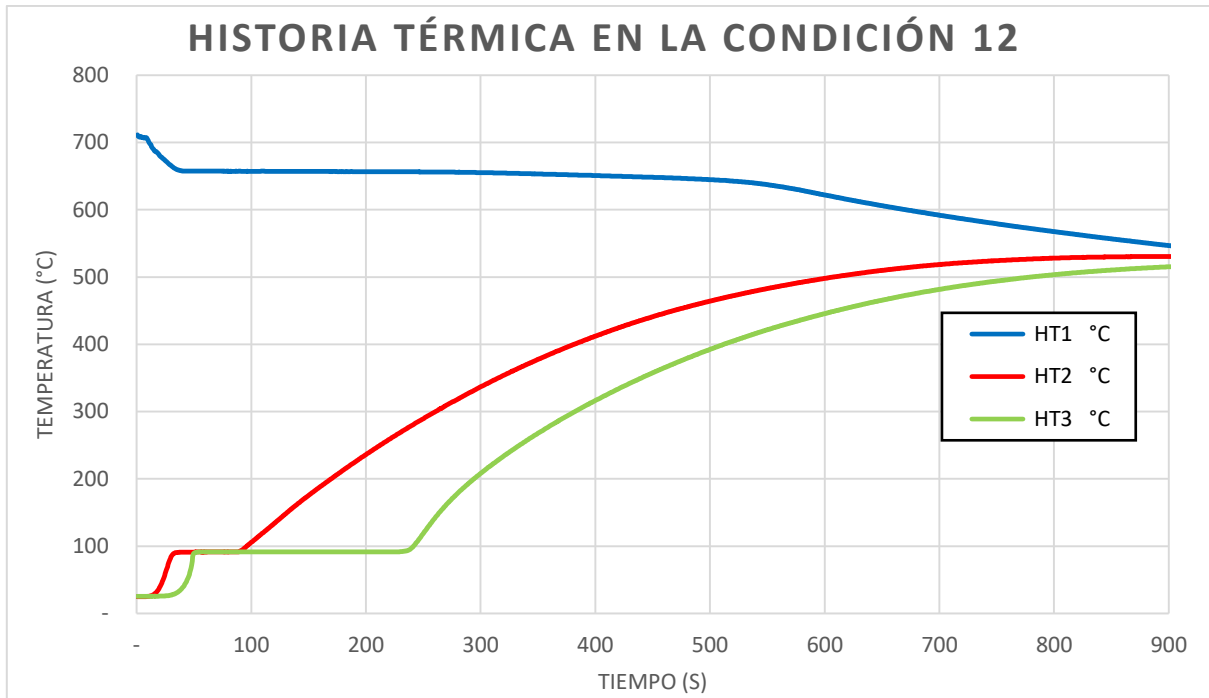


Figura 7.2.12. Historia térmica en moldeo en verde con 4% de bentonita activa, 70% bentonita cálcica, 30% de bentonita sódica y 3% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde.

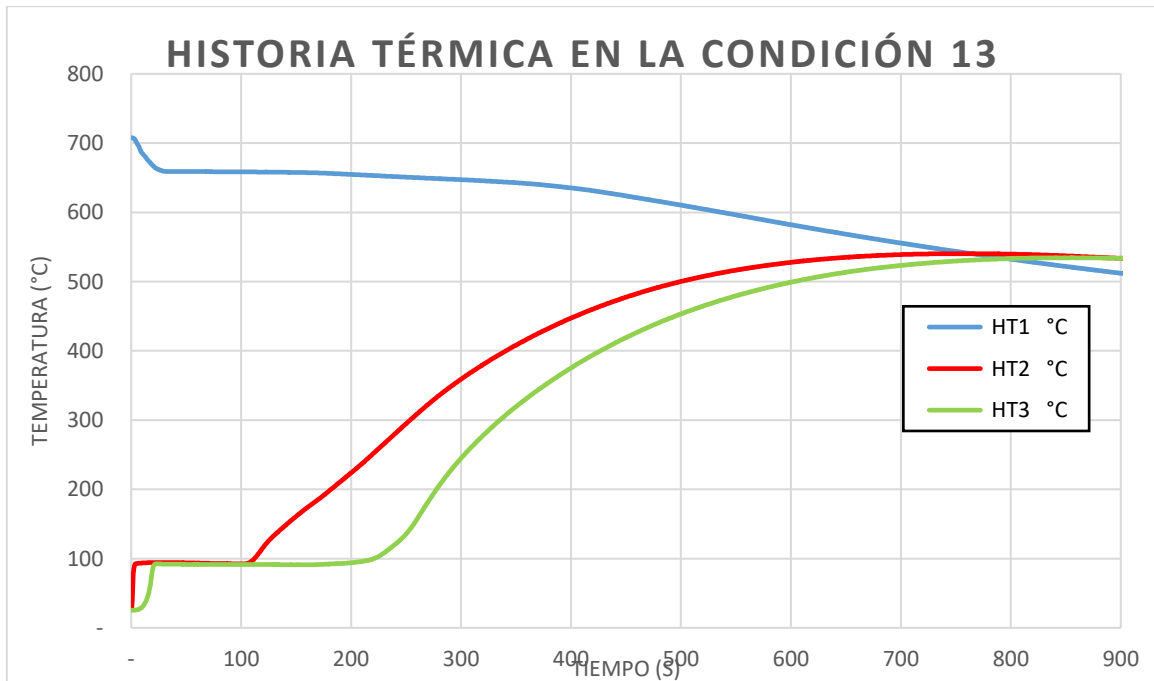


Figura 7.2.13. Historia térmica en moldeo en verde con 5% de bentonita activa, 100% bentonita cálcica y 5% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde.

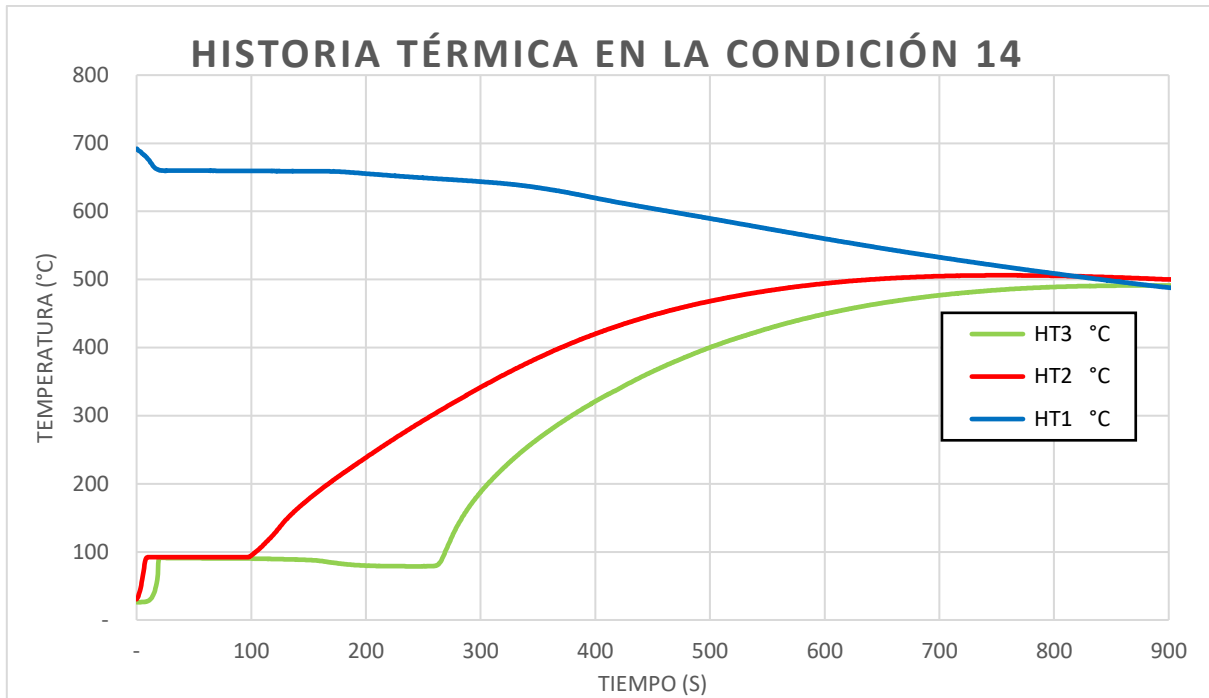


Figura 7.2.14. Historia térmica en moldeo en verde con 5% de bentonita activa, 90% bentonita cálcica, 10% de bentonita sódica y 5% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde.

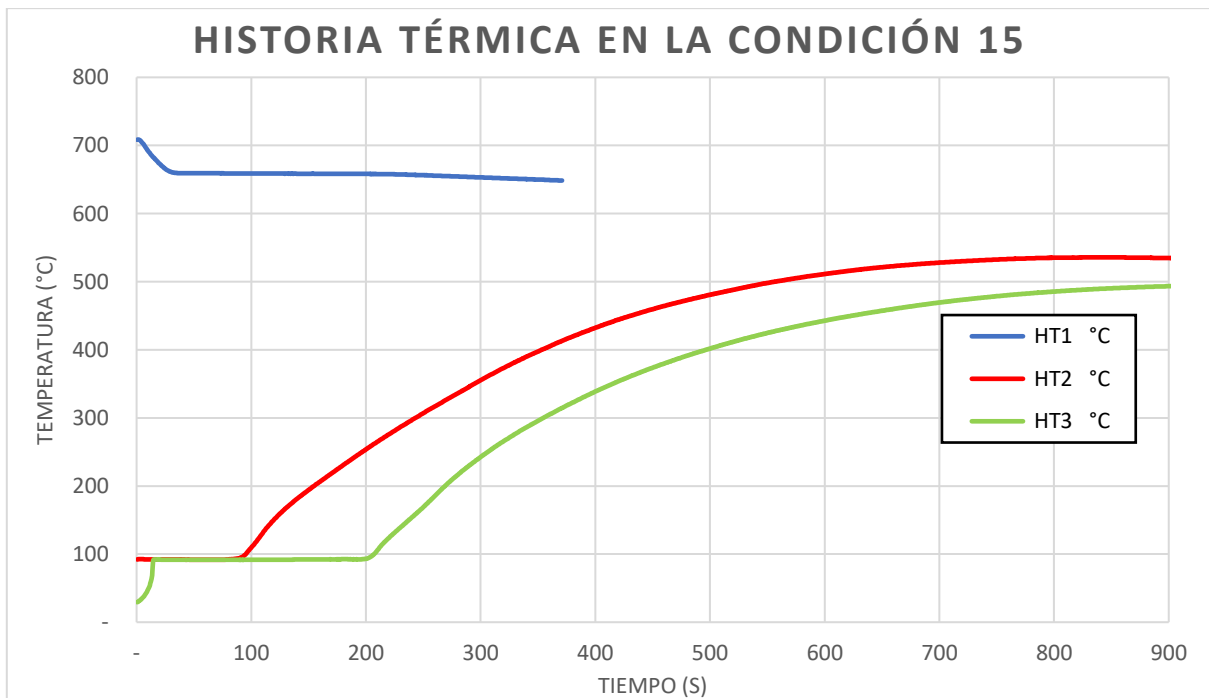


Figura 7.2.15. Historia térmica en moldeo en verde con 5% de bentonita activa, 80% bentonita cálcica, 20% de bentonita sódica y 5% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde.

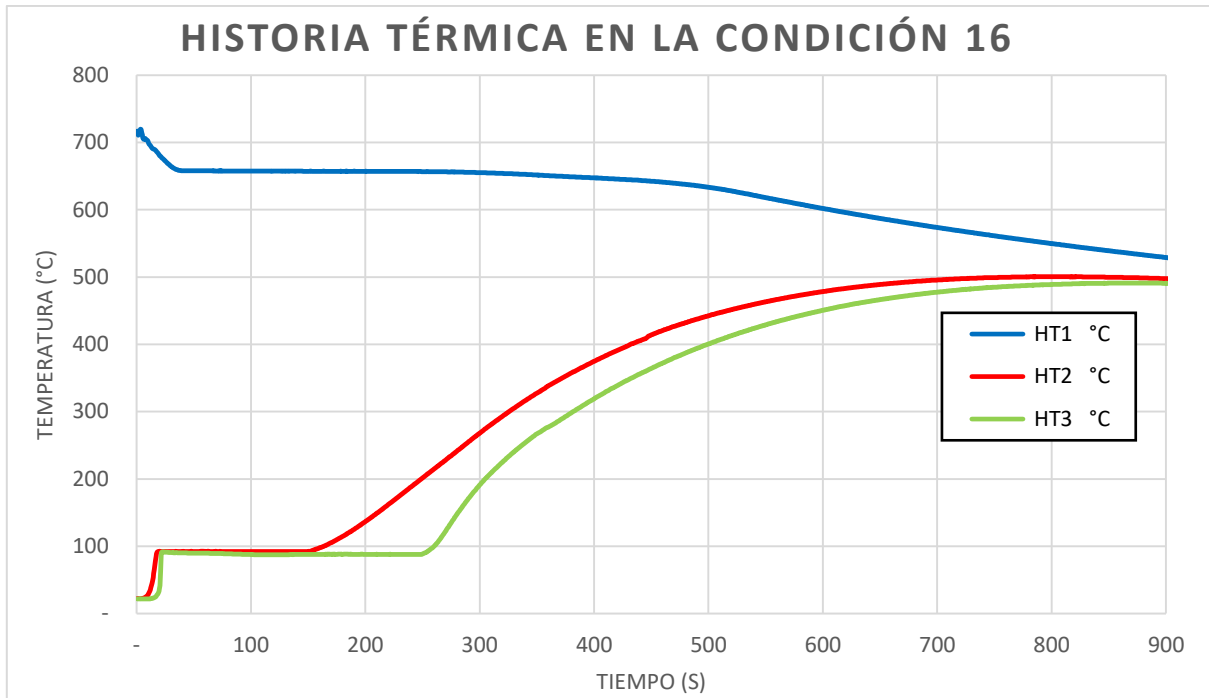


Figura 7.2.16. Historia térmica en moldeo en verde con 5% de bentonita activa, 70% bentonita cálcica, 30% de bentonita sódica y 5% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde.

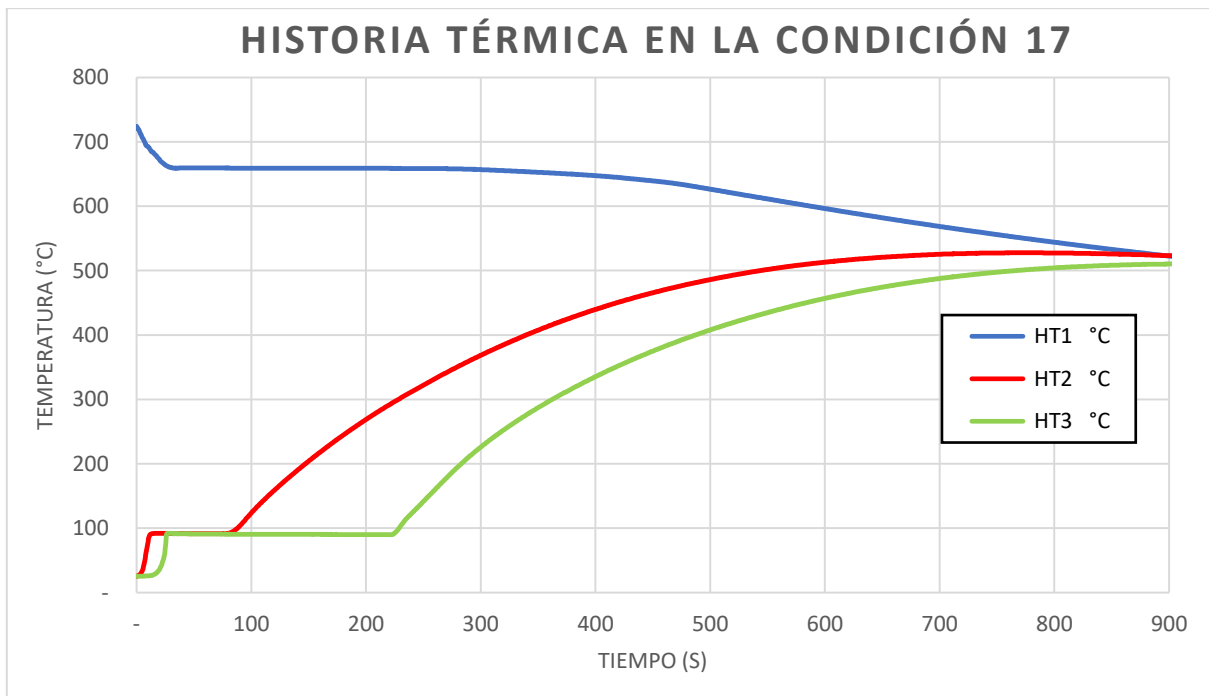


Figura 7.2.17. Historia térmica en moldeo en verde con 5% de bentonita activa, 100% bentonita cálcica y 4% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde.

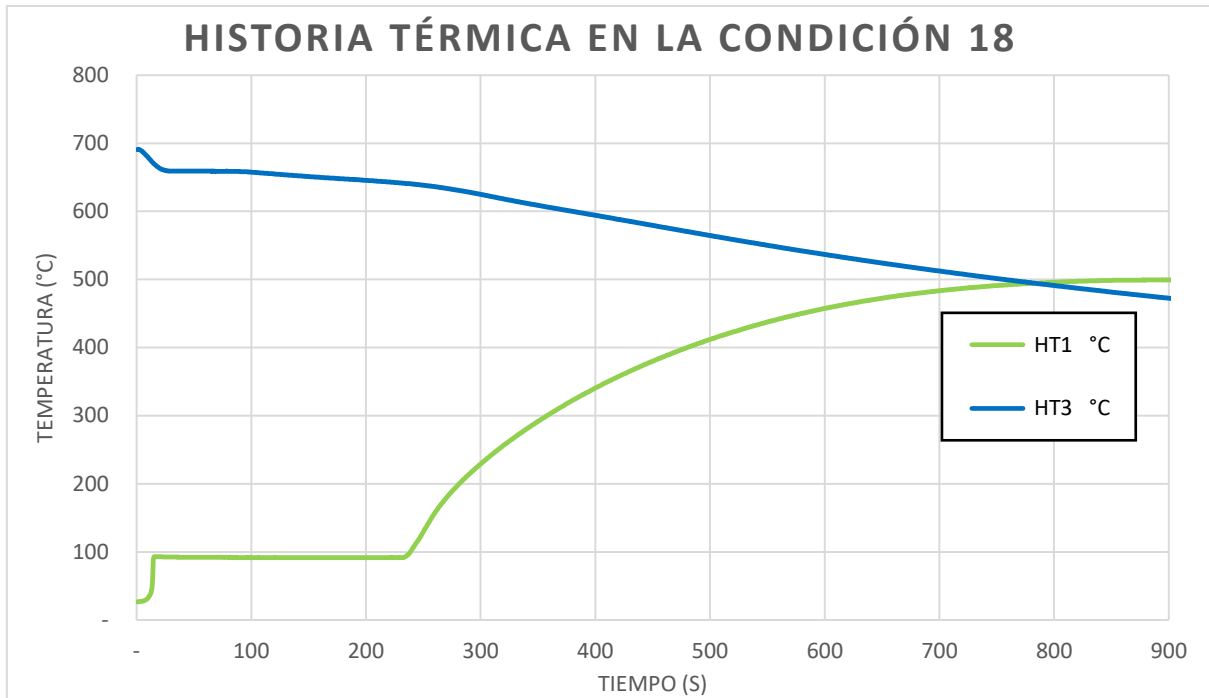


Figura 7.2.18. Historia térmica en moldeo en verde con 5% de bentonita activa, 90% bentonita cálcica, 10% de bentonita sódica y 4% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde.

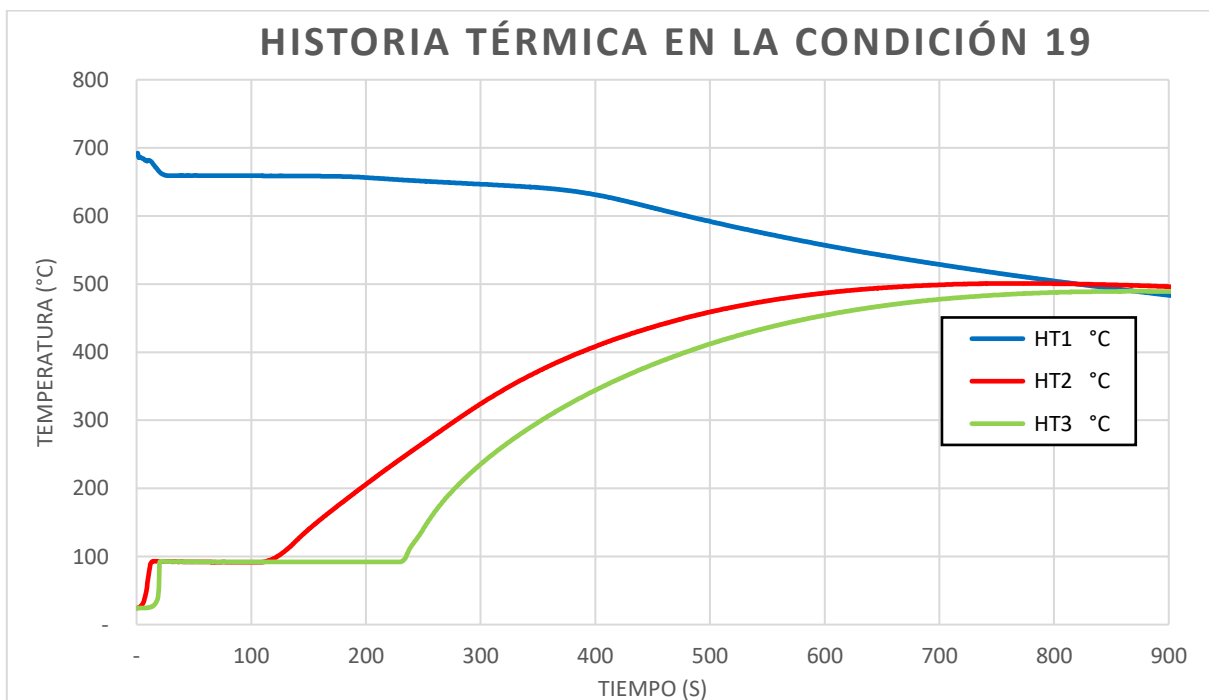


Figura 7.2.19. Historia térmica en moldeo en verde con 5% de bentonita activa, 80% bentonita cálcica, 20% de bentonita sódica y 4% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde.

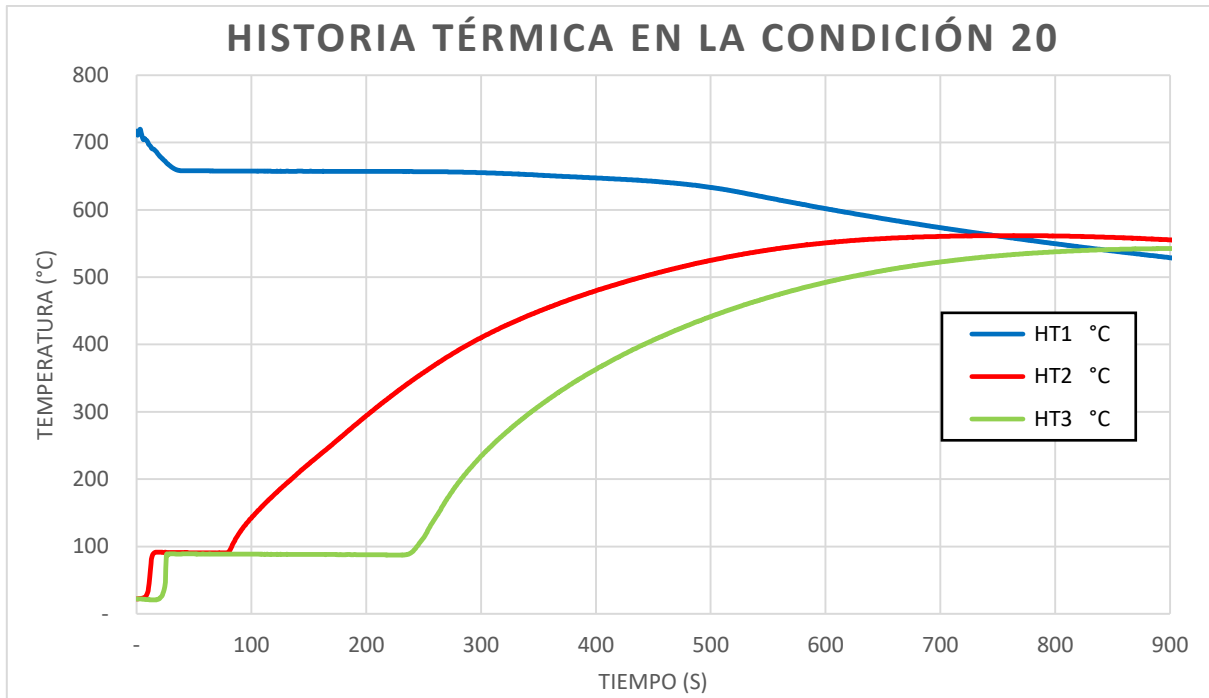


Figura 7.2.20. Historia térmica en moldeo en verde con 5% de bentonita activa, 70% bentonita cálcica, 30% de bentonita sódica y 4% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde.

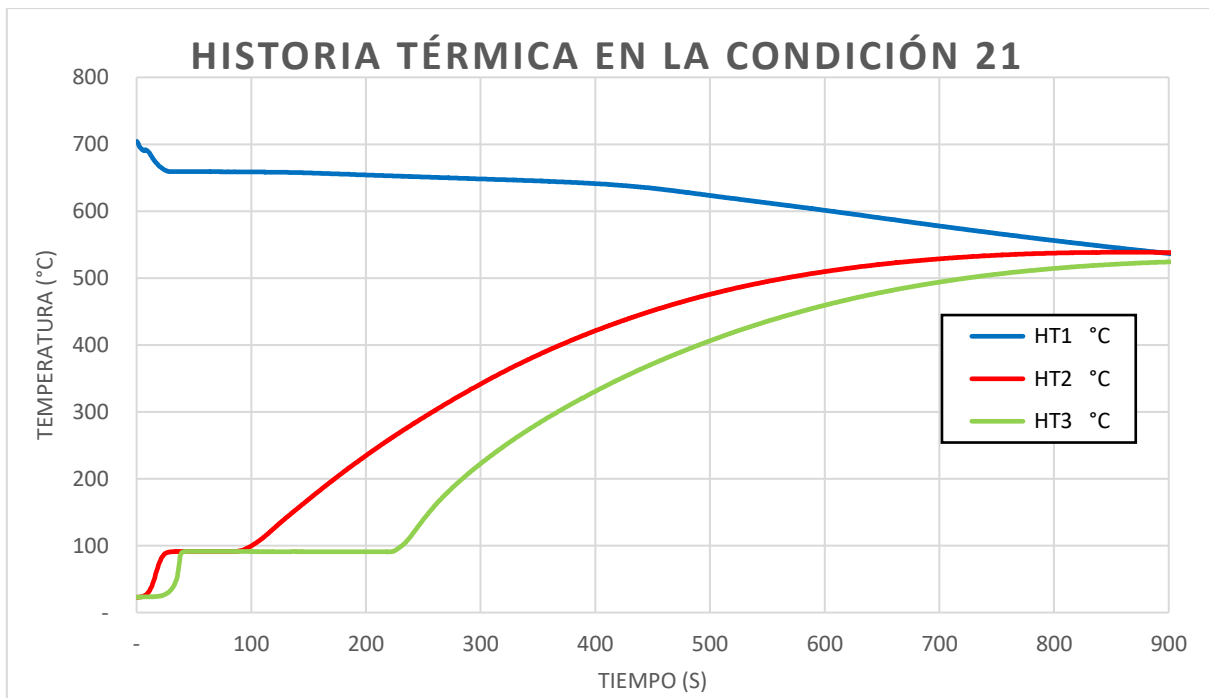


Figura 7.2.21. Historia térmica en moldeo en verde con 5% de bentonita activa, 100% bentonita cálcica y 3% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde.

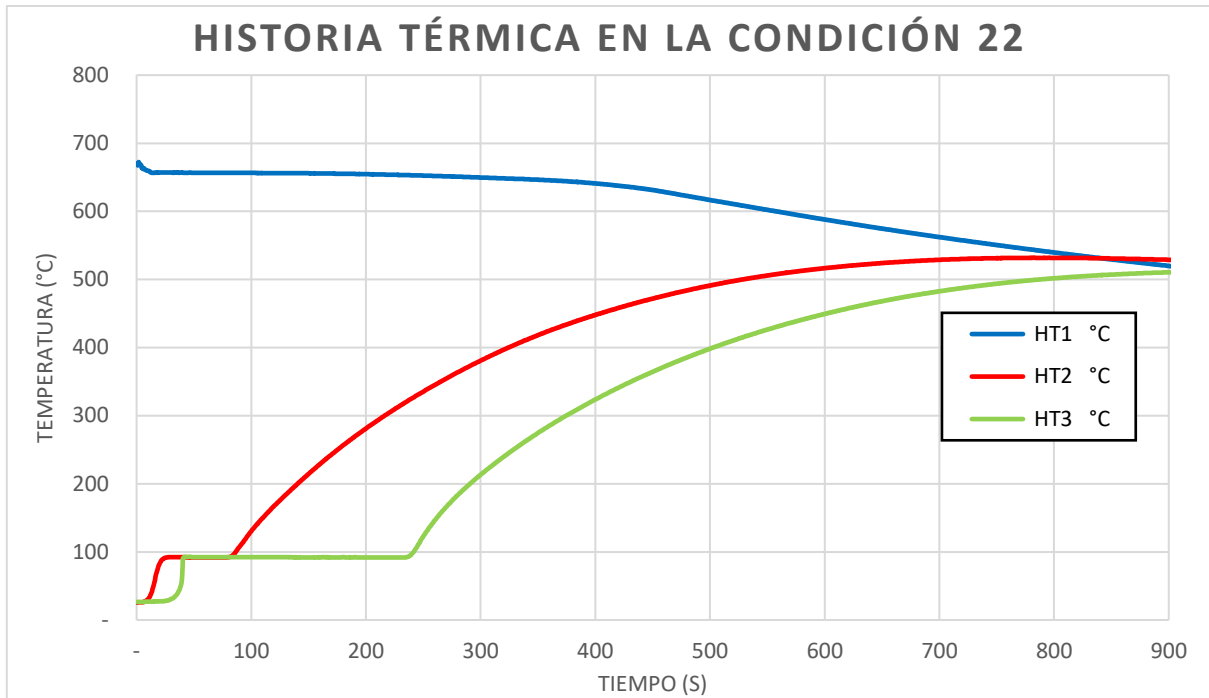


Figura 7.2.22. Historia térmica en moldeo en verde con 5% de bentonita activa, 90% bentonita cálcica, 10% de bentonita sódica y 3% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde.

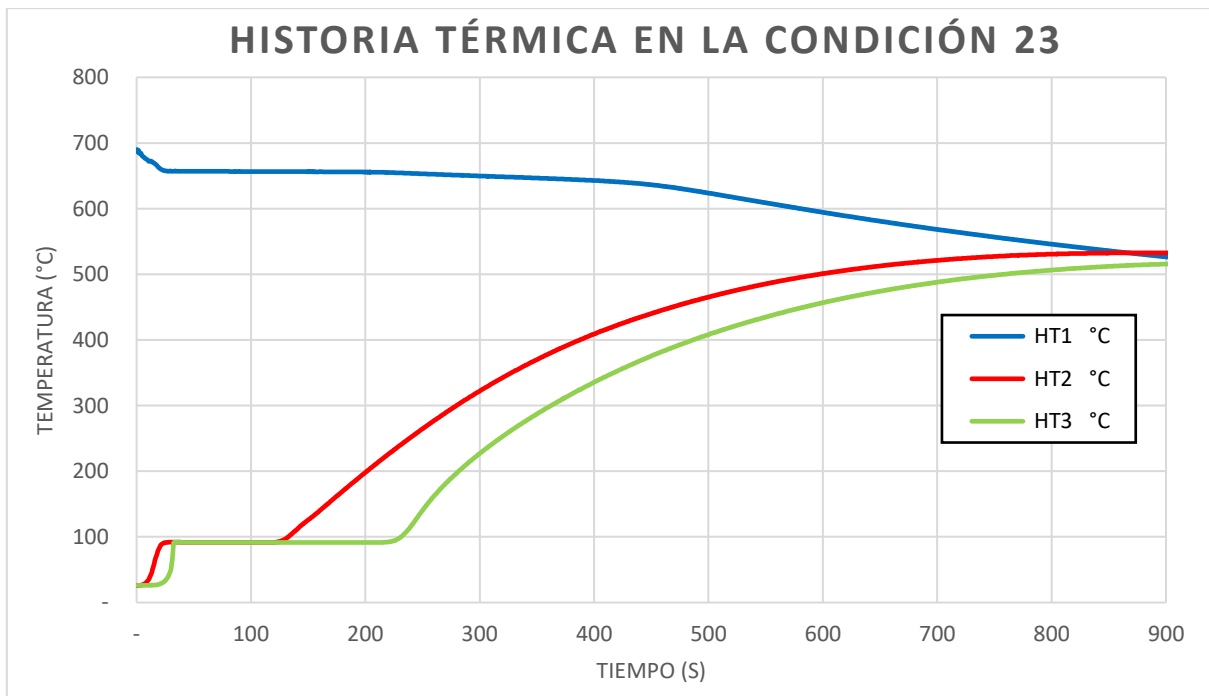


Figura 7.2.23. Historia térmica en moldeo en verde con 5% de bentonita activa, 80% bentonita cálcica, 20% de bentonita sódica y 3% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde.

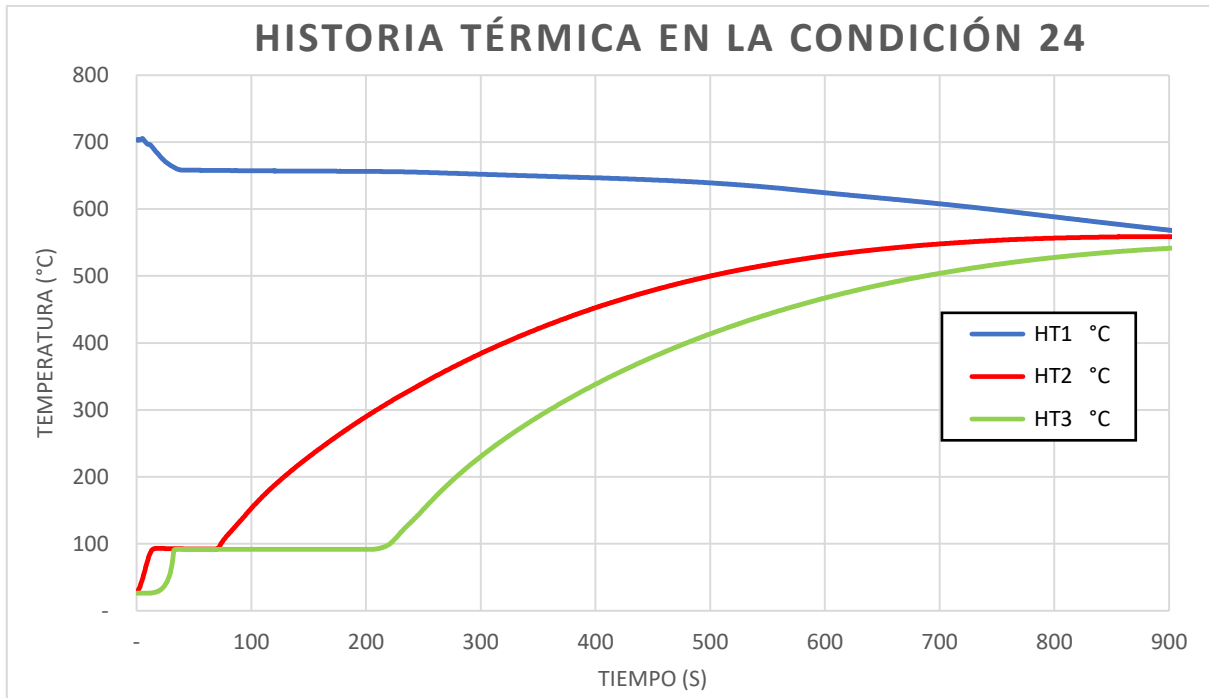


Figura 7.2.24. Historia térmica en moldeo en verde con 5% de bentonita activa, 70% bentonita cálcica, 30% de bentonita sódica y 3% de humedad, donde: HT1 es la historia térmica de la aleación de aluminio, HT2 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 1.25 cm de distancia de la intercara metal-molde y HT3 es la historia térmica de la probeta cilíndrica a 2.5 cm de distancia de la intercara metal-molde.

Anexo 3.

Propiedades Mecánicas

A continuación, se muestran tablas con los datos obtenidos en las pruebas físico-mecánicas que se hicieron a cada mezcla utilizada en el presente trabajo, con el % de bentonita activa, la relación de Bentonita cálcica y Bentonita sódica del total de bentonita, así como sus respectivas humedades.

En las propiedades están Resistencia a la compresión normal en verde (R. Compres.), Resistencia a la Tensión en verde (R. Tensión), Resistencia al corte en verde (R. Corte), Resistencia a la compresión Transversal (R. Comp. Trans) y Dureza

Tabla 7.3.1. Propiedades mecánicas de la mezcla de 4% Bentonita activa, relación 100% Bentonita Cálcica y sus respectivas humedades.

4% Bentonita activa, relación 100% Bentonita Cálcica					
Humedad	R. Compres. (Psi)	R. Tensión (Psi)	R. Corte (Psi)	R. Comp. Trans (Psi)	Dureza (Escala B)
3	3.1	0.8	2.7	2.6	66
	2.8	0.65	2.6	2.7	67
	4.2	0.6			66
Promedio	3.37	0.68	2.65	2.65	66.33
4	1.9	0.6	4.1	5.8	67
		0.5	4.5	5.2	66
			4.05	4.1	65
					65
Promedio	1.90	0.55	4.22	5.03	65.75
5	1.6	0.6	2.3	2.4	61
	1.6	0.3	2.1	2.4	61
					63
Promedio	1.60	0.45	2.20	2.40	61.67

Tabla 7.3.2. Propiedades mecánicas de la mezcla de 4% Bentonita activa, relación 90-10 de Bentonita cálcica y Bentonita sódica y sus respectivas humedades.

4% Bentonita activa, relación 90-10% Bentonita cálcica y bentonita sódica					
Humedad	R. Compres. (Psi)	R. Tensión (Psi)	R. Corte (Psi)	R. Comp. Trans (Psi)	Dureza (Escala B)
3	2.3	0.4	2.9	2.8	60
	2.5	0.5	2.9	2.8	65
			3.25		65
Promedio	2.40	0.45	3.02	2.80	63.33
4	2.2	0.4	4.1	4.7	59
	2.2	0.4	4	5.1	59
			4.5		59
			3.6		59
Promedio	2.20	0.40	4.05	4.90	59.00
5	1.6	0.5	2.3	2.4	60
	1.4	0.6	2.35	2.4	59
			2.6	2.4	59
					59
Promedio	1.50	0.55	2.42	2.40	59.25

Tabla 7.3.3. Propiedades mecánicas de la mezcla de 4% Bentonita activa, relación 80-20 de Bentonita cálcica y Bentonita sódica y sus respectivas humedades.

4% Bentonita activa, relación 80-20% Bentonita cálcica y bentonita sódica					
Humedad	R. Compres. (Psi)	R. Tensión (Psi)	R. Corte (Psi)	R. Comp. Trans (Psi)	Dureza (Escala B)
3	2.8	0.55	2.75	2.8	67
	2.8	0.65	3	2.9	67
					67
Promedio	2.80	0.60	2.88	2.85	67.00
4	2.2	0.3	5.4	6.9	63
	2.1	0.3	5.4	6.9	62
					62
					64
Promedio	2.15	0.30	5.40	6.90	62.75
5	1.8	0.5	1.8	2.45	59
	1.9	0.4	1.8	2.3	61
					60
					60
Promedio	1.85	0.45	1.80	2.38	60.00

Tabla 7.3.4. Propiedades mecánicas de la mezcla de 4% Bentonita activa, relación 70-30 de Bentonita cálcica y Bentonita sódica y sus respectivas humedades.

4% Bentonita activa, relación 70-30% Bentonita cálcica y bentonita sódica					
Humedad	R. Compres. (Psi)	R. Tensión (Psi)	R. Corte (Psi)	R. Comp. Trans (Psi)	Dureza (Escala B)
3	3	0.5	4.3	2.3	75
	3.5	0.7	4	3	74
					75
Promedio	3.25	0.60	4.15	2.65	74.67
4	1.8	0.45	3.6	2.9	57
	1.8	0.3	3.7	2.9	57
		0.3			58
					60
Promedio	1.80	0.35	3.65	2.90	58.00
5	1.2	0.2	4.1	4.7	54
	1.2	0.3	4.1	4.65	54
					55
					55
Promedio	1.20	0.25	4.10	4.68	54.50

Tabla 7.3.5. Propiedades mecánicas de la mezcla de 5% Bentonita activa, relación 100% Bentonita Cálcica y sus respectivas humedades.

5% Bentonita activa, relación 100% Bentonita Cálcica					
Humedad	R. Compres. (Psi)	R. Tensión (Psi)	R. Corte (Psi)	R. Comp. Trans (Psi)	Dureza (Escala B)
3	4.8	0.9	5.5	6.9	72
	5	0.9	5.5	6.9	71
				6.9	72
					72
Promedio	4.90	0.90	5.50	6.90	71.75
4	2.4	0.7	4.55	4.65	65
	2.4	0.45	4.5	4.7	67
	2.4	0.5			67
					67
Promedio	2.40	0.55	4.53	4.68	66.50
5	2.2	0.45	6.3	7.5	67
	2.2	0.4	6.3	7.5	66
					66

					66
Promedio	2.20	0.43	6.30	7.50	66.25

Tabla 7.3.6. Propiedades mecánicas de la mezcla de 5% Bentonita activa, relación 90-10 de Bentonita cálcica y Bentonita sódica y sus respectivas humedades.

5% Bentonita activa, relación 90-10% Bentonita cálcica y bentonita sódica					
Humedad	R. Compres. (Psi)	R. Tensión (Psi)	R. Corte (Psi)	R. Comp. Trans (Psi)	Dureza (Escala B)
3	3.8	0.7	5.9	5.9	72
	4	0.8	5.8	7.5	74
			6.3	6.9	75
				7.5	75
Promedio	3.90	0.75	6.00	6.95	74.00
4	3.2	0.7	6.3	6.9	71
	3.2	0.65	6.3	6.9	71
					73
Promedio	3.20	0.68	6.30	6.90	71.67
5	2.7	0.6	4.6	5.8	64
	2.6	0.5	4.6	5	65
					66
Promedio	2.65	0.55	4.60	5.40	65.00

Tabla 7.3.7. Propiedades mecánicas de la mezcla de 5% Bentonita activa, relación 80-20 de Bentonita cálcica y Bentonita sódica y sus respectivas humedades.

5% Bentonita activa, relación 90-10% Bentonita cálcica y bentonita sódica					
Humedad	R. Compres. (Psi)	R. Tensión (Psi)	R. Corte (Psi)	R. Comp. Trans (Psi)	Dureza (Escala B)
3	4.3	0.4	6.9	4.5	
	4.3	0.2	7.5	4.5	
		0.8	7		
		0.2			
Promedio	4.30	0.40	7.13	4.50	-
4	2.2	0.5	4.5	3.4	65
	2.8	0.5	4.1	3.4	65
	2.8		4.1		65
Promedio	2.60	0.50	4.23	3.40	65.00
5	3.2	0.5	6.3	7.5	67
	3	0.5	6.3	7.5	66
					66
					66

Promedio	3.10	0.50	6.30	7.50	66.25
-----------------	-------------	-------------	-------------	-------------	--------------

Tabla 7.3.8. Propiedades mecánicas de la mezcla de 5% Bentonita activa, relación 70-30 de Bentonita cálcica y Bentonita sódica y sus respectivas humedades.

5% Bentonita activa, relación 90-10% Bentonita cálcica y bentonita sódica					
Humedad	R. Compres. (Psi)	R. Tensión (Psi)	R. Corte (Psi)	R. Comp. Trans (Psi)	Dureza (Escala B)
3	4.4	0.4	8	11.2	74
	4.4	0.3	8	11.1	74
					73
					72
Promedio	4.40	0.35	8.00	11.15	73.25
4	2.2	0.2	7.1	4.6	62
	2.2	0.6	6.3	4.5	63
		0.2	7	4.6	63
					63
Promedio	2.20	0.33	6.80	4.57	62.75
5	2.7	0.6	7.9	5.2	67
	2.8	0.7	8	5.8	67
					67
Promedio	2.75	0.65	7.95	5.50	67.00