



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN INGENIERIA

FACULTAD DE QUIMICA

METODOLOGIA DE CÁLCULO DEL GASTO
VOLUMÉTRICO PARA EL DISEÑO DE SISTEMAS DE
COLADA PARA COMPOSITOS COLADOS Al-7Si-SiCp.

T E S I S

QUE PARA OPTAR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERIA

INGENIERIA QUIMICA - METALURGIA

P R E S E N T A:

RUIZ TAMAYO AGUSTÍN GERARDO

TUTOR:

JOSÉ ALEJANDRO GARCÍA HINOJOSA



2007



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: Dr. MARCO AURELIO RAMÍREZ ARGAEZ

Vocal: Dr. CARLOS GONZÁLEZ RIVERA.

Secretario: Dr. BERNARDO FABIAN CAMPILLO ILLANES.

1^{er}. Suplente: Dr. OSVALDO CEDILLO FLORES.

2^{do}. Suplente: Dr. JOSÉ ALEJANDRO GARCÍA HINOJOSA.

Edificio “D”, Facultad de Química, UNAM.

Ciudad Universitaria.

TUTOR DE TESIS:
Dr. JOSÉ ALEJANDRO GARCÍA HINOJOSA

DEDICATORIAS.

A DIOS:

Por darme salud y estar siempre conmigo, por guiarme por el buen camino y por demostrarme tú amor infinito.

A MI ESPOSA:

Por su amor que me ha demostrado y su apoyo incondicional ante situaciones difíciles, gracias por todo lo que me has dado, sabes que te amo y siempre trataré que siga existiendo ese amor entre nosotros.

A MI HIJA:

Eres mi luz y una gran bendición de DIOS, te amo mucho y este logro te lo dedico por que eres un impulso y eres mi fuerza para seguir creciendo.

A MIS PADRINOS.

Dr. J. Rafael Elizarrarás García y su esposa María Elena Herrera Romero por todo el apoyo incondicional que me han brindado al igual que a todo mi familia, gracias por su confianza y que Dios siempre los guarde con mucha salud, los quiero mucho, y gracias por todo.

A MIS PADRES:

José Luís Ruiz Rodríguez y Maria Tamayo Romo, le agradezco a Dios por darme a los padres que tengo. Gracias por todas sus enseñanzas, por todo su amor y cariño, por estar al pendiente. Los amo y que DIOS les mande mucha salud y ganas de seguir adelante.

A MIS HERMANOS:

Juan Luis, María Magdalena, Martha Patricia y José, gracias por todo su apoyo, por creer en mí, por ser mis hermanos, y espero que cada uno de ustedes se siga superando día con día, nunca es tarde para hacerlo, Dios los bendiga a ustedes y a cada miembro de su familia. Los amo mucho.

A MI ABUELITA:

Gracias mamá Trini por todas tus oraciones que haces día con día a cada uno de nosotros, aunque tengo mucho tiempo de no verte sabes que siempre te llevo en mi corazón. DIOS te guarde por mucho tiempo más, gracias y te amo mucho.

A MIS CUÑADOS:

Rafael y Alfonso gracias por su confianza y apoyo, les deseo lo mejor a ambos en todos los aspectos y espero que se sigan superando. Los aprecio y quiero mucho.

Dr. José Alejandro García Hinojosa.

Por su confianza, apoyo y paciencia para guiarme en este trabajo, gracias por su amistad y por compartir sus experiencias en el ámbito académico.

IQM. Candido Eusebio Atlatenco Tlapanco.

Gracias por compartir sus conocimientos, comentarios y por el tiempo que me dedico en asesorias para lograr desarrollar el presente trabajo. Gracias por su amistad.

IQM. Ignacio Beltrán Piña.

Por su aporte en el desarrollo de este trabajo, su ayuda fue fundamental al igual que sus comentarios. Gracias por todo.

Al Dr. Carlos González, M en I Adrián Manuel Amaro Villena, Dr. Marco Aurelio Ramirez, gracias por sus comentarios y opiniones que ayudaron para realizar un mejor trabajo de tesis.

A Luis Villaverde Torres y Gabriel Resendiz, por su ayuda durante la parte experimental de este trabajo, gracias por compartir su amistad conmigo, les deseo lo mejor de lo mejor y gracias por ser mis amigos.

AGRADECIMIENTOS

A CONACYT:

Por el apoyo otorgado durante la realización de la maestría.

A DGAPA-PAPIIT:

Por el apoyo brindado al trabajo de tesis por medio de los proyectos IN 105804, IN 100206-

3.

ÍNDICE.

Índice de figuras.	IV
Índice de tablas.	X
Resumen.	XII
Objetivos.	XIV
Hipótesis.	XV
Capitulo I: Introducción.	1
Capitulo II: Antecedentes.	4
2.1. Aleaciones de aluminio para fundición.	4
2.1.1. Introducción.	4
2.1.2. Aleaciones Al-Si.	5
2.2. Clasificación de los compositos.	5
2.3. Compositos de matriz metálica.	7
2.3.1. Reforzantes: clasificación y morfología en compositos de matriz metálica (MMC's por sus siglas en inglés).	8
2.4. Procesos de manufactura de compositos por ruta líquida (fundición por agitación o proceso del vórtice).	9
2.5. Proceso de fundición en moldes de arena en verde.	11
2.5.1. Control de las propiedades de la mezcla de moldeo en verde.	12
2.5.2. Arenas.	12
2.5.3. Arcillas.	13
2.5.4. Cantidad de arcilla y agua.	13
2.6. Diseño del sistema de colada.	13
2.6.1. Sistemas de colada para aleaciones monolíticas de aluminio	13
2.6.2. Sistemas de colada para compositos Al-SiCp.	17
2.6.3. Técnica de fusión para compositos.	21



Capítulo III: Fundamentos teóricos.	
3.1. Flujo de fluidos en metales líquidos.	23
3.1.1. Aplicación del número de Reynolds en los sistemas de colada.	23
3.2. Aplicación de balance de energía en flujo de fluidos.	24
3.2.1. Teorema de Bernoulli.	24
3.2.2. Ecuación de continuidad.	25
3.3. Sensitividad de los metales.	26
3.4. Fluidez de los metales.	27
3.5. Sistema de colada y sus componentes.	28
3.5.1. Sistemas presurizados y no presurizados.	30
3.6. Factores que afectan al tiempo de llenado.	31
3.7. Diseño y cálculo del sistema de colada.	32
3.7.1. Método I.	33
3.7.2. Método II.	34
3.7.3. Método III.	35
3.7.4. Método IV.	36
3.7.5. Cálculo del sistema de colada por el método de la AFS (American Foundrymen's Society).	37
Capítulo IV: Desarrollo experimental.	
4.1. Materiales y equipo.	43
4.2. Fabricación y caracterización de lingotes de composites A356/10 y A356/15 % en volumen de SiCp por el método vórtice.	44
4.3. Diseño de experimentos.	45
4.4. Cálculo, diseño y elaboración del sistema de colada.	46
4.4.1. Cálculo de las dimensiones del sistema de colada (Método AFS).	47
4.4.2. Modelo de la pieza de fundición.	48
4.5. Control de la mezcla de moldeo en verde y elaboración de los moldes.	49
4.6. Instrumentación del molde para la adquisición de datos.	49



ÍNDICE

4.7.	Refusión de los MMC's (técnica de fusión) y colada.	50
4.8.	Adquisición de datos.	51
4.9.	Presentación e interpretación de datos adquiridos.	52
Capítulo V: Resultados y discusión.		
5.1.	Resultados de los tiempos de llenado del sistema de colada, tiempo de llenado total y tiempo de llenado de la pieza.	55
5.1.1.	Tiempos de llenado del sistema de colada.	56
5.1.2.	Tiempos de llenado total (sistema de colada y pieza).	66
5.1.3.	Tiempos de llenado de la pieza.	75
5.2.	Cálculo, análisis y discusión de: velocidad del flujo metálico, número de Reynolds, gasto volumétrico promedio dentro del sistema de colada y del tiempo de llenado de la pieza.	85
5.2.1.	Velocidades experimentales promedio, generadas dentro del sistema de colada.	86
5.2.2.	Número de Reynolds promedio experimentales dentro del sistema de colada.	90
5.2.3.	Gasto volumétrico experimental promedio dentro del sistema de colada.	95
5.2.4.	Tiempo de llenado experimental de la pieza.	97
5.3.	Efecto de la relación de colada sobre la distribución de partículas.	102
Capítulo VI: Conclusiones.		106
Recomendaciones.		108
Bibliografía		109



ÍNDICE DE FIGURAS.

2.1.	Compositos con diferentes morfologías del reforzante.	7
2.2.	Representación esquemática de las rutas de fabricación de los MMC's.	9
2.3	Sección transversal del sistema de colada y la pieza.	15
2.4.	Llenado de la pieza empleando dimensiones en la entrada de: (a) 3 X 1 y (b) 5 X 1.	16
2.5.	Representación del flujo del metal líquido: (A) frente del metal líquido y (B) salida del metal líquido en la entrada.	17
2.6.	Diseño del sistema de colada empleado para la primera y segunda prueba.	18
2.7.	Diseño del sistema de colada empleado para la tercera prueba.	18
2.8.	Diseño del sistema de colada empleado para la cuarta y quinta prueba.	19
2.9.	Componentes del sistema de colada con flujo interrumpido (IFG).	21
3.1.	Aplicación del Teorema de Bernoulli en sistemas de colada.	25
3.2.	Representación de la ley de continuidad.	26
3.3.	Representación de un mal diseño de colada.	26
3.4.	Representación de los componentes básicos y auxiliares de un sistema de colada.	29
3.5.	Ilustración del movimiento del metal líquido (flujo turbulento).	29
3.6.	Representación de los diferentes sistemas de colada para el cálculo de la altura calculada.	33
3.7.	Relación del coeficiente de descarga de orificio con la relación área de la bajada al área total de las entradas.	35
3.8.	Nomograma para el cálculo de las dimensiones del sistema de colada para aleaciones de aluminio. M_p es la masa de la pieza, e es el espesor y A_b es el área de la bajada..	37
3.9.	Gráfico para la determinación del gasto másico en función del peso y del	



espesor crítico de la pieza (congreso AFS).	39
3.10. Dimensiones del (los) canal (es) y de la (las) entrada (s).	41
3.11. Relación recomendada para: (A) el dimensionamiento del colchón o extensión y (B) tina o copa de llenado.	41
4.1. Dispositivo empleado para la fabricación de los compositos con 10 y 15 % SiCp.	45
4.2. Representación esquemática de la posición de la pieza a partir de la línea de partición.	47
4.3. Placa modelo conteniendo la pieza y los componentes del sistema de colada.	49
4.4. Representación esquemática de los termopares colocados dentro del sistema de colada y de la pieza. (a) Corte transversal, (b) vista por arriba y (c) Vista lateral de entrada y pieza.	50
4.5. Representación esquemática del arreglo experimental usado.	
4.6. Datos graficados para la obtención del tiempo en la bajada para el termopar 1 y 7.	53
4.7. Datos registrados por el termopar 3 (T3), para la aleación A356 con RC1.	54
5.1. Prueba 1, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado para la aleación A356 con RC1.	57
5.2. Prueba 2, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado para la aleación A356 con RC1.	57
5.3. Prueba 3, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado para la aleación A356 con RC1.	58
5.4. Prueba 1, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado para la aleación A356 con RC2.	58
5.5. Prueba 2, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado para la aleación A356 con RC2.	59
5.6. Prueba 3, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado para la aleación A356 con RC2.	59



5.7.	Prueba 1, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado para el composito con 10 % SiCp y con RC1.	60
5.8.	Prueba 2, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado para el composito con 10 % SiCp y con RC1.	60
5.9.	Prueba 3, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado para el composito con 10 % SiCp y con RC1.	61
5.10.	Prueba 1, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado para el composito con 10 % SiCp y con RC2.	61
5.11	Prueba 2, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado para el composito con 10 % SiCp) y con RC2.	62
5.12	Prueba 3, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado para el composito con 10 % SiCp y con RC2.	62
5.13.	Prueba 1, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado para el composito con 15 % SiCp y con RC1.	63
5.14.	Prueba 2, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado para el composito con 15 % SiCp y con RC1.	63
5.15.	Prueba 3, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado para el composito con 15 % SiCp y con RC1	64
5.16.	Prueba 1, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado para el composito con 15 % SiCp y con RC2.	64
5.17.	Prueba 2, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado para el composito con 15 % SiCp y con RC2.	65
5.18	Prueba 3, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado para el composito con 15 % SiCp y con RC2.	65
5.19.	Prueba 1, análisis térmico para la determinación del tiempo total de la aleación A356 con RC1.	66
5.20.	Prueba 2, análisis térmico para la determinación del tiempo total de la aleación A356 con RC1.	67
5.21	Prueba 3, análisis térmico para la determinación del tiempo total de la aleación A356 con RC1.	67



5.22.	Prueba 1, análisis térmico para la determinación del tiempo total de la aleación A356 con RC2.	68
5.23.	Prueba 2, análisis térmico para la determinación del tiempo total de la aleación A356 con RC2.	68
5.24.	Prueba 3, análisis térmico para la determinación del tiempo total de la aleación A356 con RC2.	69
5.25.	Prueba 1, análisis térmico para la determinación del tiempo total para el composito con 10 % SiCp y con RC1.	69
5.26	Prueba 2, análisis térmico para la determinación del tiempo total para el composito con 10 % SiCp y con RC1.	70
5.27	Prueba 3, análisis térmico para la determinación del tiempo total para el composito con 10 % SiCp y con RC1.	70
5.28.	Prueba 1, análisis térmico para la determinación del tiempo total para el composito con 10 % SiCp y con RC2.	71
5.29.	Prueba 2, análisis térmico para la determinación del tiempo total para el composito con 10 % SiCp y con RC2.	71
5.30	Prueba 3, análisis térmico para la determinación del tiempo total para el composito con 10 % SiCp y con RC2.	72
5.31.	Prueba 1, análisis térmico para la determinación del tiempo total para el composito con 15 % SiCp y con RC1.	72
5.32.	Prueba 2, análisis térmico para la determinación del tiempo total para el composito con 15 % SiCp y con RC1.	73
5.33	Prueba 3, análisis térmico para la determinación del tiempo total para el composito con 15 % SiCp y con RC1.	73
5.34.	Prueba 1, análisis térmico para la determinación del tiempo total para el composito con 15 % SiCp y con RC2.	74
5.35.	Prueba 2, análisis térmico para la determinación del tiempo total para el composito con 15 % SiCp y con RC2.	74
5.36	Prueba 3, análisis térmico para la determinación del tiempo total para el composito con 15 % SiCp y con RC2.	75



5.37.	Prueba 1, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado de la pieza para la aleación A356 y RC1.	76
5.38.	Prueba 2, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado de la pieza para la aleación A356 y RC1.	76
5.39	Prueba 3, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado de la pieza para la aleación A356 y RC1.	77
5.40.	Prueba 1, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado de la pieza para la aleación A356 y RC2.	77
5.41.	Prueba 2, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado de la pieza para la aleación A356 y RC2.	78
5.42	Prueba 3, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado de la pieza para la aleación A356 y RC2.	78
5.43.	Prueba 1, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado del composito con 10 % SiCp para la RC1.	79
5.44.	Prueba 2, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado del composito con 10 % SiCp para la RC1.	79
5.45	Prueba 3, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado del composito con 10 % SiCp para la RC1.	80
5.46.	Prueba 1, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado del composito con 10 % SiCp para la RC2.	80
5.47.	Prueba 2, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado del composito con 10 % SiCp para la RC2.	81
5.48	Prueba 3, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado del composito con 10 % SiCp para la RC2.	81
5.49.	Prueba 1, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado del composito con 15 % SiCp para la RC1.	82
5.50.	Prueba 2, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado del composito con 15 % SiCp para la RC1.	82
5.51.	Prueba 3, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado del composito con 15 % SiCp para la RC1.	83



ÍNDICE DE FIGURAS

5.52.	Prueba 1, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado del composito con 15 % SiCp para la RC2.	83
5.53.	Prueba 2, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado del composito con 15 % SiCp para la RC2.	84
5.54.	Prueba 3, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado del composito con 15 % SiCp para la RC2.	84
5.55.	Resultados de las velocidades experimentales promedio generadas dentro del sistema de colada, para cada aleación en estudio.	88
5.56.	Valores de la viscosidad dinámica como función de la temperatura y del % de silicio.	91
5.57.	Representación gráfica del número de Reynolds promedio para cada aleación.	94
5.58.	Comparación gráfica de los gastos volumétricos y las velocidades experimentales promedio en cada aleación.	97
5.61	Representación gráfica de las velocidades experimentales y tiempos de llenado experimentales en función del contenido de SiCp..	99
5.60	Comparación gráfica de los tiempos de llenado experimentales en función del contenido de SiCp.	100
5.61	Distribución de partículas en la pieza para los compositos con 10 y 15% de SiCp para la relación de colada 1.	103
5.62.	Distribución de partículas en la pieza para los compositos con 10 y 15% de SiCp para la relación de colada 2.	104



ÍNDICE DE TABLAS.

2.1.	Composiciones químicas de las series de aleaciones de aluminio para fundición.	5
2.2.	Forma, volumen y tamaño de refuerzo empleado en la fabricación de compositos de matriz metálica.	6
2.3.	Relaciones de colada y dimensiones de cada componente.	16
3.1.	Densidades de las aleaciones de aluminio y sus óxidos.	27
3.2.	Gastos y áreas del sistema de colada para una relación 1:4:4.	34
4.1.	Composición química de la aleación, obtenida por espectrometría de emisión atómica.	44
4.2.	Arreglo del diseño de experimentos en este trabajo.	46
4.3.	Datos para el cálculo de los sistemas de colada.	46
4.4.	Valores calculados para los componentes básicos (*) y auxiliares del sistema de colada para la RC1 = 1:2:3 y RC2 = 1:1.5:2.	48
5.1.	Resultados de los tiempos experimentales obtenidos por el análisis térmico.	85
5.2.	Resultados de las velocidades experimentales y teóricas promedio.	87
5.3.	Resultados de las viscosidades dinámicas para las tres aleaciones en estudio.	92
5.4.	Resultados de las densidades para las tres aleaciones en estudio.	92
5.5.	Resultados de las viscosidades cinemáticas para las tres aleaciones en estudio.	92
5.6.	Número de Reynolds (Re) promedio experimental generado dentro del sistema de colada para cada aleación en estudio.	93
5.7.	Valores del número Reynolds correspondientes al tipo de flujo que se origina dentro del sistema de colada.	95
5.8	Resultados comparativos entre los gastos volumétricos experimentales y	



los teóricos	96
5.9. Comparación de los resultados de los tiempos de llenados obtenidos por: (a) análisis térmico, (b) a partir de gastos experimentales y (c) de acuerdo al método de la AFS, para aleaciones monolíticas.	98



ABSTRAC.

In this work were carried out experiments in order to study the behavior of liquid metal through the gating system, three alloys were studied: (1) A356 alloy, (2) A356-10 %vol SiCp and (3) A356-15 %vol SiCp, green sand mould were used in the experiments. Major objectives were to determinate the flow rate (v), Reynold number (Re) and volumetric rate (Gv) through the gating system, also to obtain the pouring time (t_{ll}). Two experimental gating ratios were tested: 1:2:3 and 1:1.5:2. A new technique was development in order to reach the objectives, thermocouples were localized in the gating system one the sprue, the second in the gate and finally two into the casting (superior and inferior). All thermocouples were connected to the acquisition data system (Iotech Tempscan 1000), in order to get dates of the movement of the liquid metal through the gating system. The composition of the green sand moulds was: water 3.5 %, bentonite 10 % (calcic bentonite 6 % and sodic bentonite 4 %) and Oklahoma silica sand with AFS Number 100-110. The pouring temperature in all the experiments was 720 C.

Results of the experimental stage shown that the metal flow rate in the gating ratio 1:1.5:2 is higher than the system with 1:2:3 gating ratio. An interesting result is that the higher metal flow rate was obtained in the A356-10 % vol. SiCp and therefore higher Reynolds number, volumetric rate and the smaller pouring time.

The most relevant conclusion of this investigation was the follow: it is possible to get sound casting of cast composites reinforced with 10 and 15 %vol. SiCp using the gating ratios applied to conventional alloys. This result is not according with the gating ratios proposed in the literature for Aluminum Cast Metal Composites: 1.25:10:10, 1:6:8, 1:8:8, 1:8:10. Usually the gating systems for these materials are designed with ceramic filters or slag tramps into the system, the consequence is the low metal yield of the castings. Finally the experimental results of the parameters under study were compared with dates obtained according to AFS gating system dimensioning.



RESÚMEN.

En el presente trabajo se realizan pruebas experimentales para el estudio del comportamiento que presenta el metal líquido dentro del sistema de colada para tres aleaciones diferentes: (1) aleación comercial A356, (2) compositos con 10 y (3) con 15% de SiCp con matriz A356, coladas en arena. La intención o propósito es determinar la velocidad experimental global (v), calcular el Número de Reynolds global (Re) y el gasto volumétrico global (G_V) dentro del sistema de colada, además de determinar el tiempo de llenado (t_{II}) de la pieza que se presenta en dos sistemas de colada diferentes ($RC1 = 1:2:3$ y $RC2 = 1:1.5:2$). Para lo anterior se aplica una nueva técnica de medición, la cual consiste en colocar termopares dentro del sistema de colada a una distancia conocida entre el inicio de la bajada y al final de la entrada y por otra parte colocar termopares en la parte inferior y superior de la cavidad de la pieza, cada uno de los termopares van conectados a un sistema de adquisición de datos (Iotech tempscan 1100) para obtener la historia térmica (análisis térmico), la frecuencia de adquisición es de 10 datos por segundo (1 dato cada 0.1 s). Los moldes de arena se elaboraron con la siguiente composición: 3.5% de humedad, 10% de bentonitas (6% bentonita cálcica y 4 % bentonita sódica) y arena Oklahoma con No. AFS 100-110. La temperatura de colada en las tres aleaciones es la misma, $720^\circ C$.

Los resultados experimentales obtenidos para la determinación de las variables antes mencionadas son comparados con resultados calculados teóricamente, los cuales la mayoría de estos son propuestos por la AFS (American Foundrymen's Society).

En este trabajo se encontró que las velocidades experimentales globales en el sistema de colada siempre son mayores en la relación de colada dos (1:1.5:2) que en la uno (1:2:3), al analizar las tres aleaciones las máximas velocidades se localizaron en el composito con 10% de SiCp. También en esta misma relación de colada (RC2) se encuentran los valores del número de Reynolds y gasto volumétrico mayores y caso contrario, el tiempo de llenado de la pieza es menor. Lo interesante de lo anterior es tratar de explicar este comportamiento



RESÚMEN

presentado por el composito ya que de alguna manera era de suponerse que las velocidades máximas se encontrarían en las aleaciones sin reforzar.

Una de las conclusiones de este trabajo es que se pueden obtener piezas de buena calidad empleando las relaciones de colada propuesta, ya que comúnmente las que se emplean para MMC's (Compuestos de Matriz Metálica) son: 1.25: 10: 10, 1: 8: 8, 1: 6: 8, 1: 8: 10 , además de que las relaciones son muy grandes, hay ocasiones que dentro del diseño del sistema de colada se emplean filtros cerámicos y trampas de burbujas, lo cual trae como consecuencia que el rendimiento del metal sea muy bajo.



OBJETIVOS.

En la realización del presente trabajo los principales objetivos fueron:

- Estudiar las velocidades globales generadas dentro de los componentes del sistema de colada para la predicción del tipo de flujo (laminar, laminar-turbulento o turbulento) que se genera durante el llenado de acuerdo a las relaciones de colada propuestas en este trabajo para compositos colados Al-7Si-SiCp y la matriz sin reforzar.
- Calcular el gasto volumétrico a partir de las velocidades experimentales y del área de control y por consiguiente el cálculo del tiempo de llenado de la pieza.
- Estudiar el efecto de las relaciones de colada propuestas, gasto volumétrico, y tiempo de llenado sobre la calidad superficial.
- Evaluar el efecto del diseño del sistema de colada sobre la distribución de reforzante en la pieza.



HIPÓTESIS.

La información de los resultados cuantitativos y cualitativos obtenidos de las variables involucradas en el diseño del sistema de colada durante el desarrollo de este trabajo como lo son: relación de colada, velocidad, tipo de flujo, gasto volumétrico y tiempo de llenado, servirán como base para la obtención de piezas de compositos Al-7Si-10 y 15 % SiCp coladas en arena en verde.



CAPITULO I

INTRODUCCIÓN.

Durante los últimos 40 años, el desarrollo de nuevos materiales ha cambiado el énfasis, enfocándose a mejorar las propiedades mecánicas en base a conseguir menor peso (baja densidad), bajo costo, alta calidad y comportamiento más eficiente. Paralelamente a estas tendencias, los materiales compuestos de matriz metálica (MMC's, por sus siglas en inglés) han estado creciendo significativamente. Los atributos de los MMC's incluyen beneficios en el comportamiento mecánico como la resistencia a la tensión y compresión, resistencia al desgaste y abrasión, y de propiedades físicas como la densidad, expansión térmica y el difusividad térmica.¹

Los primeros esfuerzos enfocados por desarrollar MMC's se originaron en los años cincuenta y a principios de los años sesenta. La motivación principal era la de ampliar la eficacia estructural de materiales metálicos utilizados generalmente en aplicaciones militares y aeroespaciales, sin embargo el costo era extremadamente elevado. La recesión a principios de la década de los 70's causó una investigación poco significativa para el desarrollo de estos materiales aunque a finales de esta década se renovaron las investigaciones, los refuerzos discontinuos en los MMC's usando como reforzantes SiC en forma de partículas y agregados cortos. Una mayor cantidad de estudios para ambos materiales (fibras continuas y discontinuas), continuó a través de los años ochenta. En los inicios de la década de los 90's, un programa de la fuerza aérea americana proporcionó una inversión significativa en MMC's, para establecer tecnología para la industria aeroespacial en los Estados Unidos.²

Las matrices más comunes para la fabricación de MMC's son el aluminio, el magnesio, el titanio y en menor grado el cobre y el acero, aunque los más empleados son sin duda las aleaciones de aluminio debido a la reducción de peso, bajo costo y alta disponibilidad.



Los avances industriales en el reforzamiento de metales ligeros o aleaciones con cerámicos, buscan la producción de un material compuesto con mejores propiedades mecánicas, las que por si sola la matriz metálica no puede alcanzar. Los composites de matriz metálica tienen un gran potencial en muy diversas aplicaciones, como son en la industria automotriz, transporte, construcción, aeronáutica, militar, industria deportiva, entre otras.

Los composites de matriz de aluminio son los materiales más prometedores para aplicaciones estructurales y desgaste. En años recientes, el interés se ha centrado principalmente en el uso de partículas de SiC y de Al_2O_3 como reforzantes, aunque se han utilizado otros como el ZrO, grafito y el SiO_2 . Los procesos para la obtención de los composites incluyen procesos en estado sólido como la metalurgia de polvos y también procesos en estado líquido como la infiltración.³

A pesar del uso de diferentes matrices base aluminio como lo son aluminio puro, Al-Cu y Al-Mg, las matrices Al-Si hipoeutécticas y eutécticas son las más utilizadas en su manufactura debido a que disminuyen la posibilidad de disolución del SiC en aluminio líquido, además de que las hacen más competitivas por su baja densidad, el % de contracción, bajas temperaturas de fusión, el índice de fluidez, su costo bajo y su alta disponibilidad.

En el caso de los procesos de manufactura de piezas de fundición en los cuales el composite con matriz de aluminio se prepara por rutas de fase líquida durante su fusión deben tomarse en cuenta algunas características metalúrgicas de la matriz como lo son:

- Facilidad para atrapar escoria e impurezas.
- Tendencia a atrapar gases en solución (principalmente hidrógeno).
- Oxidación ó reactividad del metal.
- Dificultad de eliminar micro porosidades.
- Alta conductividad térmica.
- Elevada contracción durante el proceso de solidificación (por ejemplo Al puro).



CAPITULO I

Para el caso de moldes de arena algunos de los aspectos más importantes que debe ser considerado para la fabricación de piezas coladas de composito con matriz de aluminio (CAIMMC's, por sus siglas en inglés) cuando es utilizando el método de moldeo en verde son:

- Control de las propiedades de la mezcla de moldeo (punto temper).
- Cuidadoso diseño del sistema de colada: evitar defectos internos y externos en la pieza, además de tener una buena calidad microestructural (distribución homogénea de las partículas de SiCp en toda la pieza).

Desafortunadamente la información referente a parámetros específicos para el diseño, cálculo y dimensionamiento de sistemas de colada es muy limitada en el caso de piezas coladas de compositos con matriz de aluminio, por lo que es muy importante la generación de este tipo de información para obtener piezas coladas de aceptable calidad y a bajo costo, aprovechando la experiencias en la fabricación de piezas de aluminio sin reforzar por procesos de colada en molde de arena en verde.



CAPITULO II.

ANTECEDENTES.

2.1. ALEACIONES DE ALUMINIO PARA FUNDICIÓN.

2.1.1. Introducción.

La mayor parte de estas aleaciones están basadas en sistemas de Al-Si y Al-Cu y en menor grado en las Al-Mg, con adiciones menores para mejorar las características de fundición o de servicio.

Las aleaciones de Al-Si son de gran aplicación por sus excelentes cualidades para la fundición y su resistencia a la corrosión, no son frágiles en caliente y es fácil obtener con ellas fundiciones sólidas en secciones gruesas o delgadas.

Además se puede preparar una amplia gama de aleaciones que proporcionen al metal más resistencia a la corrosión a temperaturas elevadas, incluso algunas de las nuevas aleaciones pueden utilizarse como plancha de blindaje para tanques y otros vehículos militares ⁴.

La calidad de las piezas de fundición, coladas en moldes de arena de las aleaciones base aluminio en general depende de varios factores: ⁵

- La calidad del metal líquido: la introducción de éste debe ser bajo condiciones que aseguren el llenado completo de la cavidad del molde además de que no se genere turbulencia y existan gradientes óptimos de temperatura, teniendo como resultado una producción más consistente y de alta calidad de la pieza.
- La manera en que el metal líquido es introducido a la cavidad del molde y como consecuencia, la forma en que solidifica, depende de las características del flujo y este a su vez de la temperatura, la rapidez de vaciado, la composición de la arena (bentonitas, tipo y tamaño de la arena, % de humedad, etc.) y del diseño del sistema de colada.



2.1.2. Aleaciones Al-Si.

Las aleaciones Al-Si comprenden del 85% al 90% del aluminio total producido en la industria de la fundición. Son comúnmente usadas en la manufactura de partes de los motores de automóviles como pistones, anillos de inserción del pistón y monoblocks. Las principales razones, como se mencionó anteriormente para el uso de aleaciones Al-Si es su buena resistencia a la corrosión, buena colabilidad y baja densidad, otras de las ventajas de éste tipo de aleaciones es que tienen bajo costo, control de la composición química y existe la posibilidad de realizar tratamientos térmicos. La resistencia al desgaste de estas aleaciones depende de la composición química y de la carga aplicada ⁶. Las composiciones químicas de las series de aleaciones de aluminio más comunes se muestran en la Tabla 2.1.

Algunas de las características críticas en la microestructura es el tamaño de grano, espaciamiento interdendrítico y la morfología del silicio en la fase del eutéctico. Adiciones de Sr, Na o Sb se realizan normalmente para mejorar las estructuras, modificando la morfología de la fase eutéctica a una estructura globular-fibrosa, actualmente el Sr es el elemento más utilizado para este propósito.

Aleación.	Método de fabricación	Elemento (% peso)					
		Si	Cu	Mg	Fe	Zn	Otros
350 Series	A/MP	5-7	<0.2-1.25	0.35-0.55	<0.06-<0.2	<0.1-<0.35	—
380 Series	FP	8.5-11.0	2.0-3.5	<0.1-<0.3	<1.3	<3.0	<0.3 Sn
390 Series	FP	<7.5	4.5	0.55	<1.3	<0.1	<0.1 Mg
400 Series	A/MP/FP	5.25-12.0	<0.1-<0.3	<0.05-<0.1	<0.8-<2.0	<0.5	—

A=fabricación en arena; PM= fabricación en molde permanente; FP=Fundición a presión.

Tabla 2.1 Composiciones químicas de las series de aleaciones de aluminio para fundición.

2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS COMPOSITOS.

Un composito es una combinación de dos o más materiales con diferentes propiedades mecánicas y físicas, teniendo una interfase distinguible entre ellos. Los compositos son comúnmente clasificados a dos niveles. El primer nivel de la clasificación es por lo general realizada con respecto a la constitución de la matriz, las cuales pueden ser: compositos de



CAPITULO II

matriz orgánica (OMC's, por sus siglas en inglés), composites de matriz metálica (MMC's, por sus siglas en inglés), y compuestos de matriz cerámica (CMC's, por sus siglas en inglés). El término "composites de matriz orgánica es generalmente adjudicada a dos tipos de composites, de matriz polimérica (PMC's, por sus siglas en inglés) y de matriz carbónica (comúnmente referida a los composites carbono-carbono).

El segundo nivel de la clasificación, se describe en base a la morfología del reforzante, en donde se clasifica como reforzados con: partículas, fibras cortas o discontinuas (whisker), fibras continuas, microesfera.

Los reforzantes en forma de partículas comúnmente empleados son: carburo de silicio, alúmina, óxido de silicio, carburo de titanio y carburo de tungsteno, para los whisker el tipo más común es el carburo de silicio, pero también se utilizan de alúmina y nitruro de silicio. En cambio para las fibras continuas se utilizan generalmente alúmina, sílice, el boro, alúmina-sílice, alúmina-borosilica, zirconia, magnesia, nitruro de boro, diborato de titanio, carburo de silicio, y carburo de boro. El tipo, tamaño, forma y fracción del reforzante son muy importantes debido a que estos determinan las propiedades mecánicas, costos y el comportamiento de los materiales compuestos ⁷.

La Tabla 2.2 presenta algunos valores típicos de tamaño, volumen y forma del reforzante utilizados en la fabricación de composites de matriz metálica ⁸.



Tipo	Reforzante	Tamaño	Volumen (%)
Dispersión	Partículas	0.01 - 0.1 μm	1 - 15
Partículas	Partículas Plaquetas	> 1 μm	5 - 25
Fibra	Fibras (continuas o discontinuas)	0.1 μm - 0.1 mm diámetro 0.01 mm - continuas	2 - 80 2 - 80

Tabla 2.2. Forma, volumen y tamaño de refuerzo empleado en la fabricación de composites de matriz metálica.

2.3 COMPOSITOS DE MATRIZ METÁLICA.

Los composites de matriz metálica están constituidos por dos materiales de diferentes propiedades, generalmente consisten de un metal de baja densidad, como el aluminio o magnesio, reforzado con partículas ó fibras de material cerámico, como el carburo de silicio o grafito.

Los composites son usados no solamente por sus propiedades estructurales, sino también por sus aplicaciones tribológicas, eléctricas, térmicas y ambientales. Los materiales compuestos son generalmente optimizados para lograr un balance particular de propiedades para un determinado tipo de aplicaciones, sin embargo, tienen algunas desventajas comparadas con las aleaciones monolíticas, como lo son: mayor costo de fabricación, inconsistente reproducibilidad de la calidad del material, mayor control de variables de proceso, baja compatibilidad matriz-refuerzo y baja ductilidad, entre otros, es decir, dependiendo del proceso de fabricación, los costos y la calidad pueden variar.



2.3.1. Reforzantes: clasificación y morfología en composites de matriz metálica (MMC's por sus siglas en inglés).

La clasificación de los reforzantes de acuerdo a su morfología empleados en la fabricación de MMC's pueden ser de tipo continuo (fibras) o discontinuo (whiskers y partículas), un esquema típico se muestra en la Figura 2.1. Los más empleados son los de tipo discontinuo, principalmente partículas, debido a su bajo costo y alta disponibilidad. Los compuestos reforzados con partículas incluyen formas esféricas, hojuelas, bastones y muchas otras formas. Los refuerzos más empleados en la elaboración de los composites son las partículas de SiC y Al₂O₃, pero también se han empleado TiB₂, B₄C, SiO₂, TiC, WC, BN, ZrO₂, W, etc. Los reforzantes discontinuos (whiskers) junto con las partículas también son considerados como una opción en la fabricación de los MMC's.

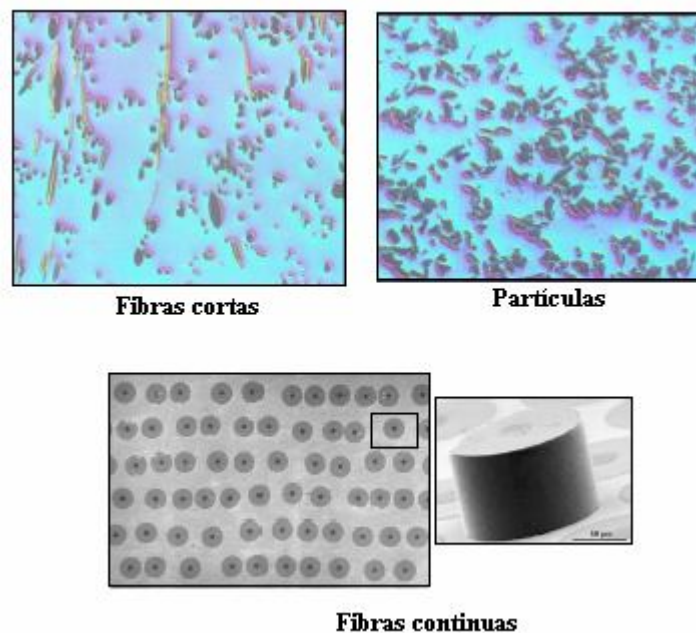


Figura 2.1. Compositos con diferentes morfologías del reforzante.



2.4. PROCESOS DE MANUFACTURA DE COMPOSITOS POR RUTA LÍQUIDA (FUNDICIÓN POR AGITACIÓN O PROCESO DEL VÓRTICE).

Los procesos de manufactura de los compositos se clasifican en tres métodos (observar la Figura 2.2): (1) métodos en fase líquida el de agitación o de vórtice (2) métodos en fase sólidas y (3) métodos en fase de vapor. El método (1) es uno de los más empleados, la ubicación de este proceso dentro de la Figura 2.2 se señala en color negro. En este método el reforzante se introduce continuamente en una matriz fundida la cual se encuentra en agitación mecánica constante por medio de una propela o agitador recubierto de cerámico. El uso de una atmósfera inerte o generar un vacío durante la agitación es recomendable para evitar problemas de atrapamiento de aire.⁹

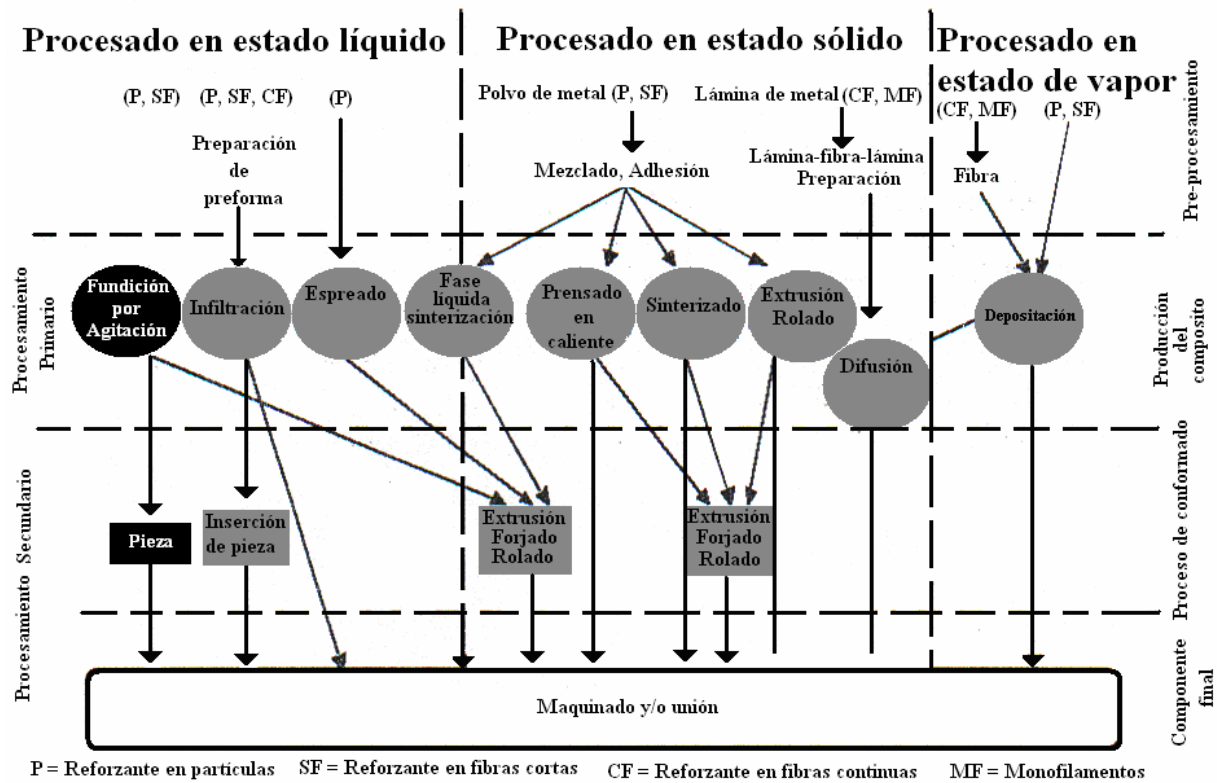


Figura 2.2. Representación esquemática de las rutas de fabricación de los MMC's ⁹.



Los principales parámetros de fabricación en el proceso vórtice son:

- Temperatura del metal líquido (matriz).
- Temperatura del cerámico (reforzante).
- Fracción del cerámico.
- Tamaño de partícula del cerámico.
- Velocidad de agitación.
- Diseño de la flecha.
- Tiempo de agitación.
- Velocidad de alimentación del cerámico.

Las dificultades típicas que se pueden presentar durante el proceso de manufactura son: la aglomeración y asentamiento de las partículas cerámicas durante la agitación, reacciones interfacial, absorción de gases, flotación del cerámico, etc. Para reducir los problemas anteriores es necesario considerar en la fabricación de composites por este proceso las siguientes variables ¹⁰:

Características de las partículas: uno de los problemas en la fabricación es que las partículas pueden flotar o hundirse, dependiendo de la relación de densidades partícula-líquido. Como referencia para el presente trabajo las densidades del SiCp y aluminio son 3.2 y 2.67 g/cm³ respectivamente. La aglomeración de partículas es otro problema debido al asentamiento, de esta forma pueden quedar distribuidas irregularmente a nivel macroscópico (regiones libres de partículas debido al asentamiento) y a nivel microscópico (segregación interdendrítica y aglomeración de partículas). Thomas ¹¹ estudio el estado de la dispersión de las partículas en agitación bajo condiciones dinámicas de flujo y encontró que la forma y tamaño de la partícula son parámetros importantes. Los problemas encontrados en la agitación fueron:

- (1) Partículas de tamaño por debajo de 10 µm son casi siempre suspendidas en el metal líquido y las fuerzas gravitacionales son despreciables.
- (2) El efecto gravitacional no es despreciable para partículas de tamaño de 10-100 µm, y un gradiente de concentración de partícula puede desarrollarse.



- (3) Partículas de tamaño de 100 a 1000 μm son totalmente suspendidas a altas velocidades y después depositadas en la base del canal a velocidades bajas.

Incorporación de las partículas: en general hay dos tipos de barreras en la incorporación de las partículas dentro del metal líquido. Barrera mecánica como lo es una película de óxido en la superficie y la barrera termodinámica la cual es referida comúnmente en términos de humectabilidad. La barrera mecánica puede ser reducida por una buena técnica de fusión, pero en la barrera termodinámica es más difícil de controlar. Generalmente en los MMC's son usados partículas cerámicas las cuales son poco humectadas por la matriz metálica, requiriendo una fuerza externa para superar la barrera de la energía superficial. Esta fuerza es proporcionada por la agitación del metal líquido o usando una agitación electromagnética. La dinámica de las partículas en el metal líquido puede ser gobernada por otras fuerzas incluyendo la gravedad, fuerzas boyantes o por la acción de la agitación.

Agitación: la distribución durante la agitación puede depender del método de agitación usado. Esto es esencial para producir una distribución más uniforme sin atrapamiento de aire. Un exceso de aire en el metal líquido puede originar una mayor porosidad interna en las piezas. En la agitación mecánica, la temperatura del metal líquido, las condiciones de agitación y el tipo, cantidad y naturaleza de la partícula son algunos de los factores para considerar.^{12, 13}

2.5. PROCESO DE FUNDICIÓN EN MOLDES DE ARENA EN VERDE.

Durante el proceso de moldeo en verde para la obtención de piezas coladas tradicionales de aluminio, además de las mencionadas en la Sección 2.1.1, se deben considerar los siguientes pasos esenciales: el control de las propiedades de la mezcla de moldeo, el diseño del modelo de fundición, el diseño del sistema de colada y alimentación, y la técnica de fusión. Las características de cada una de estas etapas es bien conocida para el caso de aleaciones monolíticas, sin embargo la información necesaria para ser aplicada al caso de fabricación de piezas coladas de composito es incipiente y limitada, por lo que en la siguiente parte se



realizara una breve descripción de cada una de las etapas considerando los pasos utilizados en la fundición tradicional de piezas de aluminio y complementada con algunas referencias citadas en la bibliografía para el caso de composites colados de aluminio.

2.5.1. Control de las propiedades de la mezcla de moldeo en verde.

Las mezclas de arenas para moldeo son las más utilizadas en la producción de piezas en la industria de la fundición. Se usa arena en una proporción de 10 toneladas de arena por tonelada de metal, lo cual depende en gran medida del tipo y tamaño de la pieza y del método de moldeo empleado. En las piezas hechas en moldes de arena en verde, los principales componentes de la mezcla de moldeo son: la arena sílice (generalmente sílice, SiO_2), arcilla (bentonitas) y agua, y en ocasiones se utilizan algunos aditivos.

2.5.2. Arenas.

Las arenas son el principal componente de la mezcla de moldeo verde. Las arenas verdes están hechas de arena sílice (SiO_2). El tamaño y distribución de los granos son en extremo importantes para controlar el acabado superficial de las piezas. Estas características también afectan la habilidad del molde para lograr la evacuación de gases formados durante la transformación del agua a vapor y la descomposición de los constituyentes orgánicos de los aglutinantes de los corazones y aditivos de la arena verde, propiedad que se conoce con el nombre de permeabilidad. La correcta distribución de la arena es también crítica para reducir la ocurrencia de defectos por expansión de arena.

Un molde de arena verde debe resistir la temperatura de vaciado de la aleación fundida. Una arena sílice en forma pura, 98% SiO_2 , tiene un punto de fusión aproximadamente de 1704 °C. Si el contenido de SiO_2 en la arena se reduce, entonces el punto de fusión también descenderá. Las temperaturas de vaciado de los hierros fundidos y aleaciones no ferrosas están generalmente bastante abajo que estas temperaturas de fusión.¹⁴

Mezclas típicas utilizadas en la producción de piezas de aluminio contiene 6% de arcilla y 3% de humedad. La granulometría utilizada depende del acabado deseado, en general se sugiere tamaños de No. AFS 110-160, la selección de uno u otro tamaño es importante porque afecta la permeabilidad del molde.



2.5.3. Arcillas.

La arcilla es el adhesivo que mantiene la unión entre los granos de arena y consecuentemente la forma del molde a temperatura tanto ambiente como elevada. La adición de agua se requiere para activar la arcilla. El contenido de humedad del sistema es crítico y puede afectar casi todas las propiedades que son medidas en una fundición.

Existen dos tipos de arcilla naturales, las bentonitas cálcicas y bentonitas sódicas, que son utilizadas en la mayoría de operaciones de fundición. El tipo de equipo, aleación y la geometría de la pieza dictarán el tipo o mezcla de arcilla utilizados por una fundición. Las bentonitas cálcicas son mejor conocidas por su habilidad para desarrollar rápidamente propiedades en verde. Ellas ofrecen un mejor flujo que la bentonita sódica y una mayor deformación a iguales porcentajes de humedad, por lo tanto, tienen una mayor habilidad para fluir libremente a través de las cavidades del modelo de fundición. Ambas bentonitas pueden ser mezcladas en diferentes proporciones, lo cual es una práctica común.¹⁴

2.5.4 Cantidad de arcilla y agua.

La combinación arcilla-agua es la responsable de la unión de los granos de arena. Cambiar la cantidad total de arcilla y agua puede alterar la resistencia a la compresión, la permeabilidad y otras propiedades de la arena verde. Generalmente, incrementando la cantidad de agua se incrementa la resistencia a la compresión en verde hasta un punto referido como punto temper o de templado.

Para el caso de compositos colados en molde de arena se pueden utilizar las mezclas aplicadas a las aleaciones sin reforzar, ya que en la bibliografía no se tiene información al respecto.¹⁴

2.6. DISEÑO DEL SISTEMA DE COLADA

2.6.1. Sistemas de colada para aleaciones monolíticas de aluminio.

Trabajos recientes relacionados con el estudio de sistemas de colada se enfocan principalmente a la simulación del metal líquido dentro del sistema de colada y del llenado de las piezas, estos se mencionan a continuación.



Para el estudio de piezas convencionales de aluminio colado, R. Fuoco, C. S. Cabezas, E. R. Corrêa y M. A. Bastos ¹⁵, mencionan que existen diferentes técnicas que se han utilizado para evaluar la efectividad de los sistemas de colada en fundición, las cuales estas son:

1. Observación del flujo del metal en moldes de arena a través del uso de un equipo de rayos X. la ventaja de esta técnica es que el flujo puede ser observado y las limitaciones principales son la calidad de la imagen y la baja transparencia del líquido.
2. Simulación por computadora, esta técnica es muy flexible pero es necesario tener una adecuada base de datos para obtener resultados y posteriormente validarlos experimentalmente.
3. Observación de modelos con agua, la técnica es muy versátil y existe una muy buena transparencia del líquido, desafortunadamente los resultados no son comparables con el metal líquido debido a las diferencias de la naturaleza del líquido.
4. Evaluación de la calidad de la pieza a través de los resultados de las pruebas mecánicas, es una de las técnicas más efectivas para evaluar sistemas de colada pero requiere de muchas mediciones.

S. Sulaiman and T. C. Keen ¹⁶, desarrollaron un estudio sobre simulación del flujo del metal de una aleación de aluminio LM24 (Al-7Si-0.4Mg) a lo largo del corredor y del sistema de colada con cuatro entradas en el proceso de fundición a presión (Die Casting). El método de análisis de red se usa para esta simulación con la ayuda de un programa escrito en lenguaje de fortran. El estudio consiste en colocar las 4 entradas a diferentes ángulos (40, 50, 60, 70, 80 y 90°) con respecto al corredor ya que originalmente se encuentra a 90° y ver el efecto de la presión que se requiere para llenar a la pieza. Los resultados obtenidos demuestran que el ángulo más pequeño minimiza la energía requerida para llenar a la pieza, esto es porque a este ángulo existe una menor resistencia al flujo del metal y por consiguiente la pérdida por fricción es menor.

Por otra parte, M. R. Barkhudarov ¹⁷, menciona que la simulación de los sistemas de colada genera una gran cantidad de datos que caracteriza el comportamiento del flujo del metal líquido (velocidad, temperaturas, tipo de flujo), así como de la calidad de la pieza (porosidad,



estructura de grano, etc.). Este trabajo se enfoca en el uso de la simulación en varios procesos de fabricación (fundición a presión, modelo evaporable, fundición a presión, etc.), empleando la paquetería Flow 3D. En estos simuladores los datos para composites colados de aluminio que deben introducirse al programa no están disponibles, por lo que la simulación del mismo no se puede realizar.

El diseño del sistema de colada es importante ya que repercute principalmente en el llenado de la pieza, M. Masoumi y H. Hu ¹⁸, estudiaron el efecto del diseño de colada, incluido el tamaño y geometría de las entradas, sobre el flujo del metal líquido dentro de un molde de arena para una aleación de aluminio (A413). Los moldes se hicieron con arena sílica con No. AFS de 90, la cual fue mezclada con 5% de silicato de sodio y posteriormente endurecida con CO₂. La pieza que se moldeó tiene dimensiones de 18 X 18 X 2 cm, una vista del molde de la pieza se muestra en la Figura 2.3. Se diseñó una tina de colada con el propósito de mantener el metal líquido a un mismo nivel, este accesorio se obstruyó con un tapón y posteriormente era llenado con el metal líquido, una vez que se removía el tapón el metal comenzaba a fluir. La temperatura de colada fue de 750 °C. En la caja superior ó cope se colocó una malla de vidrio, específicamente por encima de la superficie de la pieza, el objetivo fue visualizar el frente del metal líquido en tiempo real.

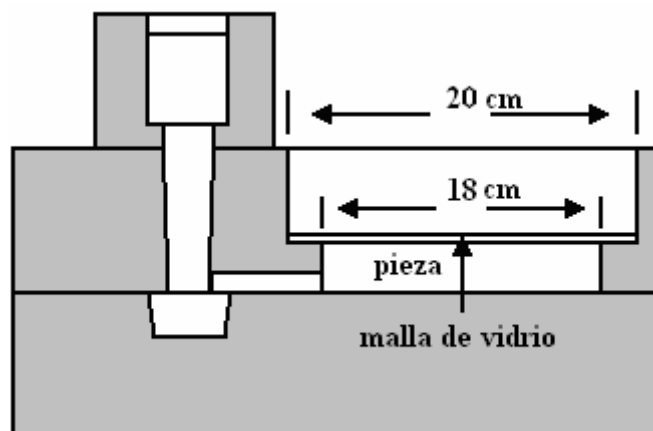


Figura 2.3. Sección transversal del sistema de colada y la pieza.



Las relaciones de colada y las dimensiones del sistema que se emplearon en este estudio se presentan en la tabla 2.3.

No. de Prueba	Área de la bajada (cm ²)	Área del corredor (cm ²)	Dimensiones del corredor (cm)	Área de la entrada (cm ²)	Dimensiones de la entrada (cm)	Relación de colada
1	3.46	9	4.5 X 2	3	3 X 1	1: 2.6: 0.86
2	3.46	9	4.5 X 2	5	5 X 1	1: 2.6: 1.45
3	3.46	9	4.5 X 2	7	7 X 1	1: 2.6: 2
4	3.46	9	4.5 X 2	9	9 X 1	1: 2.6: 2.6
5	3.46	9	4.5 X 2	11	11 X 1	1: 2.6: 3.18
6	3.46	11	5 X 2.2	11	11 X 1	1: 3.18: 3.18
7	3.46	9	4.5 X 2	9	4.5 X 2	1: 2.6: 2.6
8	3.46	9	4.5 X 2	9	6 X 1.5	1: 2.6: 2.6
9	3.46	9	4.5 X 2	11	7 X 1.57	1: 2.6: 3.18
10	3.46	9	4.5 X 2	14	7 X 2	1: 2.6: 4.55

Tabla 2.3. Relaciones de colada y dimensiones de cada componente.

El proceso de llenado del molde fue grabado por una cámara de video y analizado por un software de computadora que es capaz de cortar 50 cuadros por segundo fuera del video grabado. La manera de visualizar el llenado de la pieza se muestra en la Figura 2.4.

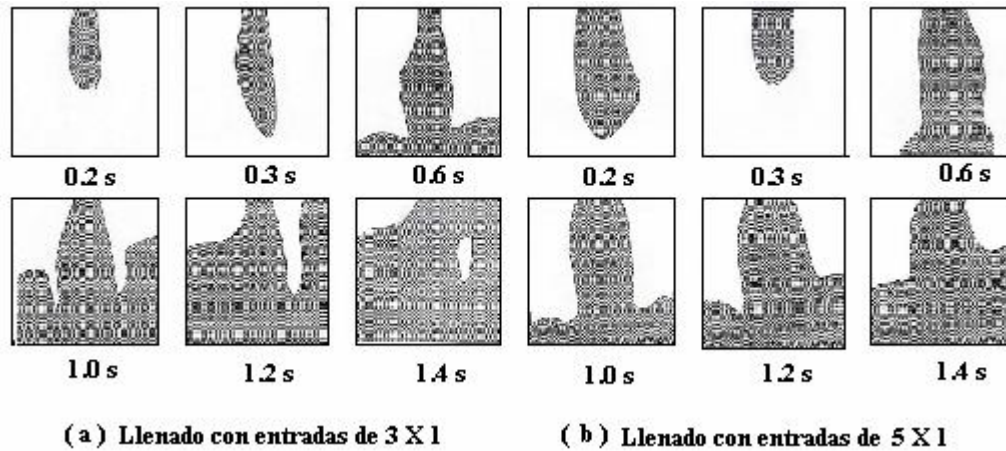


Figura 2.4. Llenado de la pieza empleando dimensiones en la entrada de: (a) 3 X 1 y (b) 5 X 1.

Lo interesante de este tipo de estudio es observar el perfil de velocidades en la que entra el metal líquido a la pieza y la velocidad a la cual entra y se llena el molde. La importancia que tiene este trabajo es que el tipo del perfil de velocidades es de manera parabólica como lo



muestra la Figura 2.5. De manera general el presente artículo hace mención que la geometría, el espesor y ancho de las entradas influyen directamente en la entrada del metal líquido hacia la pieza, lo cual repercute en el llenado de la pieza.

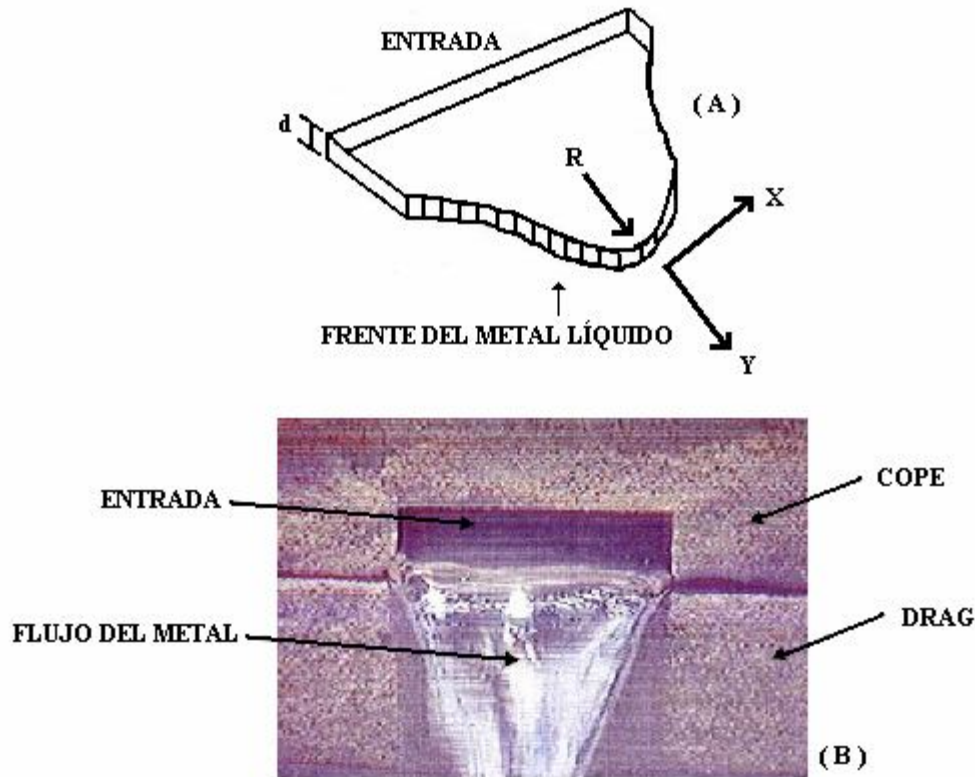


Figura 2.5. Representación del flujo del metal líquido: (A) frente del metal líquido y (B) salida del metal líquido en la entrada.

2.6.2. Sistemas de colada para composites Al-SiCp.

En relación a este aspecto se tiene información muy limitada en la bibliografía, los escasos estudios de este tema se enfocan generalmente en sugerir recomendaciones de diseño, sin embargo no se tienen estudios sistemáticos para la generación de datos importantes para el cálculo del sistema de colada, como lo es en el caso de las aleaciones monolíticas.

Al respecto, D. O. Kennedy y J. C. Church ¹⁹, estudiaron el diseño del sistema de colada para una placa de dimensiones de 0.64X15X30 cm coladas en moldes de arena, para diferentes



condiciones. La primera fue para la aleación comercial A356 con una relación de colada 1:8:8 en este sistema la rapidez de llenado fue entre 1.2 a 1-7 lb/s (ver Figura 2.6). El mismo diseño anterior, se aplico como segundo caso al composito con matriz A356/15 % vol. SiCp, en este caso la rapidez de llenado no se reporta.

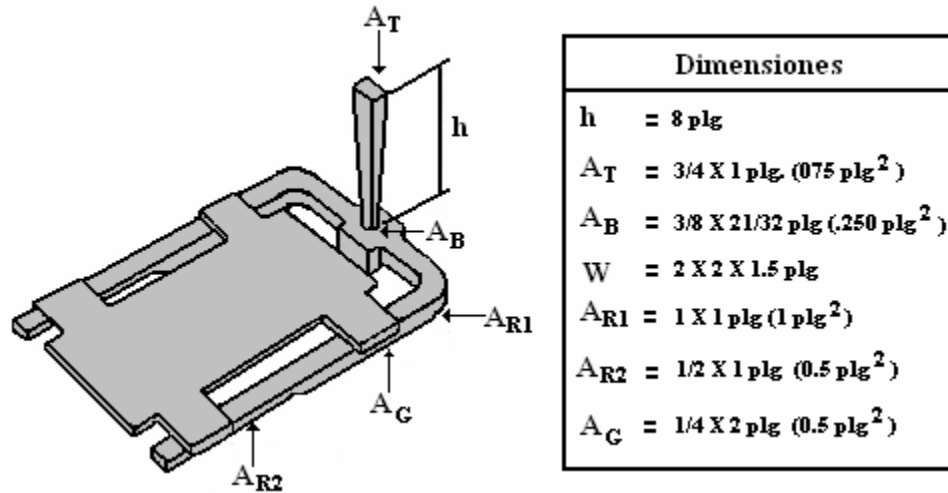


Figura 2.6. Diseño del sistema de colada empleado para la primera y segunda prueba.

En la tercera prueba se utilizaron las mismas condiciones con composito, pero colocando filtros en los corredores, además de que se colocó una tina de colada, ver Figura 2.7, la rapidez de llenado se mantuvo sin variación entre 1.2 a 1.7 lb/s.

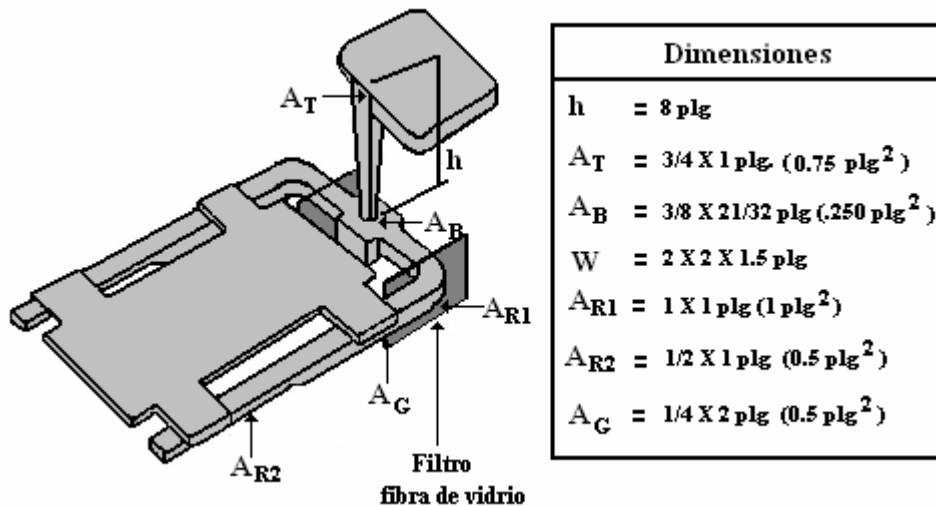


Figura 2.7. Diseño del sistema de colada empleado para la tercera prueba.

En la cuarta pieza experimental se utilizo una relación de colada 1:4:8:8 esta relación representa las áreas de la bajada: reducción: canal: entrada, manteniéndose la misma rapidez de llenado, es decir 1.2 a 1.7 lb/s, ver Figura 2.8.

La ultima pieza fabricada también fue de composito, utilizó la relación de colada 1.25:1:10:10 (bajada: reducción: canal: entrada) para este caso la rapidez de llenado fue entre 1 a 1.5 lb/s, ver Figura 2.8. Aparentemente la rapidez de llenado se determino aplicando técnicas de radiografía las cuales no son descritas, para esta última lo único que cambia con respecto al diseño de la cuarta pieza son las dimensiones de la reducción (0.1 X 1 plg. (0.1 plg²)) y la relación de colada.

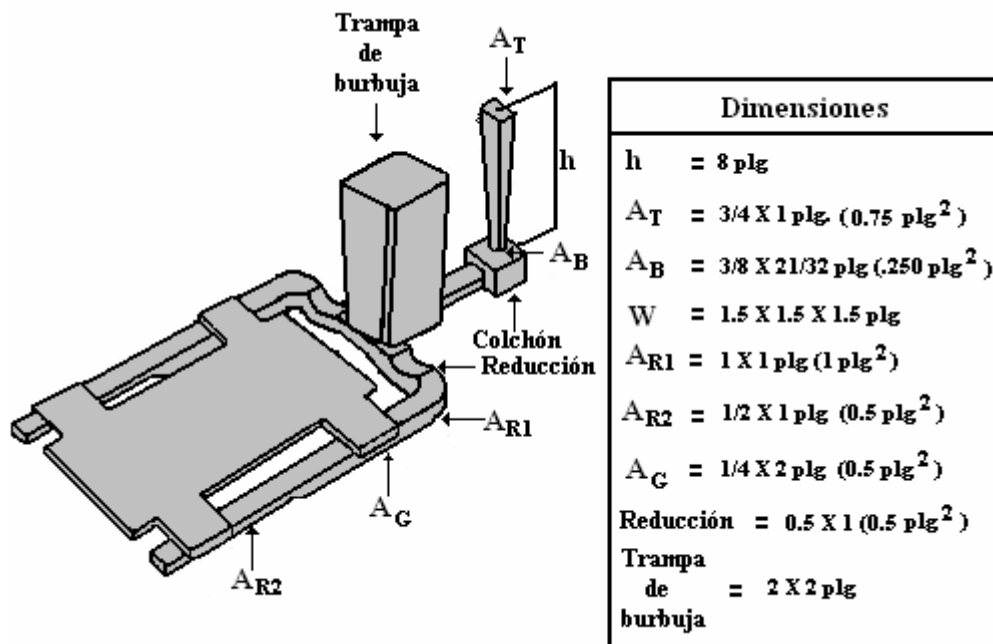


Figura 2.8. Diseño del sistema de colada empleado para la cuarta y quinta prueba.

En conclusión se recomienda para los compositos iniciar el cálculo del sistema de colada siguiendo el método de la AFS para aleaciones de aluminio sin reforzar. Las relaciones de colada de 1:2:4, 1:3:4 y 1:4:4 utilizadas en aleaciones convencionales se sugieren se ajusten



para el caso de compositos a relaciones 1:6:8 pudiendo alcanzar valores hasta de 1:8:10, para obtener piezas de calidad aceptable.

La razón de emplear este tipo de diseños y relaciones de colada se debe a la sensibilidad del composito líquido de aluminio, el cual requiere de la presencia de reducciones en el canal para disminuir la velocidad de llenado con ello la turbulencia y la presencia de defectos en las piezas. Adicionalmente se recomienda colocar las entradas al nivel superior de la pieza.

Algunos proveedores de lingotes de composito (A359/SiCp) para fabricar piezas coladas del mismo como Duralcan ²⁰ solo indican que el diseño del sistema de colada debe evitar la turbulencia durante el llenado del molde debido a la facilidad para atrapar burbujas.

Por otra parte Savage W.J. ²¹, menciona que la principal desventaja del sistema de colada convencional es la cantidad (kilogramos) de metal que se desaprovecha, dicho de otra manera los rendimientos con respecto a la relación peso de la pieza / peso del sistema de colada son bajos.

Recientemente se ha diseñado un sistema de colada para el uso de compositos, el cual es conocido como flujo interrumpido en la colada (IFG, por sus siglas en inglés), al igual que Savage, Weiss D. J. y Rose D. ²² y por otra parte Cox B. M. ²³ y colaboradores mencionan el incipiente diseño de sistemas de colada para CAIMMC's (Cast Aluminium Metal Matrix Composites) en base al diseño IFG. Los componentes principales de éste sistema son: tina de colada, bajada, la cual es un cono cerámico, corredor, entrada, filtro de espuma cerámica, estos componentes se muestran en la Figura 2.9 teniendo como pieza a fabricar un disco de frenos. Este diseño permite que el aire atrapado pueda escapar antes que el metal líquido pueda entrar a la cavidad del molde, es decir, el volumen del metal líquido (composito) en la tina de colada debe ser controlado cuidadosamente antes de retirar el tapón, de tal manera que exista suficiente metal líquido en dicha tina después del llenado de la pieza, para asegurar el llenado completo de la cavidad de la misma.



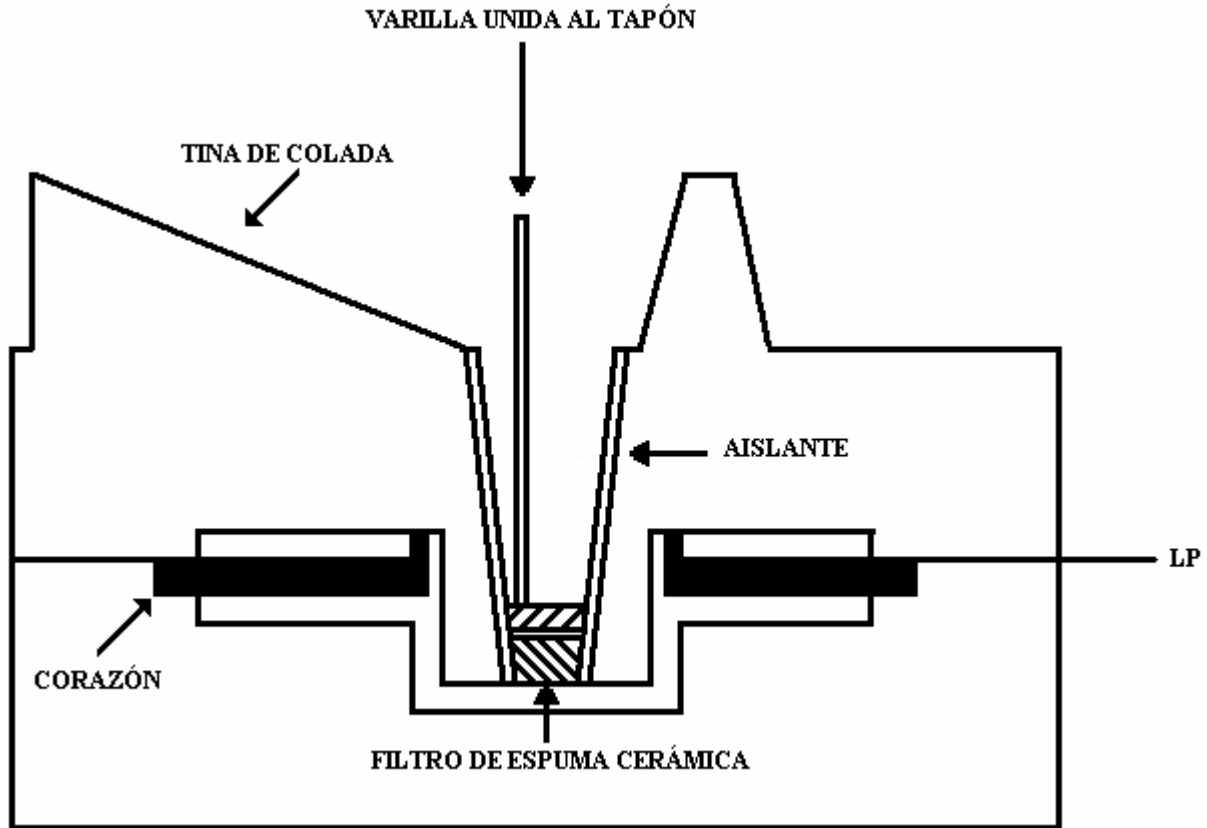


Figura 2.9. Componentes del sistema de colada con flujo interrumpido (IFG).

2.6.3. Técnica de fusión para composites.

Un aspecto relevante dentro del proceso de fabricación para piezas de composites es la técnica de fusión, la cual es importante para lograr obtener piezas libres de defectos. Cox B.M.²³ menciona que a diferencia de las aleaciones de aluminio sin reforzar los pasos empleados durante el proceso de fusión de los composites con matriz de aluminio de manera general son:

- 1) Agitación: la densidad del SiCp es más alta comparada con la del aluminio (3.2 y 2.67 g/cm^3 respectivamente), y por otra parte no existe una buena humectabilidad entre ambos, es por ello que el metal líquido debe de agitarse al momento de agregar el reforzante, dependiendo la cantidad de este último se puede controlar el tiempo de adición y las r.p.m., para asegurar que no exista asentamiento o flotación de las partículas.



- 2) Control de la temperatura de trabajo: Muchos reforzantes no son termodinámicamente estables con el aluminio líquido, y si están en contacto en largos periodos de tiempos pueden causar reacciones químicas irreversibles. En el caso de las partículas de SiC, la reacción con el aluminio puede resultar en la formación de carburo de aluminio (Al_4C_3). Éste carburo forma un cristal sólido, lo cual trae como consecuencia un incremento en la viscosidad, por lo que se verá afectado en la fluidez de la aleación. La temperatura no debe de exceder los 745 °C para evitar todo lo anterior.
- 3) Atmósfera con gas inerte: el uso de ésta con argón o nitrógeno, es recomendada para evitar la oxidación del metal líquido.
- 4) Procedimiento de desgasificación: Cuando se emplean retornos (sistema de colada, alimentadores, piezas incompletas, etc.) para la fusión y estos contienen niveles inaceptables de inclusiones, óxidos y gases, solamente en este caso se realiza la desgasificación de acuerdo a las recomendaciones establecidas. En caso contrario no siempre se realiza el tratamiento a menos que el requerimiento de acuerdo a la calidad de la pieza lo requiera. Este tratamiento comúnmente se realiza con gas argón.



CAPITULO III

3.1. FLUJO DE FLUIDOS EN METALES LÍQUIDOS.

El flujo de fluidos es un fenómeno de vital importancia en la comprensión del llenado de piezas de fundición a través del sistema de colada, cada uno de sus componentes individuales (bajada, corredor y entrada) y el sistema total, se comporta como un ducto o tubería a través del cual se mueve el fluido, en este caso el aluminio líquido. El diseño de los sistemas de colada se basa en estos principios fundamentales que serán descritos a continuación y los cuales tienen un efecto muy importante en el llenado completo o incompleto de la pieza de fundición.

3.1. Aplicación del número de Reynolds en los sistemas de colada.

En base a los experimentos realizados por Reynolds, se concluyó que las fuerzas del momento son función de la densidad del líquido, del diámetro de la tubería y de la velocidad media del fluido. Además, la fricción ó fuerza viscosa depende de la viscosidad del líquido. De acuerdo a ese análisis, el Número de Reynolds se definió como la relación existente entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas (o de rozamiento), el cual esta dado por la siguiente ecuación:

$$Re = \text{Fuerzas inerciales} / \text{Fuerzas viscosas} = \rho Dv / \mu = Dv / \nu \quad (1)$$

Donde; ρ y μ son la densidad y viscosidad dinámica del fluido respectivamente, v es la velocidad del fluido en cm/s, D es el diámetro del canal en cm y ν es la viscosidad cinemática la cual se define por la relación μ/ρ y esta dada en cm^2/s . Observando la ecuación (1), cuando las fuerzas viscosas tienen un efecto dominante en la pérdida de energía, el número de Reynolds (Re) es pequeño y el flujo se encuentra en el régimen laminar, de manera general el valor del Re indica el tipo de régimen (laminar, laminar-turbulento, turbulento) que se establece en un sistema dado²⁴.



La experiencia en fundición ha demostrado que para cada diseño, para cada proceso y para cada peso de pieza, existe una óptima velocidad de llenado que es necesario conocer, para obtener el tiempo óptimo de llenado. Al diseñar los sistemas de entrada de metal líquido a los moldes se requiere considerar que el flujo de fluidos puede ser a regímenes laminar o turbulento; por lo tanto, es necesario tomar en cuenta el Número de Reynolds. Durante el llenado es muy importante conocer la velocidad de flujo, ya que si no se controla se produce erosión de las paredes del molde, lo que conduce a defectos como: atrapamiento de arena (dross), de escorias (slags), a la formación de uniones frías (cold shuts), llenado incompleto (misruns) y a rugosidad superficial de la pieza (roughening).

En consecuencia, se requiere del conocimiento de la distribución de presiones en cualquier punto del sistema, por las siguientes dos razones:

- (a) Si la presión en una sección dada del sistema es menor que la atmosférica, se producirá absorción de gases o de aire en el líquido.
- (b) Para algunas aleaciones, es esencial que la presión y la velocidad en las entradas sea lo más baja posible con el objeto de reducir la turbulencia y la agitación del líquido.

3.2. APLICACIÓN DE BALANCE DE ENERGÍA EN FLUJO DE FLUIDOS.

Una de las herramientas más importante y más empleada para resolver problemas en ingeniería es el principio de conservación de energía. En flujo de fluidos, este principio generalmente es empleado como un balance de energía mecánica, el cual es comúnmente llamado teorema de Bernoulli.

3.2.1. Teorema de Bernoulli.

De acuerdo al sistema que se presenta en la Figura 3.1, la energía, E , a lo largo de una línea de flujo en un fluido puede expresarse como:

$$E = h + v^2 / 2g + P / \rho + z \quad (2)$$



Donde h es la energía potencial, $v^2/2g$ es la energía cinética, P es la presión en lb/in^2 , ρ es la densidad en lb/in^3 , z es un término que contempla todas las pérdidas de energía debido a la fricción, turbulencia y pérdida de calor ²⁵.

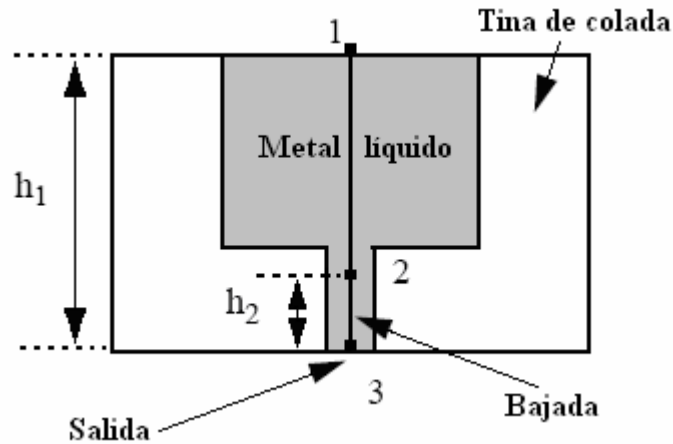


Figura 3.1. Aplicación del Teorema de Bernoulli en sistemas de colada.

Para sistemas de colada en moldes de arena las variables dependientes de velocidad, v , y presión, P , son parámetros críticos, los cuales son importantes para controlar un llenado rápido y limpio (libre de escoria e inclusiones) hacia la cavidad de la pieza. La velocidad de flujo dentro de un sistema de colada determinará el tiempo requerido para llenar la cavidad de un molde.

3.2.2. Ecuación de Continuidad.

Esta ecuación resulta del principio de conservación de masa y puede ser evaluada como ²⁶:

$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 = \text{cte}, (\text{lb/s}). \quad (3)$$

La ecuación de continuidad sólo se aplica a sistemas de paredes impermeables con llenado de fluidos incompresibles, por lo tanto, como los metales líquidos son incompresibles, se aplica sin restricciones, de tal manera que la ecuación anterior y de acuerdo a la Figura 3.2 se puede calcular el flujo volumétrico, dado que $\rho_1 = \rho_2$, se tiene entonces:

$$G_V = A_1 V_1 = A_2 V_2 = \text{cte}, (\text{ft}^3/\text{s}). \quad (4)$$



CAPITULO III

Es importante hacer resaltar que aún cuando haya turbulencia y pérdidas por fricción, la ecuación anterior se mantiene para un fluido incompresible mientras el sistema esté lleno de fluido y las paredes sean impermeables; sin embargo, como los moldes en arena son permeables, hay varias excepciones que son necesarias de discutir.

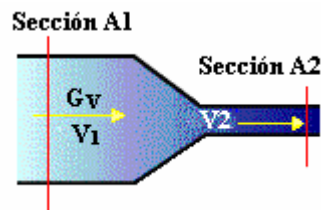


Figura 3.2. Representación de la ley de continuidad.

Para analizar el flujo vertical en un sistema presurizado, es decir, lleno de metal líquido, se elige un sistema que es un pobre diseño como se esquematiza en la Figura 3.3, donde el tiempo de vaciado, t_v , se determina usando el volumen, V , de líquido según la ecuación:

$$t_v = V / G_V = V / Av. \quad (5)$$

Donde: V es el volumen de la pieza cm^3 , G_V es el gasto volumétrico en cm^3/s , A es el área de control en cm^2 (para un sistema presurizado es el área de la entrada) y v es la velocidad en cm/s .

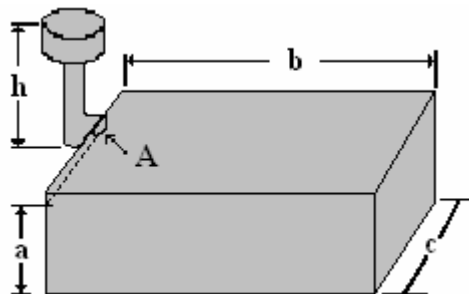


Figura 3.3. Representación de un mal diseño de colada.



3.3. SENSITIVIDAD DE LOS METALES.

Para el diseño del sistema de colada es necesario reducir la turbulencia y la aspiración de aire, lo cual es determinado en base a la sensibilidad del metal y que puede originar la formación de escoria y óxidos en el interior del sistema de colada. Cuando hay una diferencia grande entre la densidad del metal líquido y los óxidos formados, el resultado es que la escoria u óxidos formados pueden llegar a flotar y ser atrapados rápidamente en la superficie del sistema de colada. Un segundo factor importante es la facilidad con la cual el metal líquido reacciona con el aire o los gases formados debido a la mezcla de arena.

Las aleaciones de aluminio son muy reactivas con el oxígeno y forman un óxido estable (Al_2O_3). Cuando el flujo es uniforme, estos óxidos tienden a formarse. Sin embargo, cuando el flujo es turbulento, el óxido es revuelto dentro del metal líquido trasportando además burbujas de aire o gas. Además, las densidades de las aleaciones de aluminio y sus óxidos no son tan similares, por lo que es posible que los óxidos puedan flotar en el metal líquido y por consiguiente son atrapados durante la solidificación de la pieza. Las densidades de aleaciones de aluminio en estado líquido y sus óxidos se muestran en la Tabla 3.1.

Aleaciones de Aluminio	g/cm^3
Aluminio	2.41
Al_2O_3	3.96
$3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$	3.15

Tabla 3.1. Densidades de las aleaciones de aluminio y sus óxidos.

3.4. FLUIDEZ DE LOS METALES.

La fluidez, la cual representa la habilidad del metal líquido para llenar la cavidad de la pieza, depende de numerosas variables, de las más importantes se enlistan a continuación:

- La interacción de la transferencia de calor desde el metal líquido a las paredes del molde.



- El flujo de fluidos a través de varias secciones.
- El gradiente de temperatura.

La fluidez de un metal puro es diferente a una aleación, por lo tanto la solidificación también lo será, ya que se presentan diferentes mecanismos. La solidificación de un metal puro ocurre por el crecimiento del grano columnar desde las paredes del molde.

La fluidez para aleaciones Al-Si disminuye rápidamente si el % de Si disminuye, por lo que se puede observar en el diagrama de fases que la máxima fluidez se alcanza con 25% Si, que corresponde a un rango de solidificación de 180 °C, lo anterior se debe a los altos calores de fusión asociados con el silicio primario²⁷.

Por otra parte, estudios realizados por F. R. Mollard²⁸ y B. P. Betts²⁹ indican que la fluidez del metal es afectada por las propiedades del molde, un incremento en la difusividad de calor del material de moldeo disminuye la fluidez del metal, por ejemplo la fluidez es alta en moldes de arena verde con arena sílice que en moldes de arena en verde con arena de circón debido a que en estos últimos no existe humectabilidad con el metal líquido.

3.5. SISTEMA DE COLADA Y SUS COMPONENTES.

La calidad de las piezas fabricadas por moldeo en verde depende de algunos factores, incluido la calidad de la materia prima, la manera por el cual se introduce el metal líquido a la cavidad de la pieza y subsecuentemente la solidificación de la misma. Existen varias definiciones de lo que es un sistema de colada, uno de los más completos es el siguiente: un sistema de colada es un conjunto de ductos cuya función es conducir al metal líquido desde el exterior hasta la cavidad del molde (pieza), en donde el metal líquido debe de ir a una cierta presión, velocidad y flujo para disminuir la turbulencia, atrapar gases y escoria, además de evitar la erosión de la arena, para facilitar el llenado de la cavidad del molde sin la pérdida de temperatura excesiva^{30, 32}. El diseño de colada convencional recomendado por la literatura^{30, 31} se muestra en la Figura 3.4.



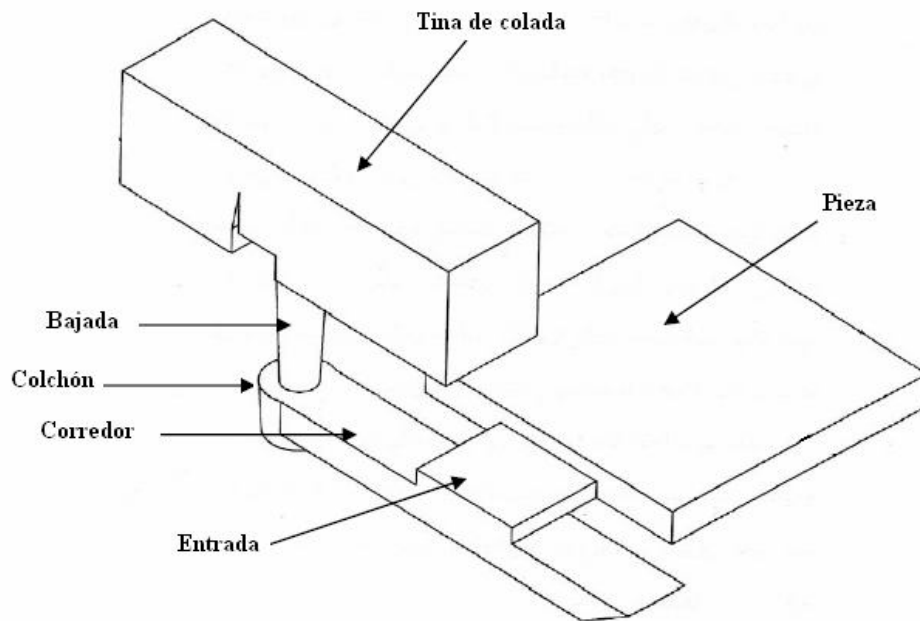


Figura 3.4. Representación de los componentes básicos y auxiliares de un sistema de colada.

Sin embargo, una de las principales recomendaciones que se tiene que considerar en el diseño del sistema de colada es que se debe de evitar una bajada larga debido a que se puede generar erosión de la arena, atrapamiento de aire y por ende se induce al flujo turbulento (Figura 3.5).

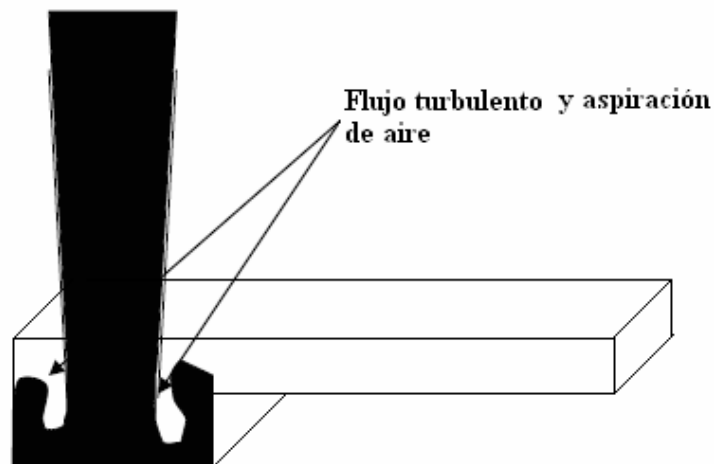


Figura 3.5. Ilustración del movimiento del metal líquido (flujo turbulento).



3.5.1. Sistemas presurizados y no presurizados.

En un sistema de colada, la velocidad de flujo es controlada por la menor área transversal en el sistema. A partir de la relación de vaciado hay dos variantes en el diseño de los sistemas de entrada al molde que clasifica los sistemas de entrada al molde como:

- (a) sistemas presurizados.
- (b), sistemas no presurizados.

La aplicación de los dos sistemas anteriores mencionados está en función de la convergencia o de la divergencia del diseño y del tipo de aleación a fabricar.

Sistema presurizado.

En un sistema presurizado la menor área transversal es localizada en las entradas, permitiendo separar la escoria, óxidos, arena, etc, antes de llegar a las entradas. En estos sistemas se presentan altas velocidades de flujo en las entradas, resultando una turbulencia en la cavidad de la pieza, además de erosión de arena.

Un método común usado para describir las dimensiones del sistema de colada es en términos de la relación de colada (bajada: corredor: entrada), o de las áreas transversales totales de la bajada, corredor(es) y entrada(s) (A_B : A_C : A_E). Las relaciones típicas de un sistema presurizado son: 4:4:1 y 2:3:1, por lo que el área de la entrada controla el flujo del metal líquido.

En los sistemas presurizados se debe mantener una presión sobre el sistema de entradas mediante el control del flujo por restricción del fondo de la bajada; esto puede lograr convergencia en el flujo metálico con relaciones que pueden ser $A_B > A_C = A_E$ o $A_B < A_C > A_E$; en este caso, el metal líquido llena completamente la geometría del sistema, incluida la bajada.

Sistema no presurizado.

En un sistema no presurizado la menor área transversal es localizada en la base de la bajada, esto inmediatamente establece la velocidad del flujo, por lo tanto se minimiza la turbulencia y la aspiración de gases.



En estos sistemas, la restricción primaria en el flujo de metal líquido es a partir de la reducción en la sección transversal total de los corredores debido a su divergencia mediante la relación $A_B < A_C = A_E$; haciendo que el metal líquido llene completamente o no al sistema de entradas al molde. Las relaciones de colada más comunes en un sistema no presurizado son: 1:2:4 y 1:4:4. La aplicación de la ley de continuidad muestra que la velocidad puede ser reducida en mayor grado en los corredores y entradas y por ende reducir o minimizar la turbulencia y la erosión del molde.

La reducción en la velocidad es efectiva en la separación de impurezas las cuales son colectadas y adheridas en la superficie del corredor.

3.6. FACTORES QUE AFECTAN AL TIEMPO DE VACIADO.

Entre los parámetros que afectan al cálculo del tiempo de vaciado se tienen: (a), el diseño de los sistemas de colada; (b), la fluidez del metal o de la aleación en estado líquido; (c), las características de la pieza, como geometría, espesor, y tamaño; (d), las propiedades térmicas del molde; (e), la presión metalostática; y (f), la necesidad de obtener gradientes térmicos controlados dentro de la pieza a producir.

Dado que el control del flujo de llenado de los molde está controlado principalmente por la menor área, es necesario expresar el balance entre las dimensiones del fondo de la bajada, de los corredores y de las entradas en función de las relaciones entre las áreas de sus secciones transversales, para constituir lo que se denomina relación de flujo de vaciado o relación de colada: $A_B : A_C : A_E$ (área transversal total de la bajada : área transversal total del corredor : área transversal total de la entrada).

Cuando en el sistema de entradas al molde hay múltiples entradas, digamos i entradas, $A_E = \sum A_{Ei}$; se puede ver que en un sistema presurizado, los corredores y las entradas están siempre llenos de metal líquido, pero las velocidades del flujo son diferentes en ellas, excepto si todas tienen la misma área; la situación de diferentes velocidades es más factible que aparezca en sistemas divergentes o sistemas no presurizados donde puede suceder que no haya o que haya



flujo parcial de metal líquido a través de algunos canales de entrada a la pieza; lo cual obliga a realizar un cuidadoso diseño.

Los sistemas presurizados, a pesar de requerir menor cantidad de material, producen altas velocidades en los canales de entrada y por lo tanto puede producirse una severa turbulencia, a menos que se establezca un controlador de flujo; la turbulencia puede ser más severa en zonas donde hay cambios de dirección del flujo o en esquinas, lo que produce atrapamiento de gases, formación de escorias, y erosión de las paredes del molde.

En resumen, los métodos conocidos para determinar el tiempo de vaciado, se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- 1.- Métodos basados en determinar la velocidad de llenado del molde.
- 2.- Métodos basados en que el tiempo de llenado depende de los siguientes factores: peso de la pieza, su espesor, y su altura, entre otros; considerando fórmulas empíricas o nomogramas. Su rango de aplicación es limitado porque sólo permiten determinar los tiempos promedio de vaciado, sin indicar los límites permisibles.

3.7. DISEÑO Y CÁLCULO DEL SISTEMA DE COLADA.

Para el requerimiento de piezas de aluminio de buena calidad es necesario considerar el flujo de fluidos y el diseño del sistema de colada. No existe un método de cálculo general para un sistema de colada, sin embargo existen fórmulas, gráficas, tablas, etc., que permiten disminuir errores y determinar las dimensiones normales de un sistema de colada, evitando numerosos defectos.

La mayoría de los métodos de cálculo para los sistemas de colada para piezas de aluminios, además de utilizar lo mencionado en el párrafo anterior, se basan esencialmente en ecuaciones de dinámica de fluidos.

Las ecuaciones básicas en los cuales se apoyan estos métodos toman como inicio el cálculo de la velocidad en la bajada:

$$V_B = f_r \sqrt{2Hg} \quad (6)$$



Donde f_r es el factor que corrige las pérdidas de velocidad debidas a la fricción, g es la aceleración de la gravedad y H es la altura de la caja superior (cope). Por lo general H es corregida o calculada en base a la ubicación de la pieza con respecto a la línea de partición (ver Figura 3.6).

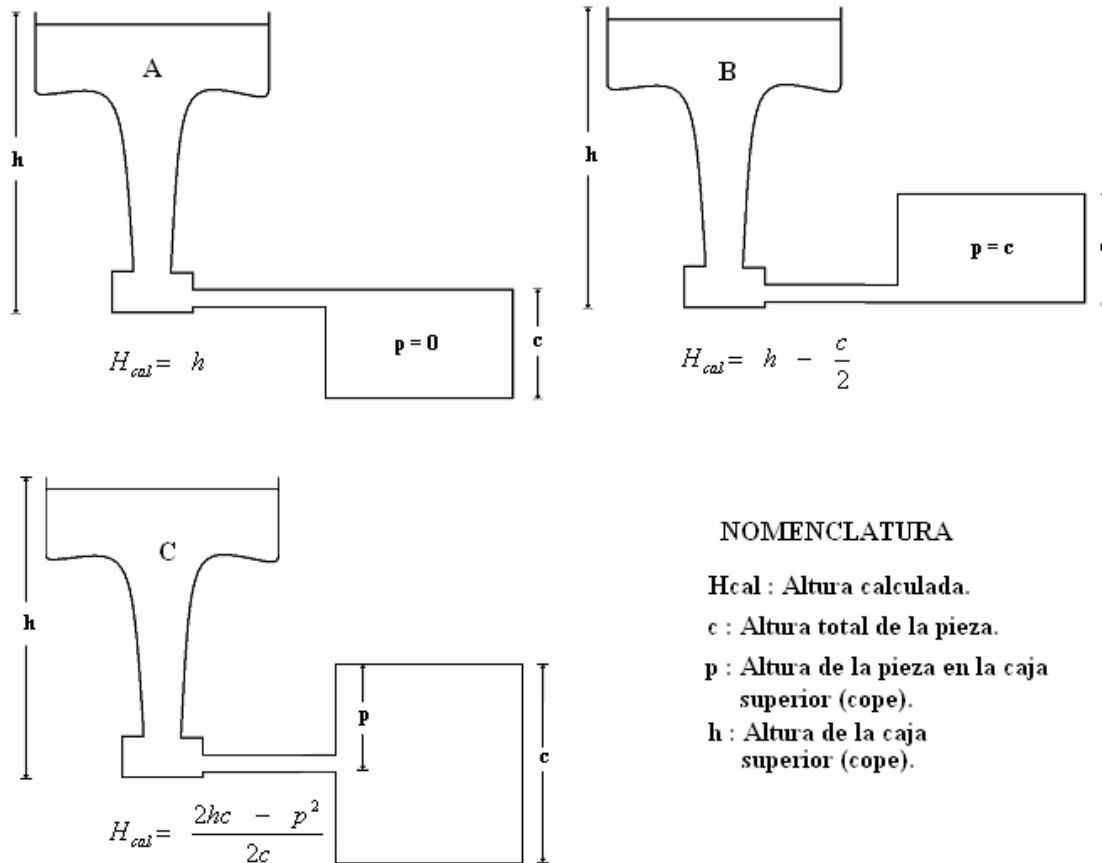


Figura 3.6. Representación de los diferentes sistemas de colada para el cálculo de la altura calculada.

A continuación se describen brevemente algunos de los métodos de cálculo para el diseño del sistema de colada:



3.7.1. Método I.

Se usan medidas estándar para los diámetros de la bajada, comúnmente de 15, 18, 20 22, 25, 30 y 35 mm.

Para el caso de piezas altas y pesadas, el llenado de las mismas se resuelven empleando copas ó tinas de colada, lo que permite realizar una colada con flujo progresivo.

La elección del tiempo de llenado (t_{ll}) para piezas inferiores a 10 kg., depende de la aleación, del tipo del sistema de colada y sobre todo del espesor crítico (e) de la pieza³².

3.7.2. Método II.

Este método presenta algunas recomendaciones a considerar en el diseño de colada:

La bajada tiene una geometría cónica, con una conicidad de ¼ de pulgada por pie de altura. Los corredores, entradas y accesorios como la tina de colada deben de ser elaborados con arena para corazones. Es recomendable hacer una extensión a los corredores, además deben de tener una geometría semicircular y el área de su sección transversal debe de ser cuatro veces el área transversal de la bajada. Los corredores deben estar colocados por debajo de la línea de partición y las entradas por encima de la misma.

Si el diseño de colada presenta varias entradas, para obtener gastos aproximadamente iguales en todas el tamaño del corredor se reduce después de cada entrada.

La ecuación que describe el principio de la relación de colada es:

$$W = KA_B\sqrt{H} \quad (7)$$

Donde W es el gasto (lb/s), A_B es el área mínima de la bajada (in^2), H es la altura de la bajada (in) y K es el coeficiente de orificio, el cual depende de la relación del área de la bajada (A_S) y de la entrada (A_E), es decir; $K = A_S / A_E$.

La información de la formula anterior junto con la Tabla 3.2 y la Figura 3.7 pueden utilizarse para diseñar el sistema de colada de una pieza determinada. La información reportada fue obtenida experimentalmente del diseño de moldes específicos y los resultados se dan como factores significativos para presentar el diseño del sistema de colada³³.



Diámetro de la bajada (in).	Área de la bajada (in ²).	Área del corredor (in ²).	Área total de las entradas (in ²).	K.	Gasto aproximado. (lb/s).
0.50	0.196	0.785	0.785	2.25-2.5	1.07-1.19
0.625	0.307	1.228	1.228	2.25-2.5	1.68-1.86
0.750	0.442	1.765	1.765	2.25-2.5	2.41-2.68

Tabla 3.2. Gastos y áreas del sistema de colada para una relación 1:4:4.

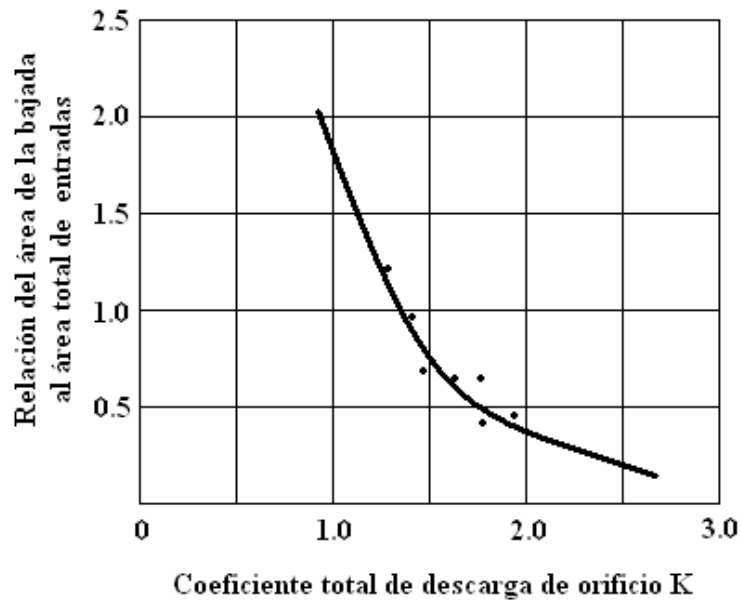


Figura 3.7. Relación del coeficiente de descarga de orificio con la relación área de la bajada al área total de las entradas.

3.7.3. Método III.

El presente método menciona el diseño del sistema de colada y de alimentación, por lo que éste último diseño no se menciona.

Las recomendaciones de este método para el diseño de colada son las siguientes:

- Las piezas deben de tener ángulos de salida.
- Establecer la línea de partición para decidir la manera en que será moldeada la pieza.



- Decidir el número de entradas y enfriadores que la pieza requiera.
- Establecer las dimensiones del sistema de colada en base a la utilización de nomogramas.
- Seleccionar la relación de colada de acuerdo a las siguiente: (a) relación de colada 1:1:1.5, utilizada para velocidades de llenado grandes y (b) relación de colada 1:3:3, empleada para velocidades de llenado lentas.
- Calcular las dimensiones del corredor tomando en cuenta el área de la base de la bajada, la relación de colada y que la altura debe ser 1.5 veces mayor que el ancho.
- Calcular las dimensiones de la entrada, considerando el ancho por lo menos 3 veces el espesor, la longitud debe ser mayor que el ancho.
- Calcular las dimensiones del colchón, el diámetro debe de ser 1.5 veces mayor que el espesor del corredor y su profundidad 1.5 veces la altura del corredor.

Uno de los parámetros para el cálculo del dimensionamiento del sistema de colada es el coeficiente de descarga, el cual se calcula como:

$$v_R = Dv_T \quad (8)$$

Donde D es el coeficiente de descarga, v_R y v_T son las velocidades reales y teóricas respectivamente ³⁴.

3.7.4. Método IV.

El diseño del sistema de colada debe de cumplir con lo siguiente:

- Asegurar un llenado lento del molde (sin turbulencia), para evitar la succión de aire, desmoranamiento del molde, atrapar inclusiones no metálicas.
- Contribuir a la evacuación del aire de la cavidad del molde.

Algunas de las recomendaciones que menciona éste método son:

- Para obtener piezas de calidad, la velocidad del metal líquido durante el llenado del molde no debe de exceder 150 cm/s.
- Las relaciones de colada recomendadas son: 1:2:3, 1:2:4, 1:3:6.



- Para reducir la velocidad del metal líquido, la bajada se hace en forma de zig-zag.
- Utilizar filtros cerámicos para atrapar la escoria.

Para el cálculo del sistema de colada se efectúa de la siguiente manera ³⁵:

- El área de la bajada se determina mediante el uso de nomogramas (ver Figura 3.8). Con la altura (escala I) y la masa de la pieza (escala III), se intercepta a la escala IV y por otro lado se une este punto con una línea que va desde el valor del espesor de la pieza (escala II) y esta línea se prolonga hasta la intercepción con la escala V, por lo que este punto representa el área de la bajada para la pieza a fabricar.

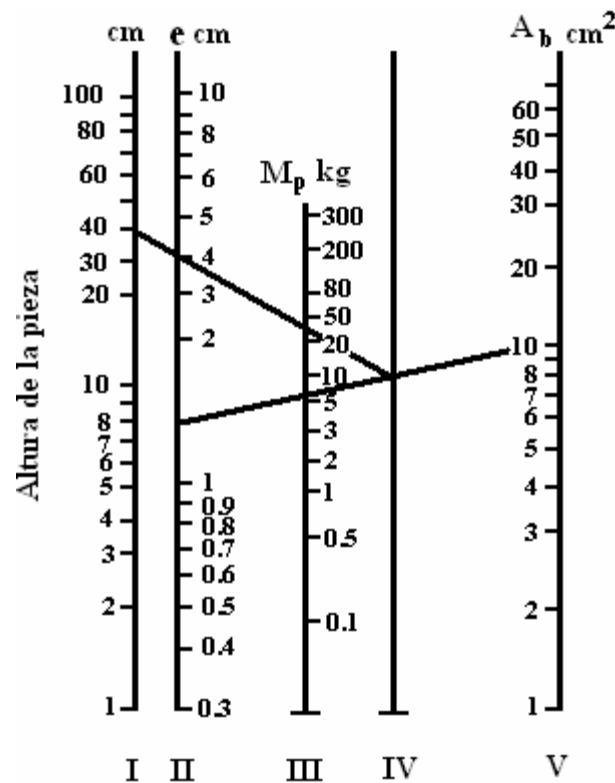


Figura 3.8. Nomograma para el cálculo de las dimensiones del sistema de colada para aleaciones de aluminio. M_p es la masa de la pieza, e es el espesor y A_b es el área de la bajada.



3.7.5. Cálculo del sistema de colada por el método de la AFS (American Foundrymen's Society).

Este método establece primeramente que para el diseño de colada en aluminio y sus aleaciones se parte de sus características metalúrgicas ³⁶:

- Gran tendencia a atrapar escorias e impurezas.
- Facilidad para atrapar gases y escoria, formadas y arrastradas por turbulencia en el metal líquido.
- Facilidad de absorción de gases.
- Contracción durante la solidificación.
- Alta conductividad térmica.
- Oxidación del metal.
- Dificultad para eliminar microporosidades.

Por lo que las funciones principales del diseño del sistema de colada son:

1. Reducir la turbulencia en el flujo del metal líquido a través del sistema de colada y dentro de la cavidad de la pieza.
2. Eliminar la entrada de aire o gases formados dentro del molde por el metal líquido.
3. Disminuir la velocidad del flujo del metal líquido, para evitar la erosión de la arena, minimizar la turbulencia y evitar la flotación de óxidos y escoria.

En base a estudios realizados por la American Foundrymen's Society (AFS) ³⁶, el sistema óptimo que se encontró es el siguiente:

1. Relación de colada no presurizada.
2. Uso de tina de colada.
3. Uso del colchón.
4. Colocación de los corredores por debajo de la línea de partición y entradas por encima.
5. Extensión del corredor.



El método de la AFS parte de conocer primeramente el peso y espesor crítico de la pieza, el cual se considera como el espesor de menor dimensión. Posteriormente se emplea una gráfica como la que se observa en la Figura 3.9 en la cual se muestran 3 tipos de correlaciones que están íntimamente ligadas por el peso y espesor de la pieza. De estas correlaciones se obtiene el gasto másico (G_m). Con el dato anterior y utilizando la densidad de la aleación (ρ), el coeficiente de descarga (C_D), la aceleración de la gravedad (g) y la altura corregida (H_{CAL}) se inicia el cálculo del sistema de colada.

**GASTO MÁSSICO
PARA
PIEZAS DE ALUMINIO**

- ① Espesores por debajo de 1/4 plg: $G_m = 1.48\sqrt{w_p}$
- ② Espesores de 1/4 a 7/16 plg: $G_m = 1.25\sqrt{w_p}$
- ③ Espesores por arriba 7/16 plg: $G_m = 0.698\sqrt{w_p}$

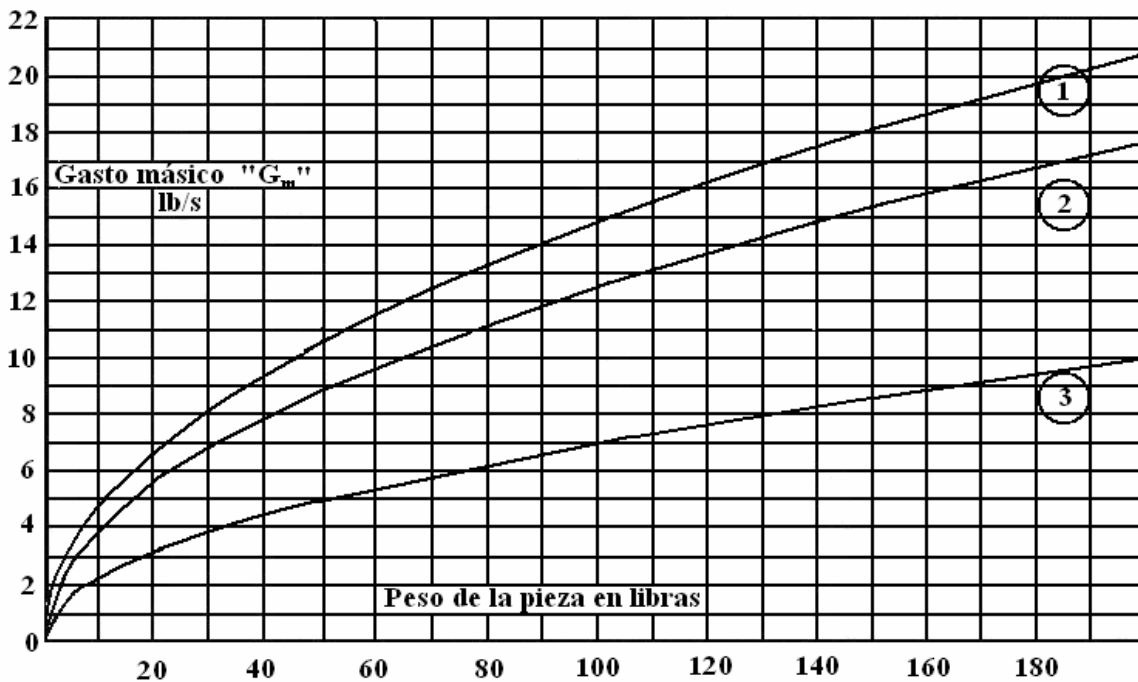


Figura 3.9. Gráfico para la determinación del gasto másico en función del peso y del espesor crítico de la pieza (congreso AFS) ³⁶.

Por lo que la secuencia para el cálculo del sistema de colada es la siguiente:



1. El primer paso es determinar el flujo másico, el cual está en función del espesor crítico de la pieza, y se obtienen las correlaciones para determinar el flujo másico (Figura 3.9)
2. Cálculo del área transversal inferior de la bajada: se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$A_{IB} = \frac{G_m}{\rho C_D \sqrt{2gH_{cal}}} \quad (9)$$

Donde G_m es el flujo másico en g/s, ρ es la densidad de la aleación en g/cm³, C_D es el coeficiente de descarga el cual contempla las pérdidas de energía y es adimensional, g es la aceleración debido a la gravedad expresada en cm/s² y H_{cal} es la altura corregida en función de la posición de la pieza respecto a la línea de partición (ver Figura 3.6)

3. Cálculo de las áreas transversales del canal (corredor) y entrada: el área transversal de cada uno de estos componentes se calcula en base a la relación de colada definida inicialmente (A_b : A_c : A_e). Posteriormente se calcula el área superior de la bajada como:

$$A_{IB} = A_{SB} \sqrt{\frac{h}{b}} \quad (10)$$

Donde h y b es la altura del cope y de la tina de colada respectivamente.

4. Calculo de las dimensiones del canal y la entrada: las dimensiones del alto y ancho del canal, se pueden considerar de sección rectangular con relación ancho-espesor 2:1 ó 3:1 y se calculan en base al área total del canal y del número de canales en el sistema de colada, observar Figura 3.10.

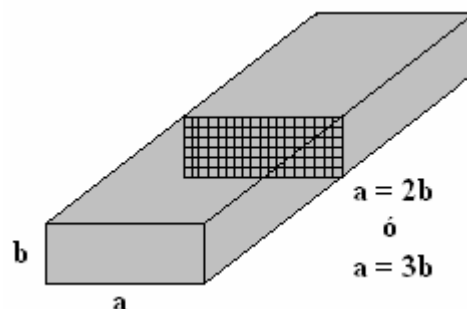


Figura 3.10. Dimensiones del (los) canal (es) y de la (las) entrada (s).

5. Cálculo de las dimensiones del colchón: se realiza en base a recomendaciones de trabajos experimentales³⁶ en los cuales esta geometría ha generado buenos resultados (observar Figura 3.11), la relación para su dimensionamiento está dada por:

$$A_{\text{colchón}} = 5 \times A_{IB} \quad (11)$$

Donde A_{IB} es el área inferior de la bajada en cm^2 y b es la altura del canal en cm.

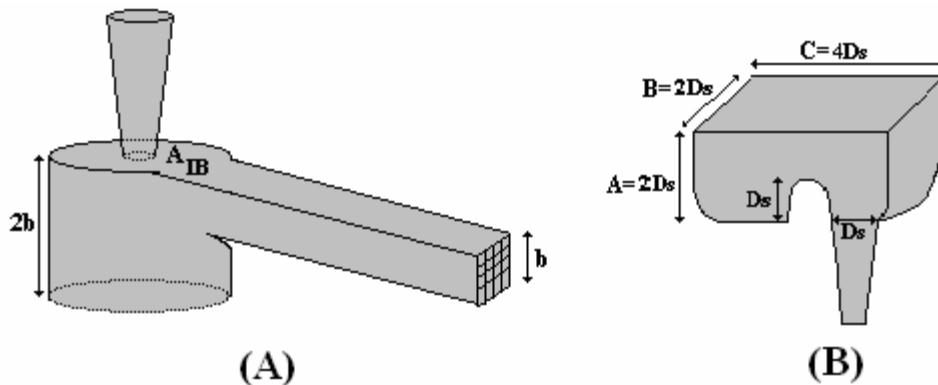


Figura 3.11. Relación recomendada para: (A) el dimensionamiento del colchón o extensión y (B) tina o copa de llenado.

6. Cálculo de la tina de colada: las dimensiones recomendadas para la tina de colada se muestran en la Figura 3.11, el diseño se hace en base al diámetro superior de la bajada (D_{SB}).



CAPITULO IV

DESARROLLO EXPERIMENTAL.

El desarrollo experimental de este trabajo de investigación comprende las siguientes etapas:

1. Fabricación y caracterización de lingotes de composites A356/10 % SiCp y A356/15 % SiCp por el método vórtice.
2. Diseño experimental.
3. Cálculo, diseño y elaboración de los sistemas de colada.
4. Control de la mezcla de moldeo en verde y elaboración de los moldes.
5. Instrumentación del molde para la adquisición de datos.
6. Refusión de los MMC's (técnica de fusión) y colada.
7. Adquisición de datos
8. Presentación e interpretación de datos.

Como referencia se estudió el comportamiento de la aleación A356 sin reforzar, el cual fue comparado con el de los composites reforzados con 10 y 15% en volumen de SiCp para cada una de las relaciones de colada seleccionadas en el diseño experimental. La tesis comprende el estudio y análisis de las siguientes variables:

- Evaluación de la velocidad experimental promedio de la matriz y de los composites a través de los sistemas de colada propuestos.
- Evaluación de los números de Reynolds globales en los sistemas de colada propuestos.
- Evaluación del gasto volumétrico en el sistema de colada.
- Determinación del tiempo de llenado.



4.1. MATERIALES Y EQUIPO.

El material y equipo que se empleó para la fase experimental de este trabajo, se lista a continuación:

MATERIALES.

- Aleación matriz: aleación comercial A356, la composición química se muestra en la Tabla 4.1.
- Reforzante: partículas de SiC de tamaño promedio 38 - 45 micras.
- Agente modificador: aleación maestra Al-10% Sr.
- Crisol de carburo de silicio tamaño A12.
- Arena sílica de granulometría AFS 100-110.
- Bentonita cálcica y bentonita sódica.
- Alambre para termopar tipo K.
- Bifilares cerámicos para alambre de termopar.
- Aspas para agitación.
- Lanza para introducción del modificador.
- Pintura de zirconio.
- Solución de tartrato de amonio al 2%.
- Ácido clorhídrico al 0.5%.

EQUIPO.

- Balanza analítica.
- Tacómetro digital.
- Sistema de adquisición de datos Iotech tempscan 1100.
- Horno de resistencia eléctrica con controlador de temperatura.
- Microscopio metalográfico.
- Sistema de adquisición y análisis de imágenes.
- Espectrómetro de emisión atómica (AAS).



CAPITULO IV

- Discos de corte de diamante.
- Cortadora de disco.

	% Si	% Fe	% Cu	% Mn	% Mg	% Zn	% Ni	% Cr	% Pb
ȳ	7.14	0.677	0.373	0.174	0.372	0.224	0.020	0.025	0.030
	% Ti	% V	% Co	% Sr	% Al				
ȳ	0.026	0.009	<0.002	0.0002	90.9				

Tabla 4.1. Composición química de la aleación, obtenida por espectrometría de emisión atómica.

4.2. FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LINGOTES DE COMPOSITOS A356/10 % SiCp Y A356/15 % SiCp POR EL MÉTODO VÓRTICE.

Para la fabricación de los compositos se utilizó un horno eléctrico de resistencia dentro del cual se colocó un crisol de carburo de silicio, una vez precalentado a 700 °C se colocaron lingotes de aleación comercial A356, simultáneamente se precalentó el SiCp a 450 °C en una mufla.

Una vez fundida la aleación y alcanzada la temperatura de trabajo (780±10 °C), se retira la escoria y se introduce la cantidad suficiente de modificador (Al-10Sr) para incorporar 0.08 % Sr al metal líquido, para ello se utiliza una lanza y posteriormente se agita durante 2 minutos. Después de la agitación se retira nuevamente la escoria generada y el horno se coloca en el dispositivo utilizado para la fabricación de los MMC's.

El SiCp previamente precalentado y colocado en el contenedor del dispositivo (ver Figura 4.1), se empieza a adicionar directamente sobre el vórtice generado por el aspa que agita el metal líquido, la velocidad de agitación fue del orden de 1000 r.p.m. Para la generación del vórtice se utiliza una aspa cuyos alabes están cubiertas por fibra moldeable refractaria y pintadas con pintura de zirconio base alcohol.



CAPITULO IV

El tiempo de incorporación del SiCp fue entre 7 y 9 minutos para el compuesto con 10 % de SiCp y entre 9 a 11 minutos para el compuesto con 15 % de SiCp. Por último se retiró la escoria y se realizó la colada a lingoteras metálicas.

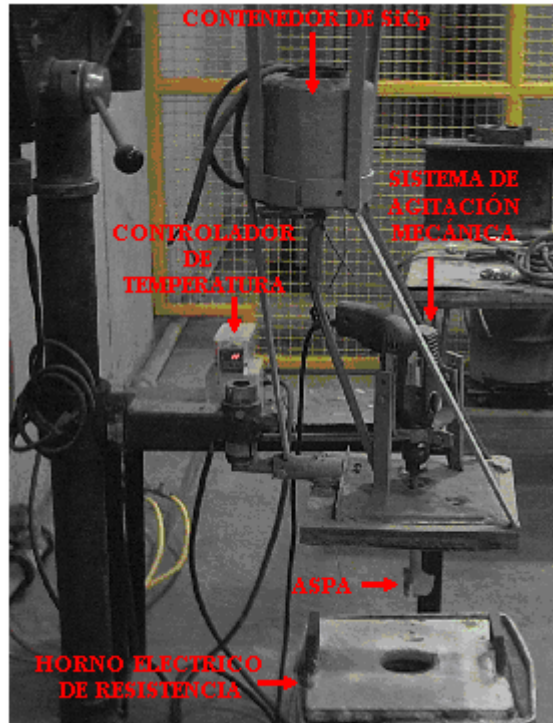


Figura 4.1. Dispositivo empleado para la fabricación de los composites con 10 y 15 % SiCp.

4.3. DISEÑO DE EXPERIMENTOS.

Se optó por considerar un diseño de experimentos factoriales de dos factores, el cual puede contemplar más de dos niveles en ambos factores.

El arreglo de datos para el diseño factorial de dos factores se muestra en la Tabla 4.2. Se observa que hay “n” replicas del experimento y cada una de ellas contiene todas las “AB” combinaciones de tratamiento.



		Factor B (% SiCp)		
		1	2	3
Factor A (Relación de colada)	1	Y ₁₁₁ , Y ₁₁₂ , Y ₁₁₃	Y ₁₂₁ , Y ₁₂₂ , Y ₁₂₃	Y ₁₃₁ , Y ₁₃₂ , Y ₁₃₃
	2	Y ₂₁₁ , Y ₂₁₂ , Y ₂₁₃	Y ₂₂₁ , Y ₂₂₂ , Y ₂₂₃	Y ₂₃₁ , Y ₂₃₂ , Y ₂₃₃

Tabla 4.2. Arreglo del diseño de experimentos en este trabajo.

Si se observa la tabla anterior, “Y” representa un experimento, el primer número (subíndice) representa la relación de colada, siendo 1 para la RC1 = 1:2:3 y 2 para la RC2 = 1:1.5:2. El segundo número representa el % de SiCp, 1, 2 y 3 corresponden a la aleación sin reforzar, compuesto con 10 y 15 % SiCp respectivamente. Por último el tercer número representa las réplicas del experimento.

4.4. CÁLCULO, DISEÑO Y ELEBORACIÓN DEL SISTEMA DE COLADA.

Los datos requeridos para el cálculo del sistema de colada se muestran en la Tabla 4.3.

Densidad de la aleación A356 (g/cm ³)	2.67
Altura de la pieza (cm)	8
Diámetro de la pieza (cm)	4
Volumen de la pieza (cm ³)	100.53
Peso de la pieza (g)	268.415

Tabla 4.3. Datos para el cálculo de los sistemas de colada.

Las relaciones de colada A_b: A_c: A_e (área transversal de la bajada: área transversal del canal o corredor: área transversal de la entrada) utilizadas en este trabajo fueron:



1. Relación de colada uno (RC_1): 1:2:3.
2. Relación de colada dos (RC_2): 1:1.5:2.

4.4.1. Cálculo de las dimensiones del sistema de colada (Método AFS).

Para la relación de colada 1:2:3.

El método empleado para el cálculo del sistema de colada se basa en el método AFS (American Foundrymen's Society) ³¹, el cual se describió en el capítulo anterior. La metodología de dicho cálculo aplicado a la pieza en estudio se menciona a continuación:

1. Proponer las relaciones de colada ($RC1 = 1:2:3$ y $RC2 = 1:1.5:2$).
2. Establecer las dimensiones de la caja de moldeo y de la pieza (ver Figura 4.2).
3. Elegir la posición de la pieza a partir de la línea de partición.
4. Determinar el flujo másico (g/s): de acuerdo al espesor crítico de la pieza en estudio ($4\text{cm} = 1.57\text{ in}$) se aplica la siguiente correlación: $G_m = 0.698\sqrt{w_p}$, donde w_p es el peso de la pieza en libras.
5. Calcular H_{cal} (altura corregida) a partir de la posición de la pieza en la línea de partición (ver Figura 4.2).

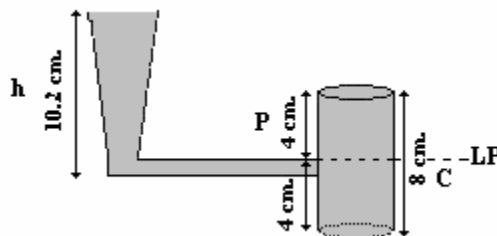


Figura 4.2. Representación esquemática de la posición de la pieza a partir de la línea de partición.

6. Calcular el área inferior transversal de la bajada, considerando un C_D igual a uno.
7. Calcular las áreas de los otros componentes básicos del sistema de colada (corredor y entrada).



8. Calcular los componentes auxiliares del sistema de colada (tina de colada y colchón): para ambos casos se tomo la relación ancho-espesor: 2:1
9. Elaborar y colocar los componentes básicos y auxiliares del sistema de colada así como la pieza en la placa modelo para cada relación propuesta.

Los resultados obtenidos para los componentes básicos y auxiliares de cada sistema de colada, se muestran en la Tabla 4.4.

Componentes del sistema de colada.	RC1	RC2
*Área transversal de la bajada (cm ²).	0.68	0.68
*Área transversal del corredor (cm ²).	1.36	1.02
*Área transversal de la entrada (cm ²).	2.04	1.36
*Diámetro superior de la bajada (cm).	1.30	1.30
*Ancho-espesor del corredor (cm).	1.66-0.83	1.42-0.71
*Ancho-espesor de la entrada (cm).	2.02-1.01	1.66-0.83
Largo-ancho de la tina de colada (cm).	5.20-2.60	5.20-2.60
Altura de la tina de colada (cm).	2.60	2.60
Área del colchón (cm ²).	3.40	3.40
Altura del colchón (cm).	1.66	1.42

Tabla 4.4. Valores calculados para los componentes básicos (*) y auxiliares del sistema de colada para la RC1 = 1:2:3 y RC2 = 1:1.5:2.

4.4.2. Modelo de la pieza de fundición

La placa modelo se muestra en la Figura 4.3, en la cual se puede observar la pieza a fabricar junto con los componentes del sistema de colada. También se indica la colocación de cada uno de los termopares.





Figura 4.3. Placa modelo conteniendo la pieza y los componentes del sistema de colada.

4.5. CONTROL DE LA MEZCLA DE MOLDEO EN VERDE Y ELABORACIÓN DE LOS MOLDES.

Para la elaboración de los moldes se determinó el punto temper para un contenido de bentonitas totales del 10% (6% de bentonita cálcica y 4% de bentonita sódica), por lo que a continuación se muestra la relación de los componentes principales del proceso de moldeo en verde:

- Arena sílica con número AFS de 100-110.
- Bentonitas: 10 % (6% de bentonita sódica y 4% de bentonita cálcica).
- Humedad: 3.5%.

4.6. INSTRUMENTACIÓN DEL MOLDE PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS.

Dentro de los componentes del sistema de colada se colocaron termopares estratégicamente: dos termopares en el sistema de colada (denotados por T1 y T2) y con respecto a la cavidad de la pieza se emplearon otros dos (denotados por T3 y T4) como se muestra en la Figura 4.4. La posición de cada termopar fue la siguiente:



- T1: se colocó en la parte superior de la bajada de manera que el termopar sobresaliera unos 4 mm. a partir de la pared del molde.
- T2: se colocó en el final de la entrada en la parte inferior de la cavidad de la misma de manera que la punta del termopar sobresaliera unos 2 mm.
- T3: se colocó en la parte inferior central de la cavidad de la pieza de manera que la punta del termopar sobresaliera 2 mm.
- T4: Se colocó en la parte superior derecha de la cavidad de la pieza, la punta del termopar se encuentra a una distancia de aproximadamente de 4mm.de la cavidad del molde.

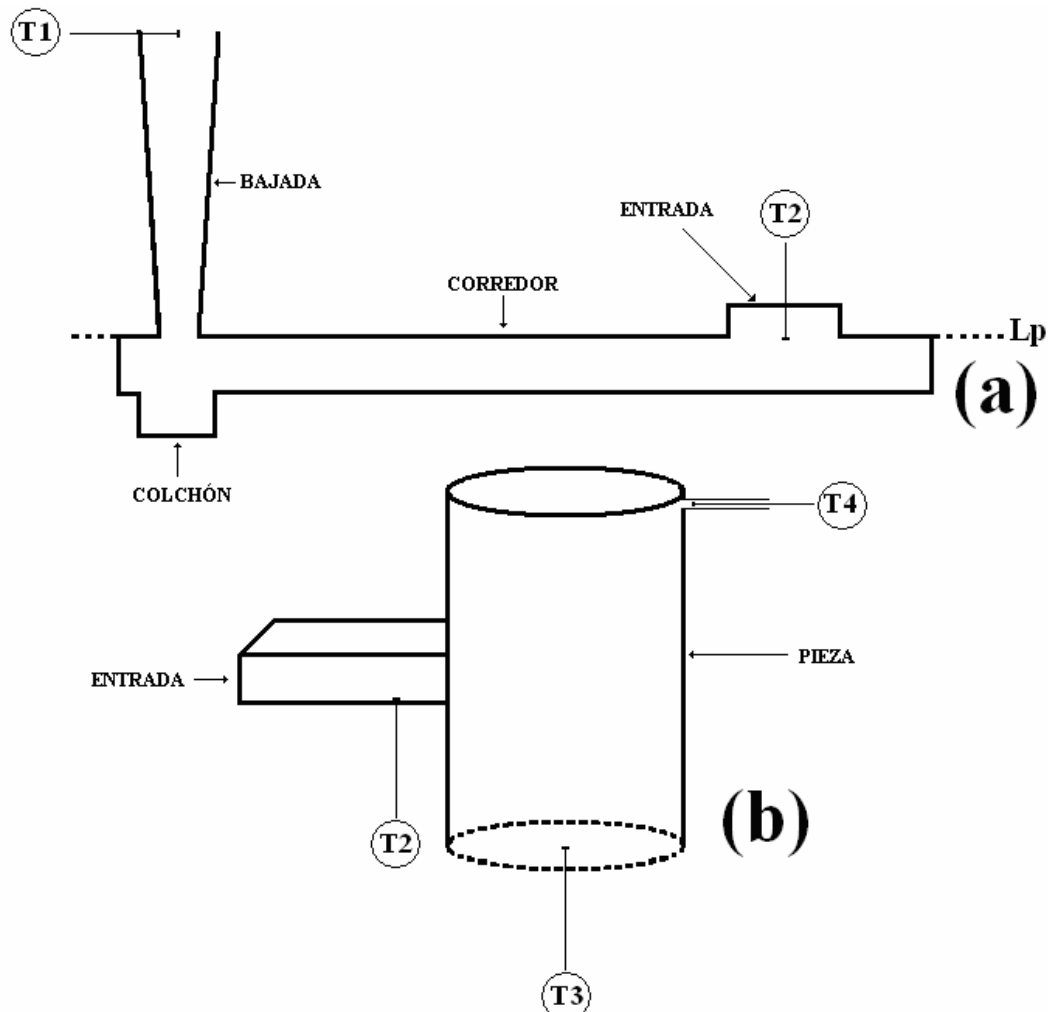


Figura 4.4. Representación esquemática de los termopares colocados dentro del sistema de colada y de la pieza. (a) Corte longitudinal del sistema de colada, (b) Vista lateral de entrada y pieza.



4.7. REFUSIÓN DE LOS MMC's (TÉCNICA DE FUSIÓN) Y COLADA.

La refusión de los MMC's se llevó a cabo en un horno de resistencia con controlador de temperatura.

La técnica de fusión que se empleó durante la refusión de los MMC's se indica a continuación:

1. Corte de los lingotes.
2. Pre calentamiento de los lingotes.
3. Carga al crisol.
4. Temperatura de trabajo: 820 °C.
5. Tratamiento al metal líquido: se llevó a cabo una desgasificación con argón en un rango de tiempo de 10 a 12 minutos.
6. Generación del vórtice inyectando argón.
7. Alcanzar temperatura de colada: 720 ± 5 °C.
8. Vaciado a moldes.

4.8. ADQUISICIÓN DE DATOS.

Para la adquisición de datos fue necesario emplear el equipo del sistema de adquisición de datos Iotech tempscan 1100. Los pasos para tal adquisición se muestran a continuación:

- Conexión del adquisidor de datos a una PC.
- Conexión de los termopares colocados en el molde de arena al equipo de adquisición de datos.
- Configuración del programa del adquisidor de datos.
- Creación del archivo de trabajo.
- Establecer el tiempo mínimo y total de adquisición de datos.

Lo anterior se puede visualizar en la Figura 4.5.



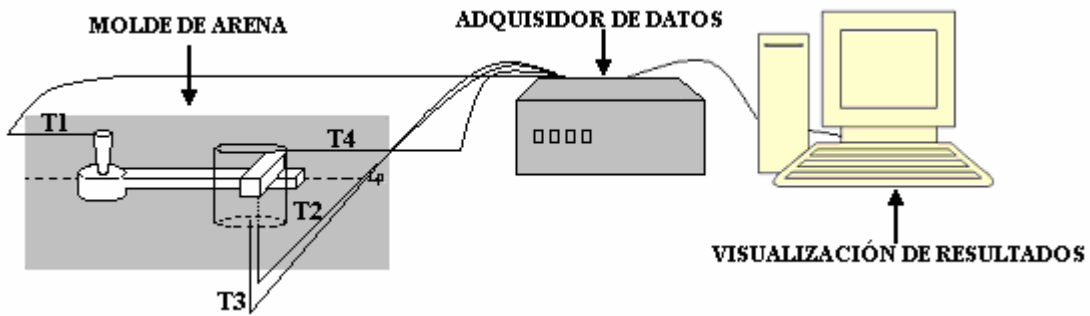


Figura 4.5. Representación esquemática del arreglo experimental usado.

Antes del llenado de los moldes, se activaba el equipo del sistema de adquisición de datos.

4.9. PRESENTACIÓN E INTERPRETACIÓN DE DATOS ADQUIRIDOS.

Para la presentación de los datos adquiridos fue necesario tomar los datos generados por el adquisidor y posteriormente generar todas las curvas (temperatura vs. tiempo) de cada uno de los termopares colocados dentro del sistema de colada y de la pieza.

La interpretación de los datos se muestra a continuación con una gráfica típica, ver Figura 4.6, obtenida por el análisis térmico durante el desarrollo de este trabajo.

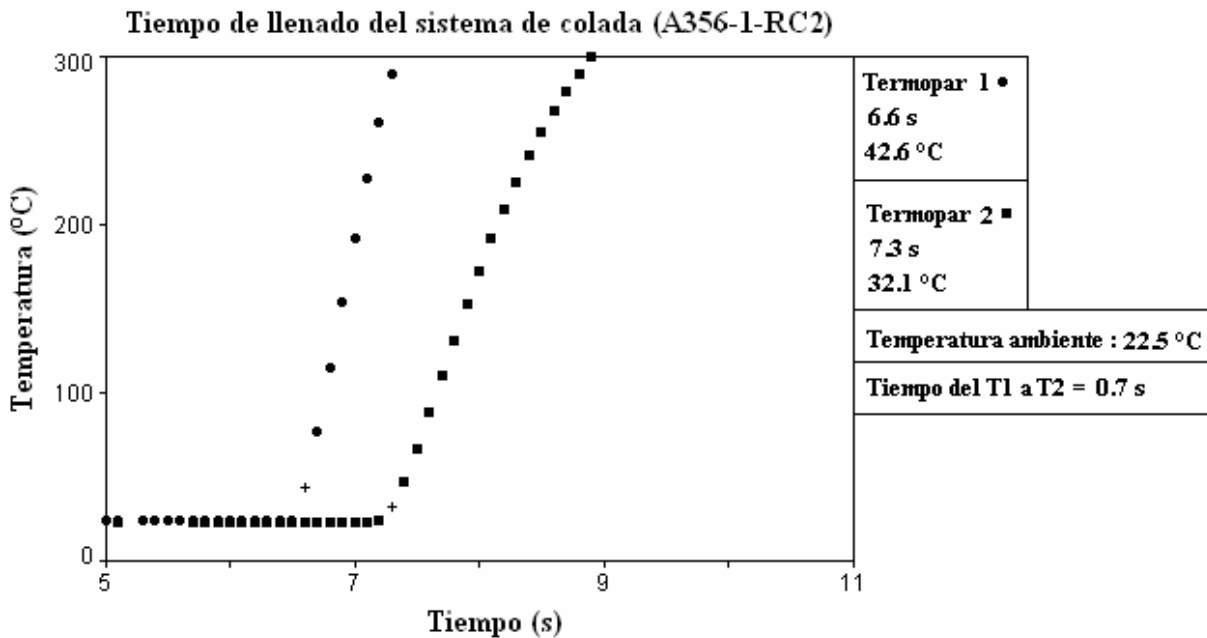


Figura 4.6. Datos graficados para la obtención del tiempo en la bajada para el termopar 1 y 2.



Antes de iniciar la interpretación de la figura anterior es necesario señalar que la adquisición de cada dato de temperatura fue tomada cada 0.1 s, es decir 10 datos cada segundo. En la figura anterior se puede apreciar que inicialmente la temperatura es constante ($22.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) en ambos termopares. Posteriormente se nota que la temperatura del termopar 1 se incrementa a $42.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ cuando el tiempo de adquisición corresponde a 6.6 s., mientras que para el termopar 2 la temperatura se incrementa ($32.1\text{ }^{\circ}\text{C}$) cuando el tiempo de adquisición es de 7.3 s., por lo que se puede considerar que el tiempo que tarda en pasar el metal líquido del termopar 1 al 2 es de 0.7 s. De lo anterior cabe señalar que cuando el metal líquido toca al termopar no necesariamente el cambio de temperatura es instantáneo debido a que existe un tiempo de respuesta por parte del equipo (que no se conoce), es por esto que se considera tomar los tiempos a partir del cambio de pendiente (incremento de temperatura) de las gráficas, de manera que se tendrá el mismo error en ambos termopares al tomar las lecturas. Con el dato de tiempo anterior y las distancias que existe entre ellos, se puede calcular la velocidad experimental generada dentro del sistema de colada.

En el capítulo de resultados se presentan gráficas similares a las cuales se les aplicó el análisis descrito en el párrafo anterior.

Por último cabe mencionar la explicación de la colocación de cada termopar. Para el termopar T2 (colocado en la parte inferior de la entrada), anteriormente se había colocado el termopar en la parte superior, el problema que se presentó es que las curvas registradas nunca presentaban un cambio de pendiente tan brusco en comparación a las obtenidas, lo cual hace suponer que el termopar era calentado inicialmente por la radiación del metal líquido, una curva característica de lo anterior se muestra en la Figura 4.7. El mismo problema lo presentaba el termopar T4, colocado en la parte superior de la cavidad de la pieza, inicialmente se colocó en el centro de la parte superior, pero a medida que el metal líquido llenaba la cavidad de la pieza el termopar comenzaba a registrar la radiación, de tal forma que nunca se apreció un cambio en la curva, por lo que no se logró registrar el momento en el cual tocó al termopar. Es por esta razón que el termopar se colocó en un costado de la parte superior a 4 mm. de distancia de la cavidad de la misma, por lo que el efecto de la radiación no se hacía notar.



Por otra parte no se colocó el termopar T2 a la mitad del área transversal de la entrada, ya que se presentaron problemas debidos principalmente a que la velocidad el flujo del metal pudiera ser afectado.

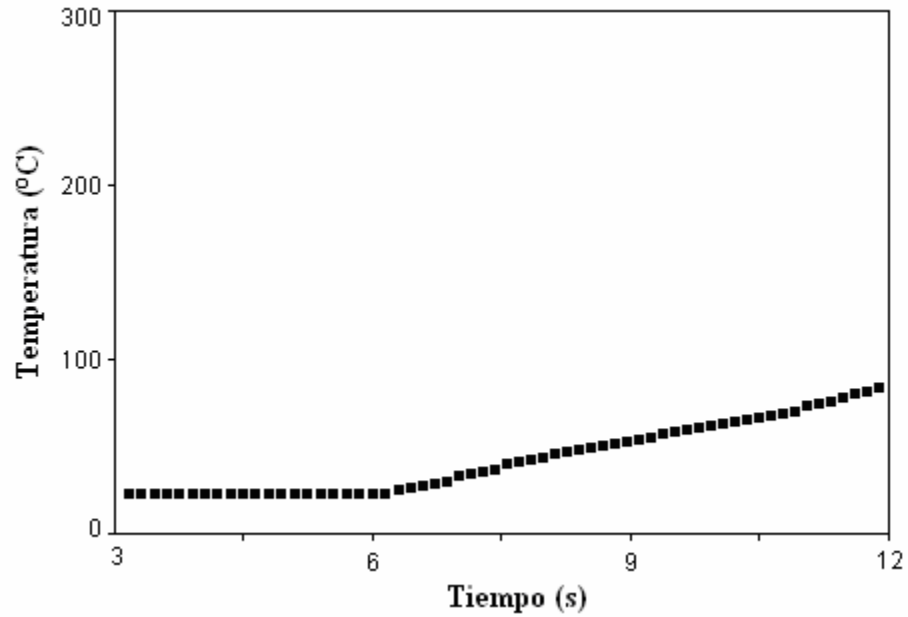


Figura 4.7. Datos registrados por el termopar 3 (T3), para la aleación A356 con RC1.



CAPITULO V

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se muestran los resultados de los tiempos obtenidos por el análisis térmico a partir de los cuales se determinan:

- 1) El tiempo de llenado del sistema de colada,
- 2) El tiempo de llenado total (sistema de colada junto con la pieza) y
- 3) El tiempo de llenado de la pieza.

Utilizando el primer dato de tiempo, se determino:

- 4) La velocidad experimental generada en ambos sistemas de colada, par finalmente en base a estos datos evaluar:
- 5) El número de Reynolds y
- 6) El gasto volumétrico

Los resultados anteriores son comparados contra los teóricos predichos por el método de la AFS para piezas de aluminio convencional.

5.1. RESULTADOS DE LOS TIEMPOS DE LLENADO DEL SISTEMA DE COLADA, TIEMPO DE LLENADO TOTAL Y TIEMPO DE LLENADO DE LA PIEZA.

El orden de presentación de los resultados obtenidos por el análisis térmico de los tiempos de llenado es el siguiente:

1. Tiempo de llenado del sistema de colada: se obtiene con los datos registrados por el termopar 1 y 2 (ver Figura 4.4 del Capítulo 4), el cual esta definido por el tiempo que tarda en pasar el metal líquido desde la bajada hasta la entrada.
2. Tiempo de llenado total: se determina con los datos obtenidos por el termopar 1 y 4 y es el tiempo que tarda en pasar el metal líquido desde la bajada hasta el llenado completo de la pieza experimental.



3. Tiempo de llenado de la pieza: se determina con los datos registrados por el termopar 3 y 4 (ver Figura 4.4 del Capítulo 4) y es el tiempo que tarda el metal líquido en llenar únicamente la cavidad de la pieza.

A continuación se muestran dichos resultados para cada caso de manera gráfica y al final se resumen en la Tabla 5.1. Es importante señalar que las pruebas experimentales para cada aleación y relación de colada se desarrollaron por triplicado.

5.1.1. Tiempos de llenado del sistema de colada.

Primero se muestran los resultados de la aleación monolítica de forma gráfica para: (a) para la relación de colada 1:2:3 (RC1) corresponden las Figuras 5.1, 5.2 y 5.3, (b) relación de colada 1:1.5:2 (RC2) corresponden las Figuras 5.4, 5.5 y 5.6. Posteriormente se presentan los resultados de los compositos con 10% de SiCp, Figuras 5.7, 5.8 y 5.9 para la RC1 y las Figuras 5.10, 5.11 y 5.12 para la RC2. Por último se muestran los resultados de los compositos con 15 % de SiCp, Figuras 5.13, 5.14 y 5.15 para la RC1 y las Figuras 5.16, 5.17 y 5.18 para la RC2.

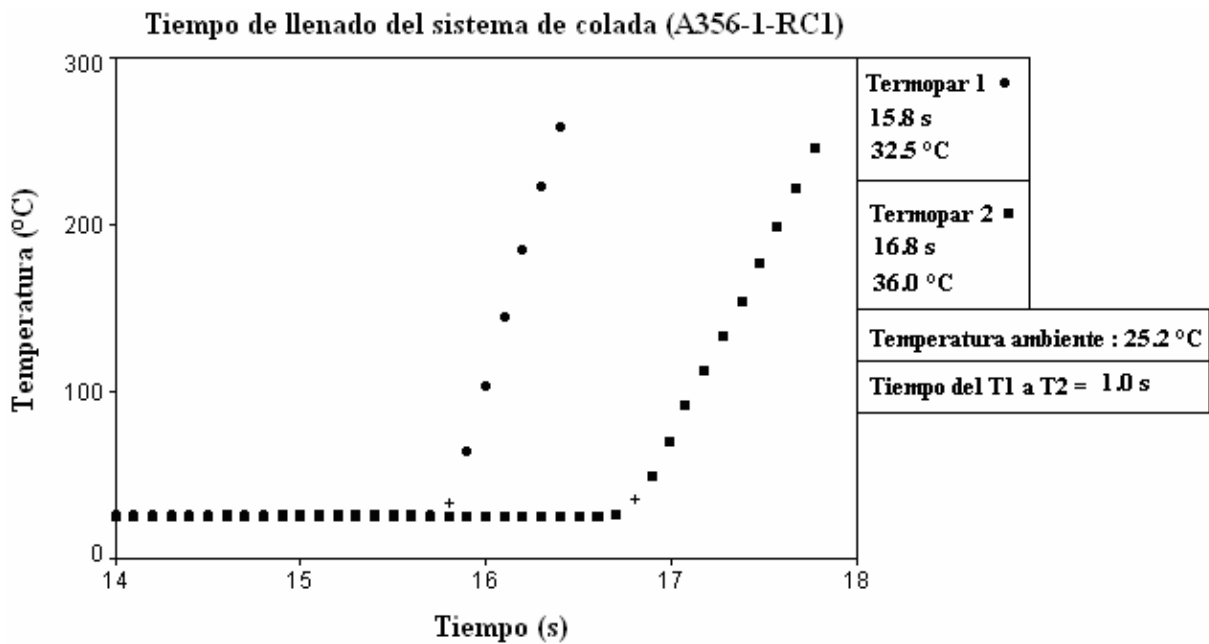


Figura 5.1. Prueba 1, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado para la aleación A356 con RC1.

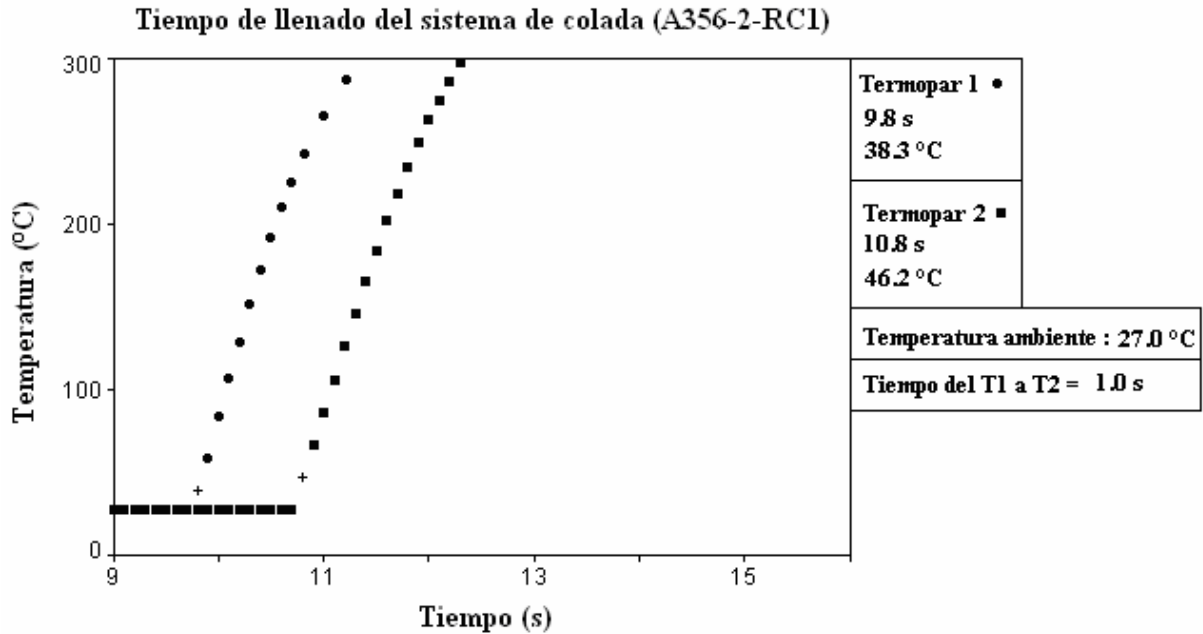


Figura 5.2. Prueba 2, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado para la aleación A356 con RC1.

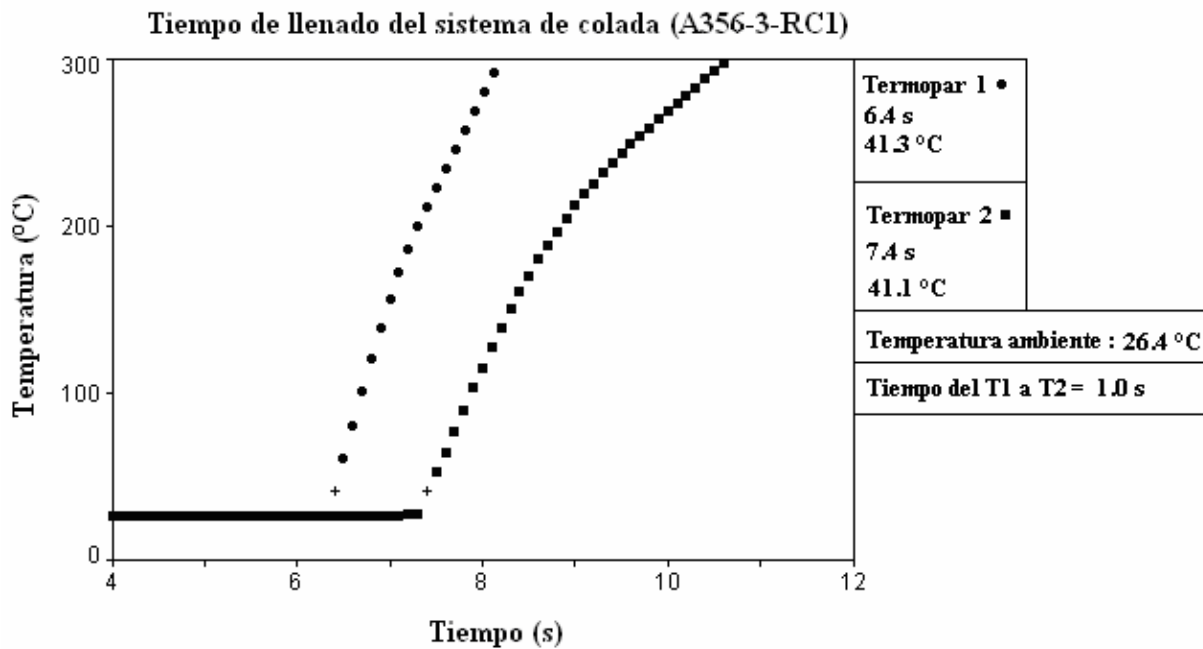


Figura 5.3. Prueba 3, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado para la aleación A356 con RC1.

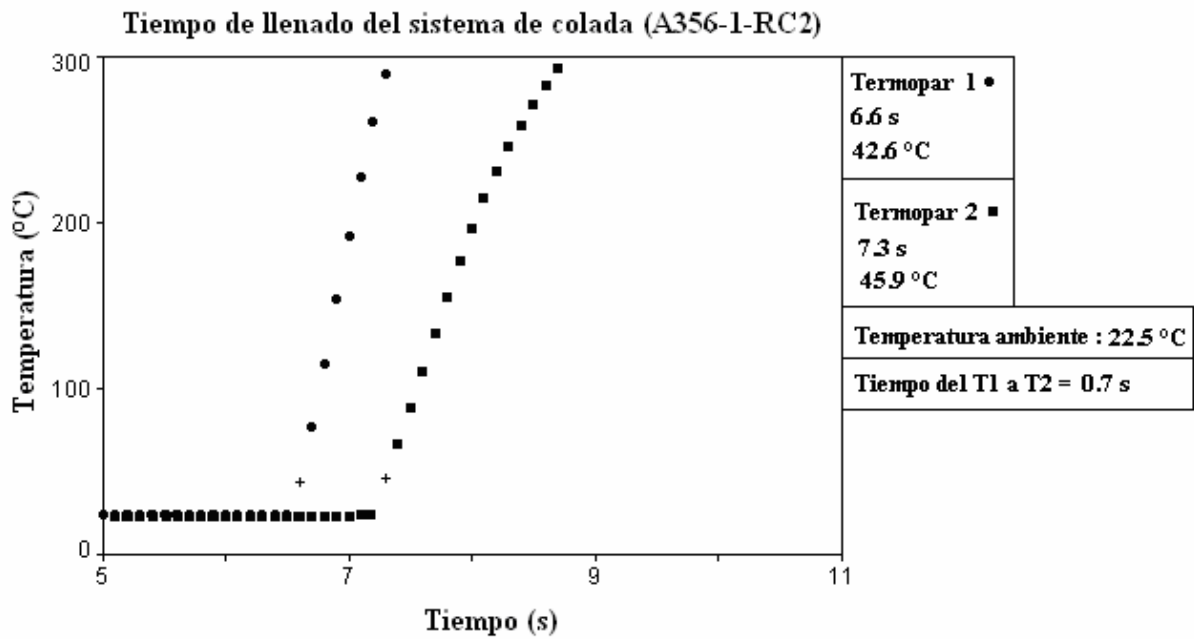


Figura 5.4. Prueba 1, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado para la aleación A356 con RC2.

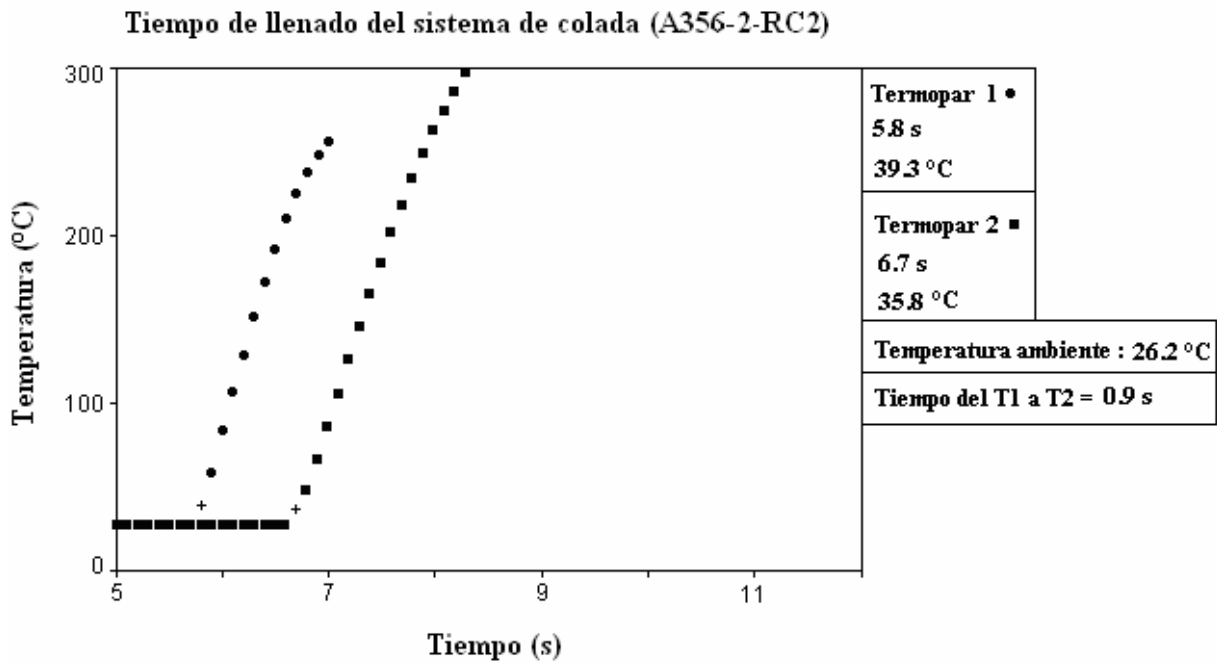


Figura 5.5. Prueba 2, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado para la aleación A356 con RC2.

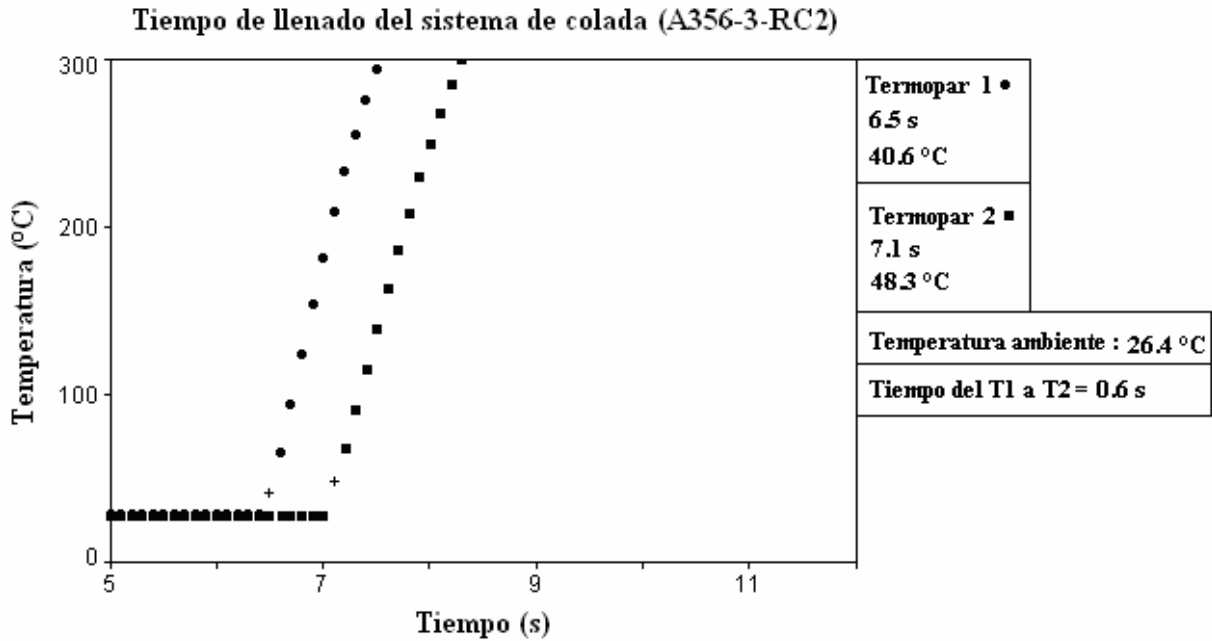


Figura 5.6. Prueba 3, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado para la aleación A356 con RC2.

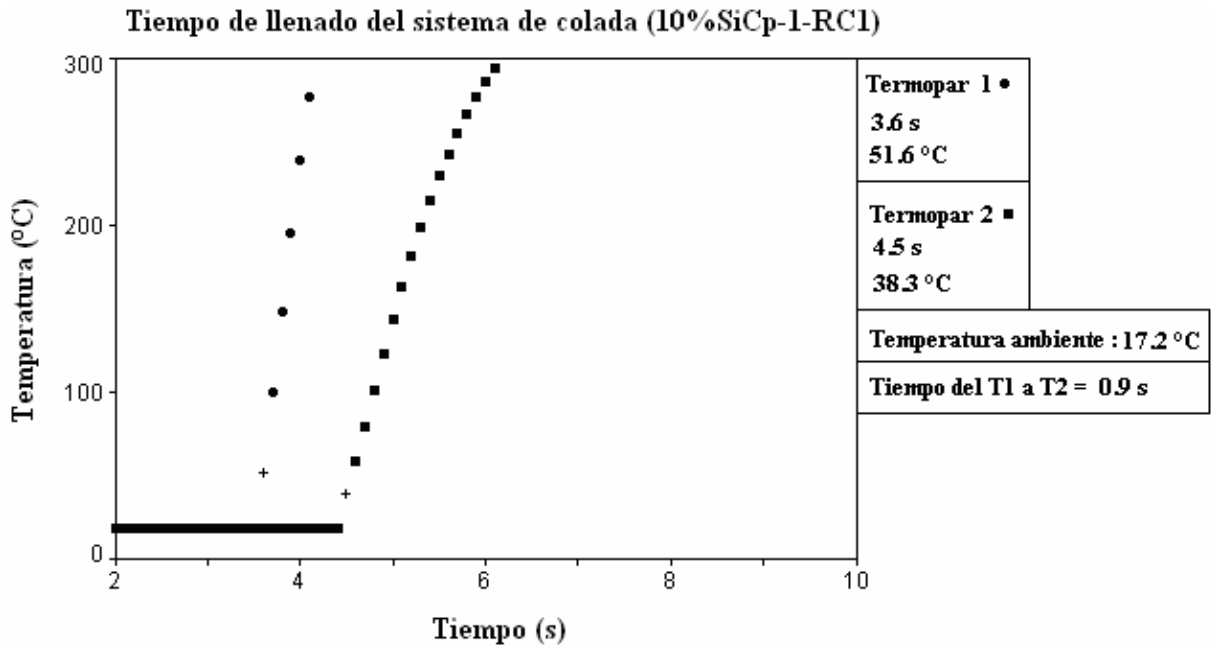


Figura 5.7. Prueba 1, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado para el composito con 10 % SiCp y con RC1.

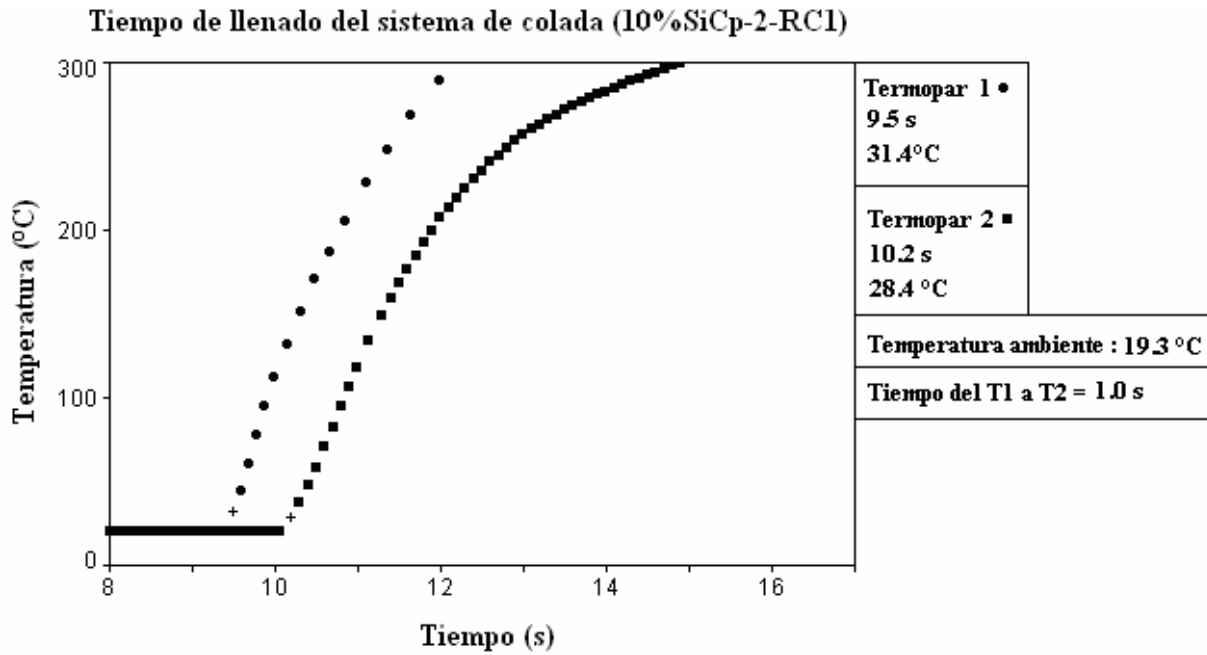


Figura 5.8. Prueba 2, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado para el composito con 10 % SiCp y con RC1.

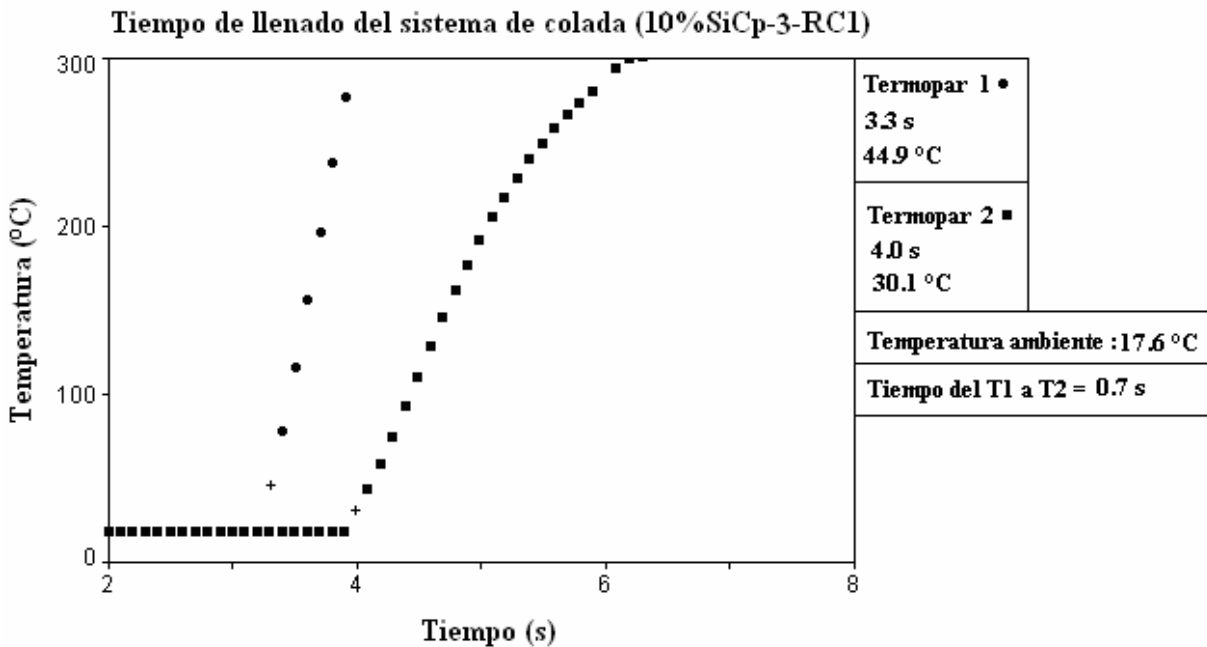


Figura 5.9. Prueba 3, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado para el composito con 10 % SiCp y con RC1.

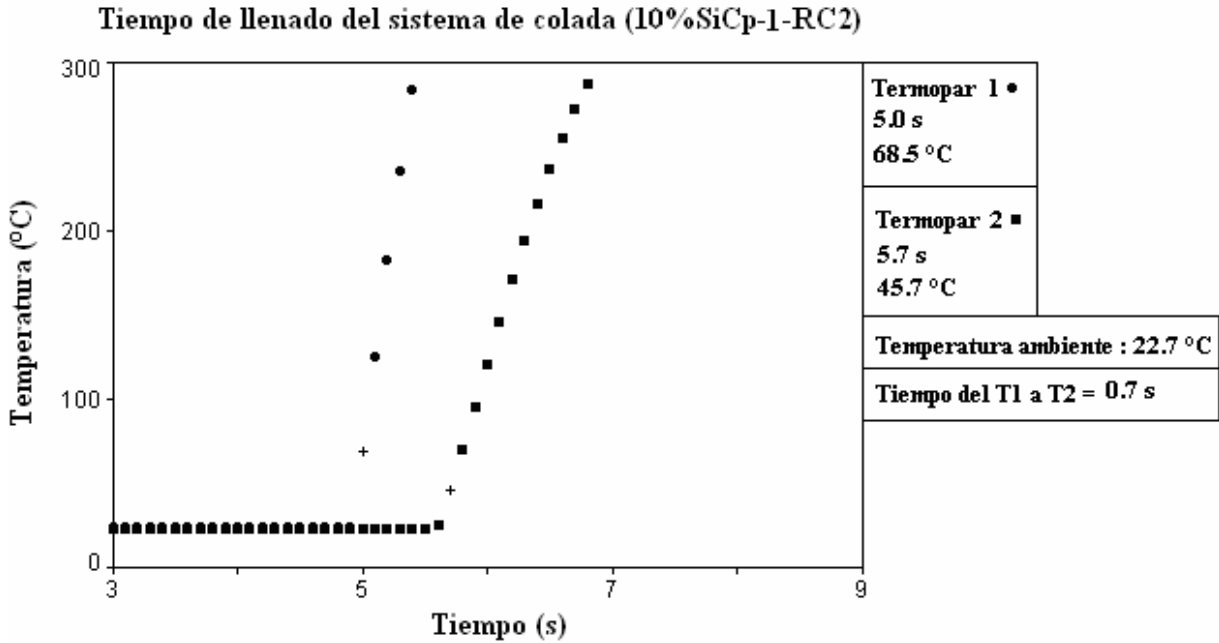


Figura 5.10. Prueba 1, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado para el composito con 10 % SiCp y con RC2.

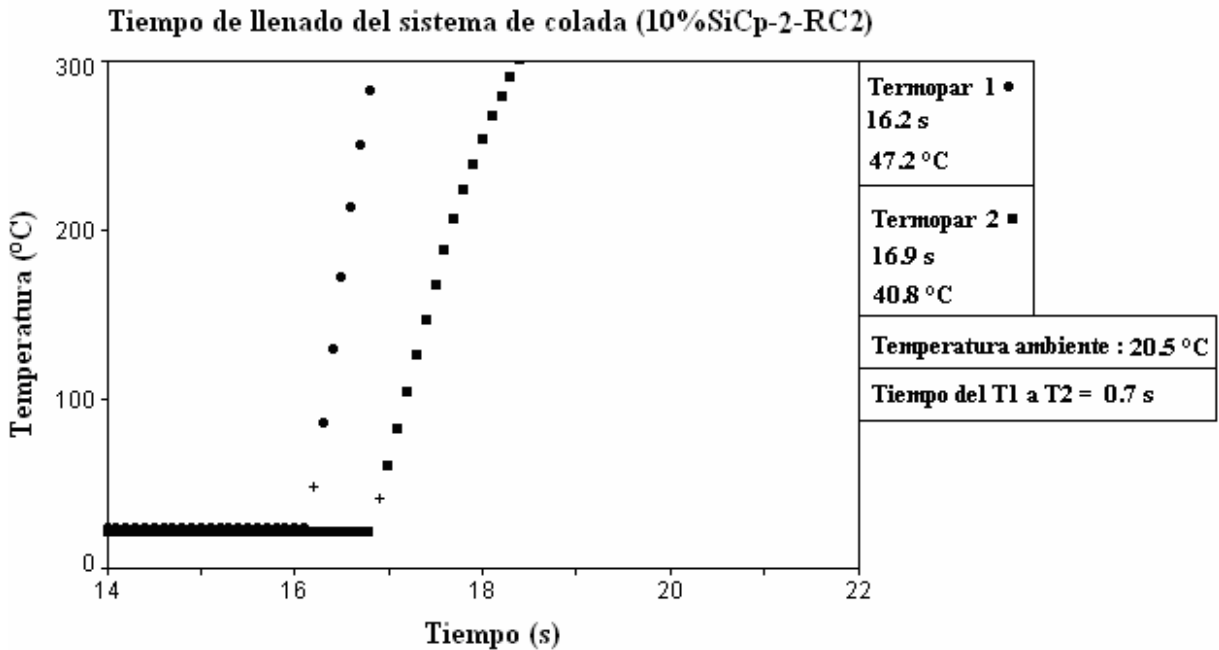


Figura 5.11. Prueba 2, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado para el composito con 10 % SiCp y con RC2.

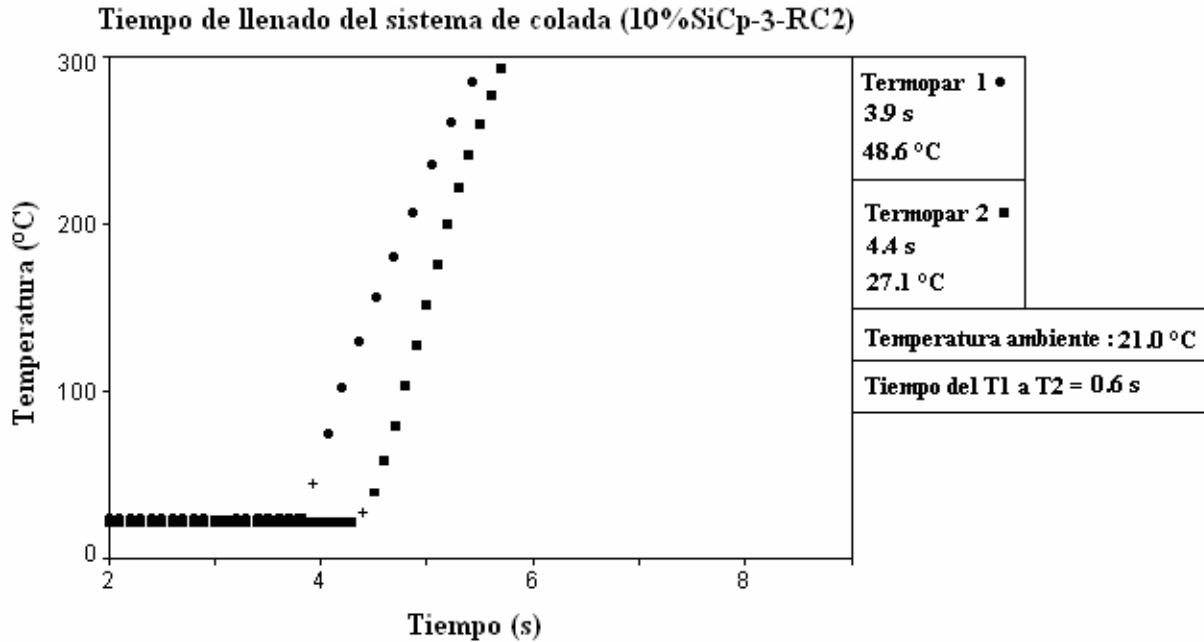


Figura 5.12. Prueba 3, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado para el composito con 10 % SiCp y con RC2.

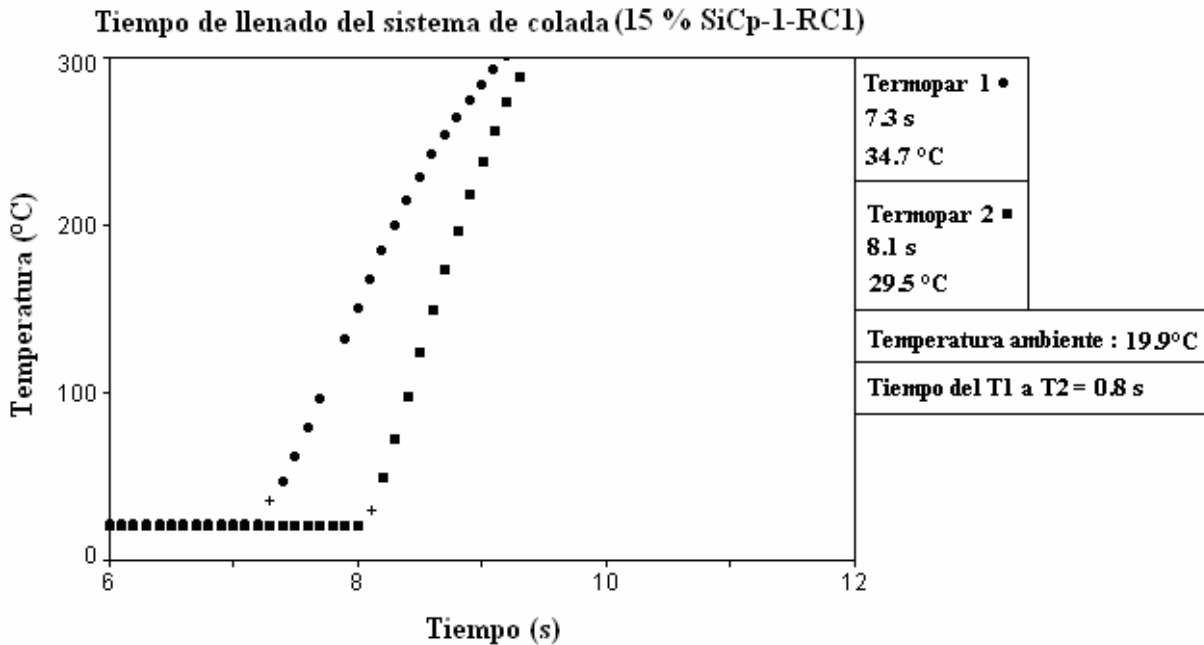


Figura 5.13. Prueba 1, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado para el composito con 15 % SiCp y con RC1.

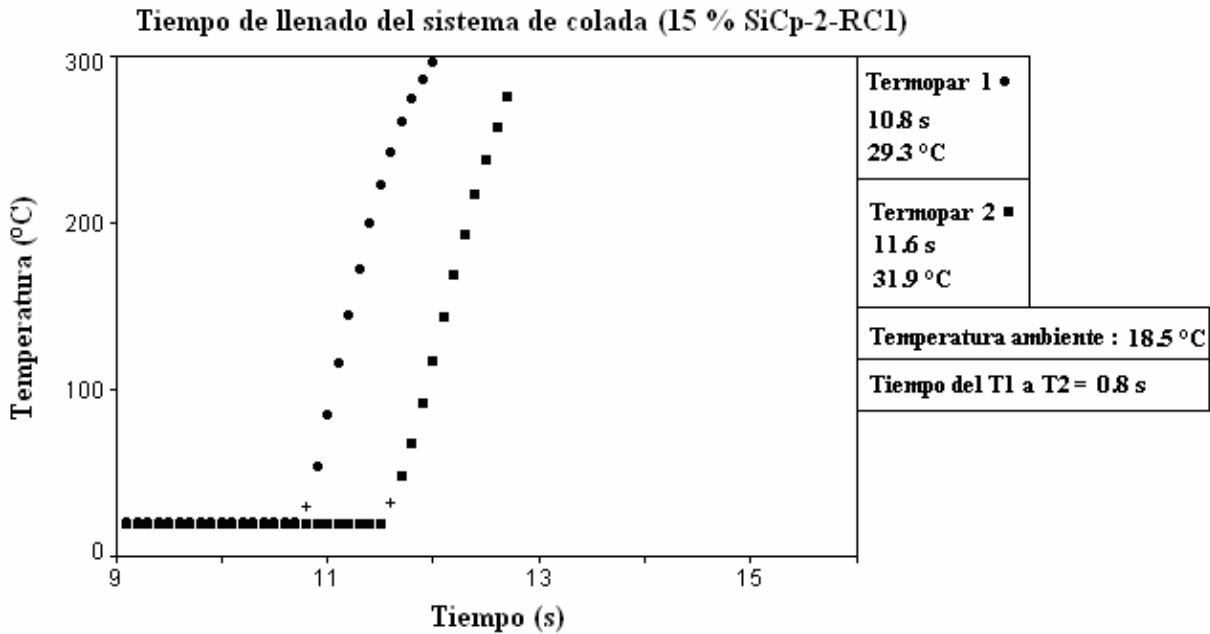


Figura 5.14. Prueba 2, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado para el composito con 15 % SiCp y con RC1.

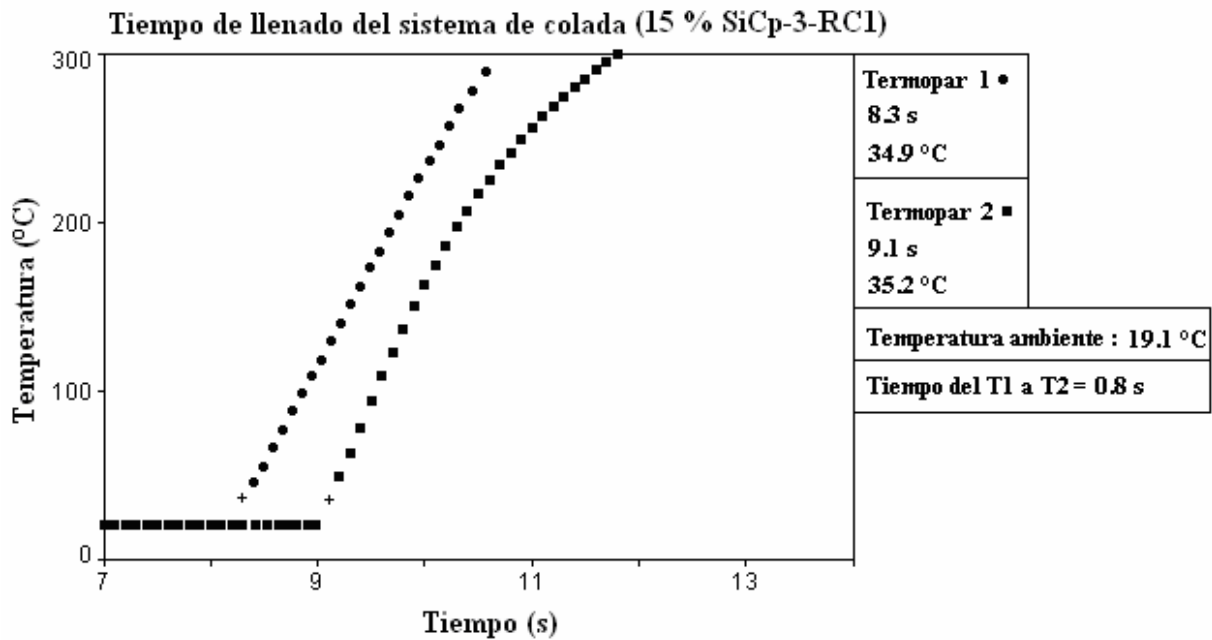


Figura 5.15. Prueba 3, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado para el composito con 15 % SiCp y con RC1.

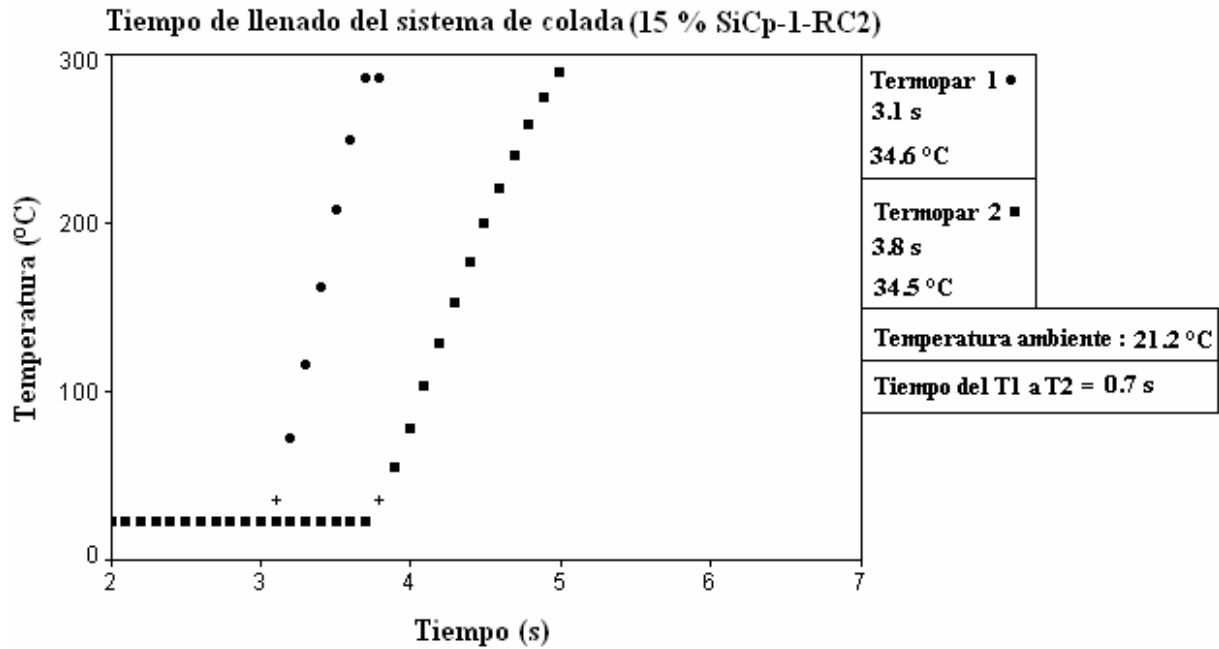


Figura 5.16. Prueba 1, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado para el composito con 15 % SiCp y con RC2.

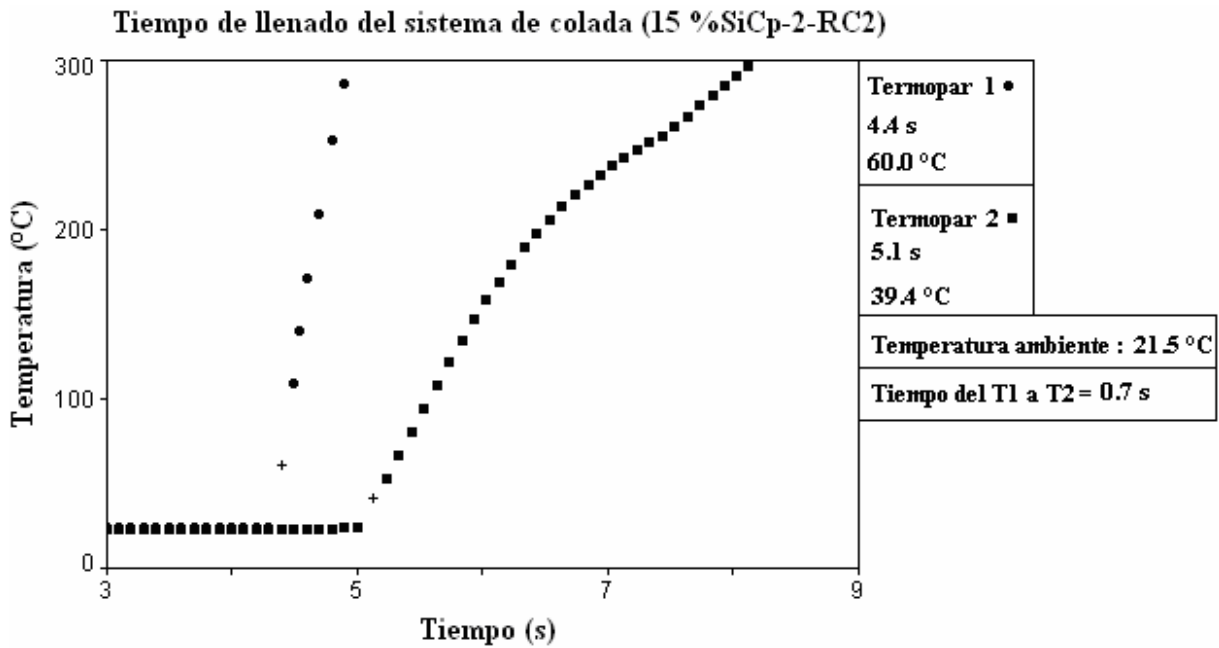


Figura 5.17. Prueba 2, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado para el composito con 15 % SiCp y con RC2.

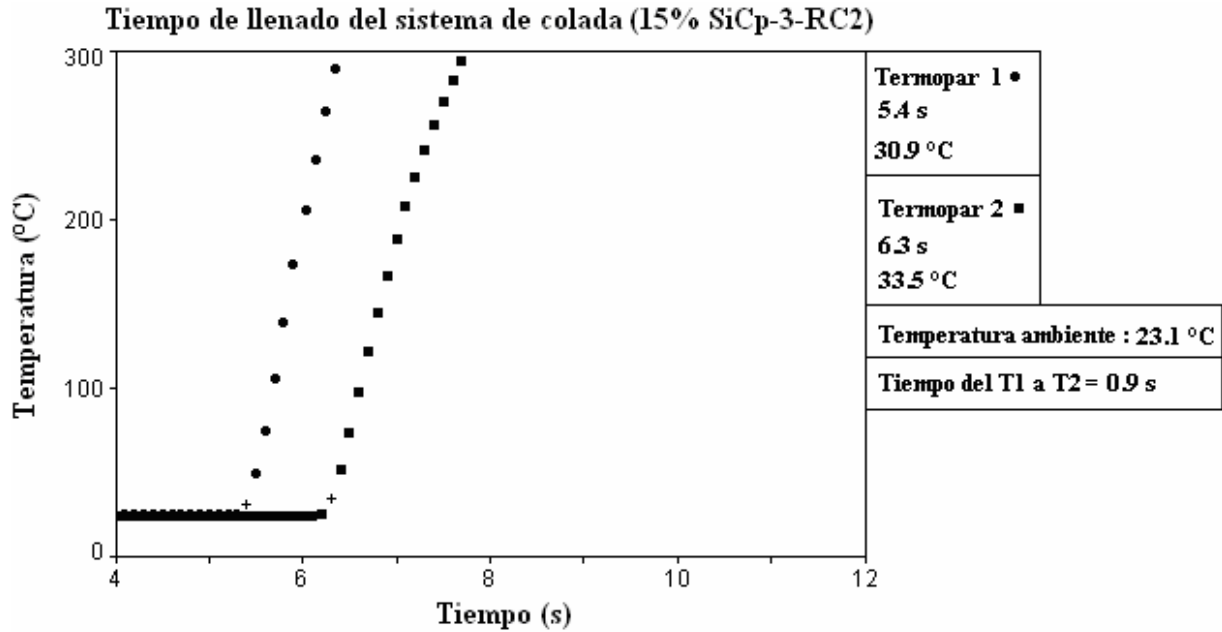


Figura 5.18. Prueba 3, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado para el composito con 15 % SiCp y con RC2.

5.1.2. Tiempos de llenado total (sistema de colada y pieza).

El orden de presentación de los resultados es similar al caso anterior, para la aleación monolítica y RC1 corresponden las Figuras 5.19, 5.20 y 5.21 y para la RC2 corresponden las Figuras 5.22, 5.23 y 5.24. Posteriormente se presentan los resultados de los compositos con 10% de SiCp, Figuras 5.25, 5.26 y 5.27 para la RC1 y las Figuras 5.28, 5.29 y 5.30 para la RC2. Por último se muestran los resultados de los compositos con 15 % de SiCp, Figuras 5.31, 5.32 y 5.33 para la RC1 y las Figuras 5.34, 5.35 y 5.36 para la RC2.



Tiempo de llenado total del sistema de colada y pieza (A356-1-RC1)

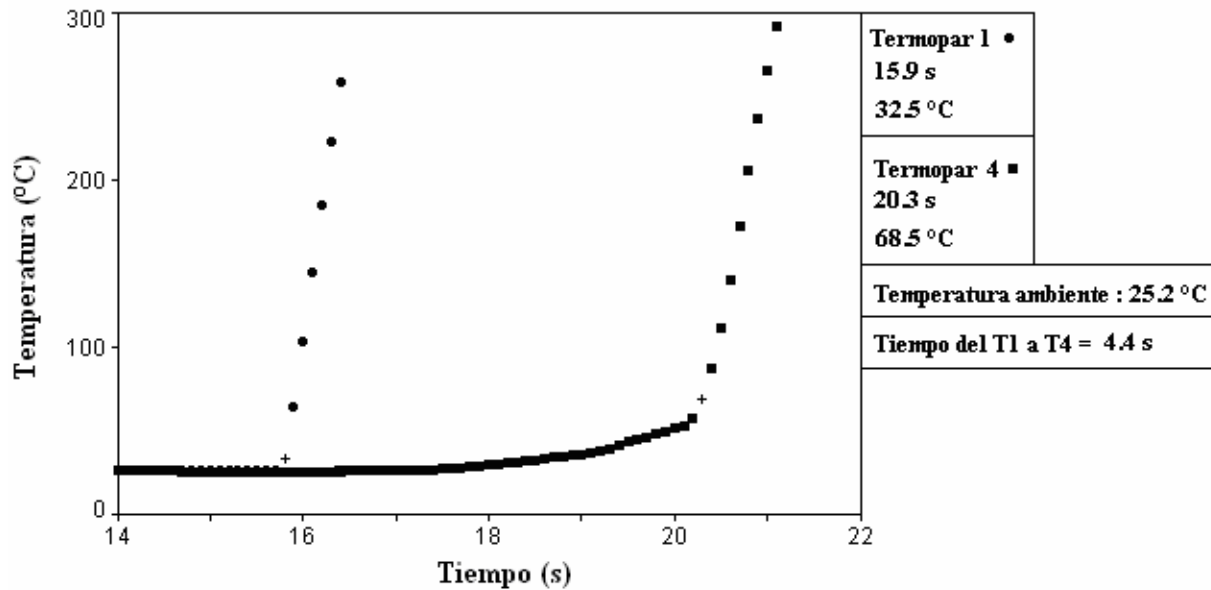


Figura 5.19. Prueba 1, análisis térmico para la determinación del tiempo total de la aleación A356 con RC1.

Tiempo de llenado total del sistema de colada y pieza (A356-2-RC1)

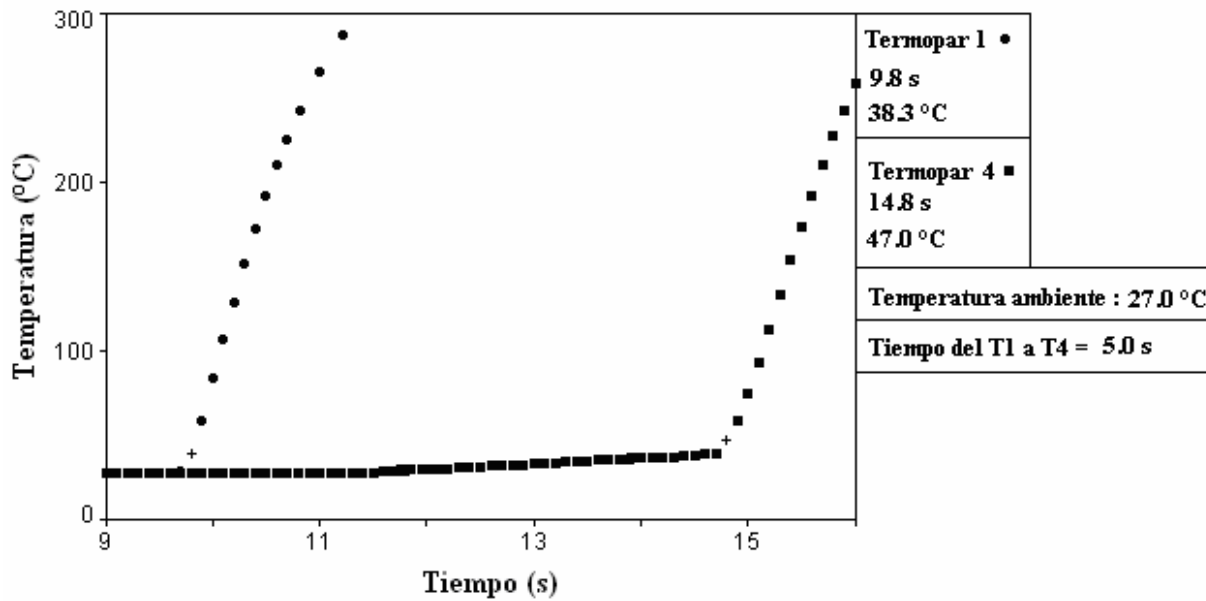


Figura 5.20. Prueba 2, análisis térmico para la determinación del tiempo total de la aleación A356 con RC1.



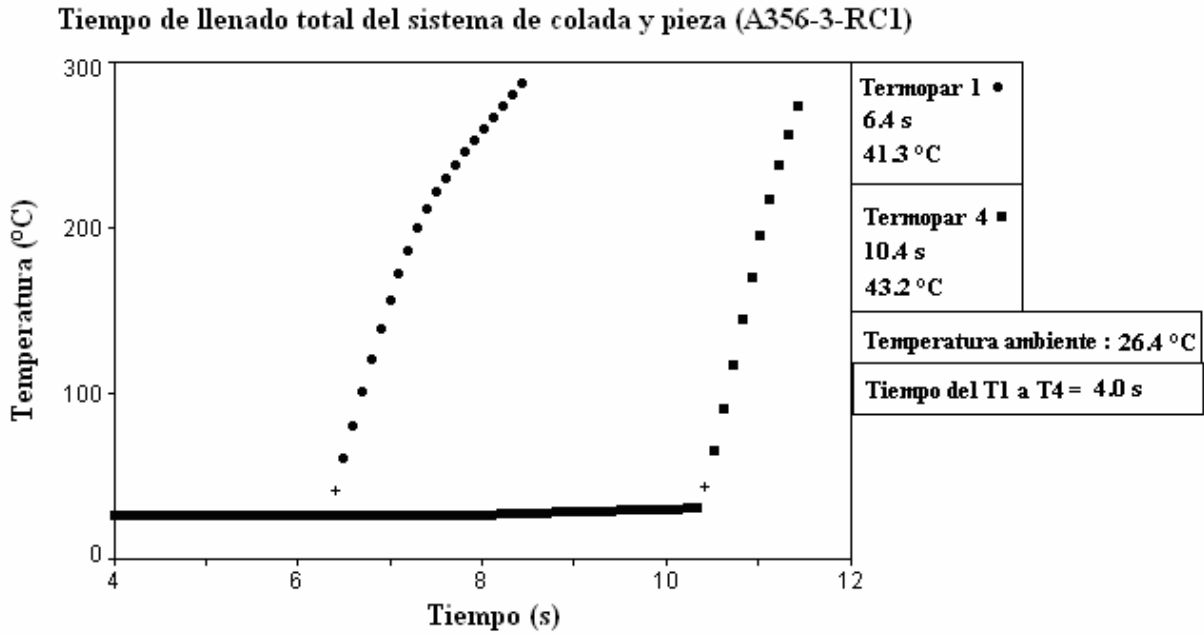


Figura 5.21. Prueba 3, análisis térmico para la determinación del tiempo total de la aleación A356 con RC1.

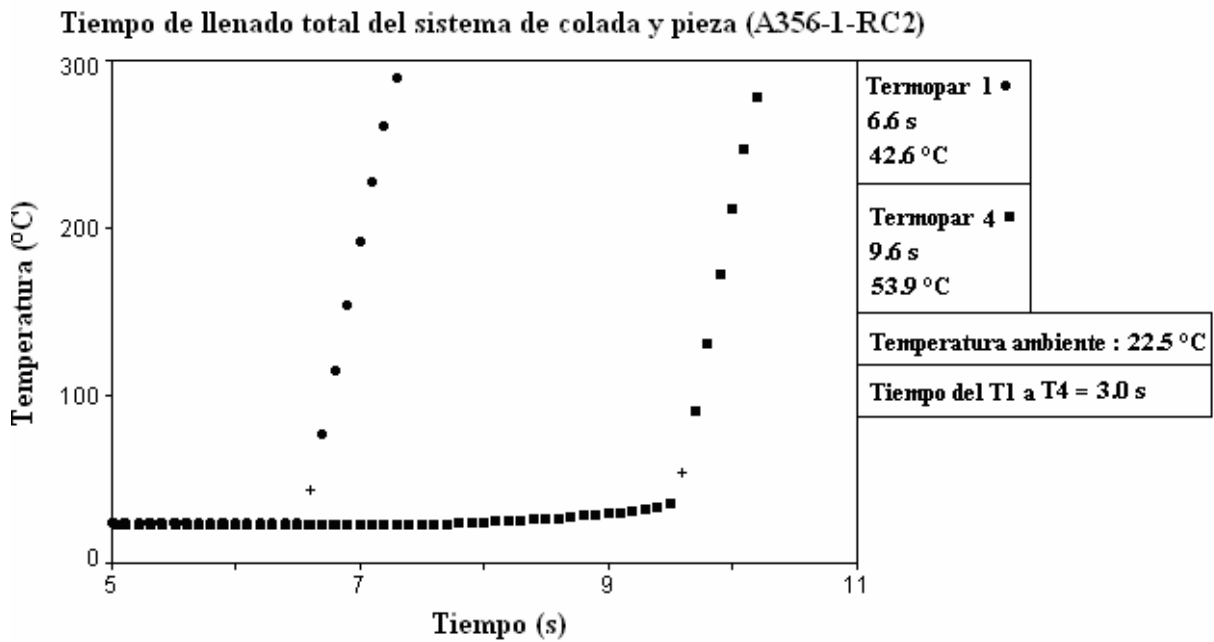


Figura 5.22. Prueba 1, análisis térmico para la determinación del tiempo total de la aleación A356 con RC2.



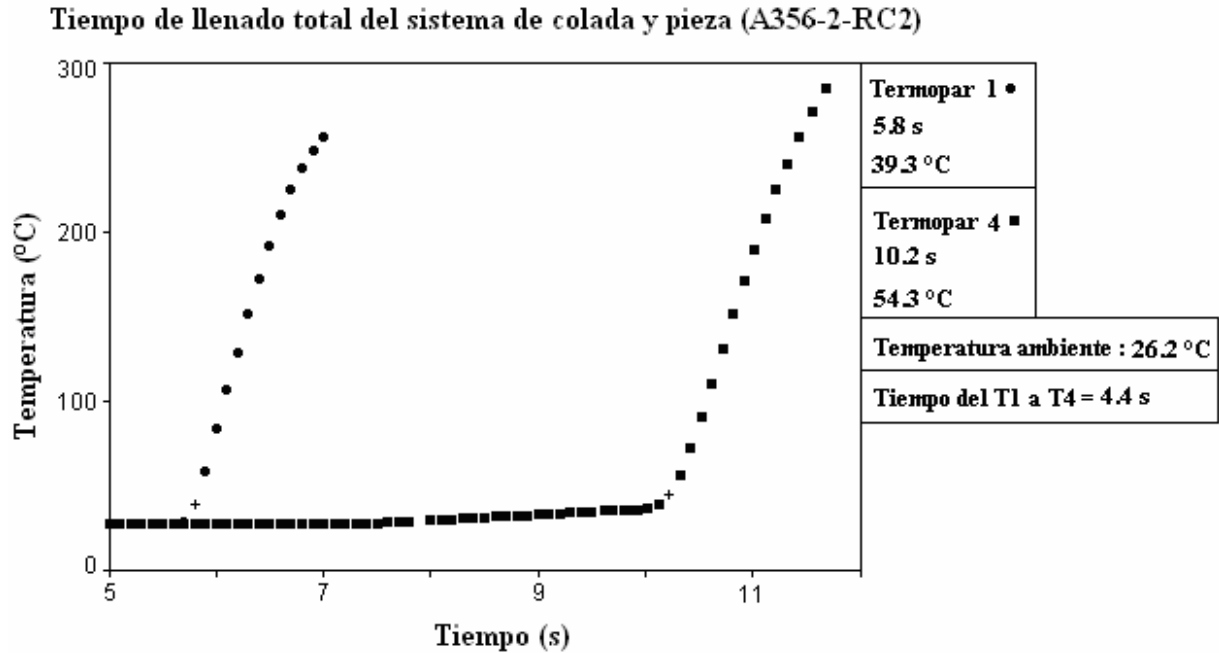


Figura 5.23. Prueba 2, análisis térmico para la determinación del tiempo total de la aleación A356 con RC2.

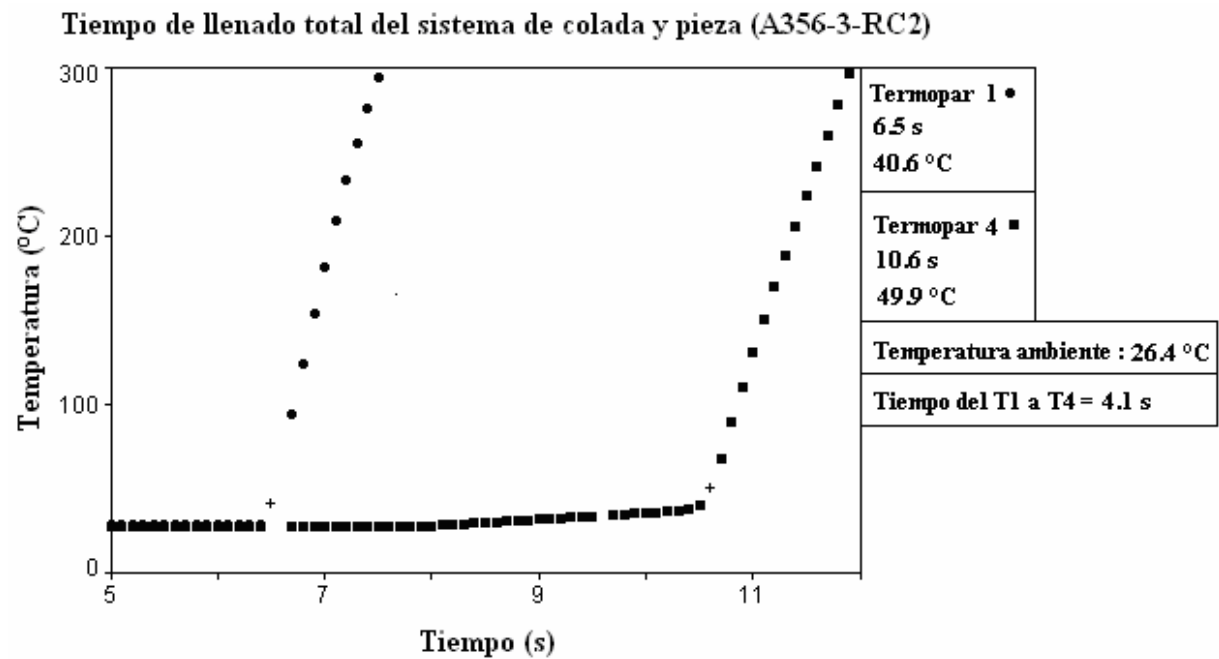


Figura 5.24. Prueba 3, análisis térmico para la determinación del tiempo total de la aleación A356 con RC2.



Tiempo de llenado total del sistema de colada y pieza (10%SiCp-1-RC1)

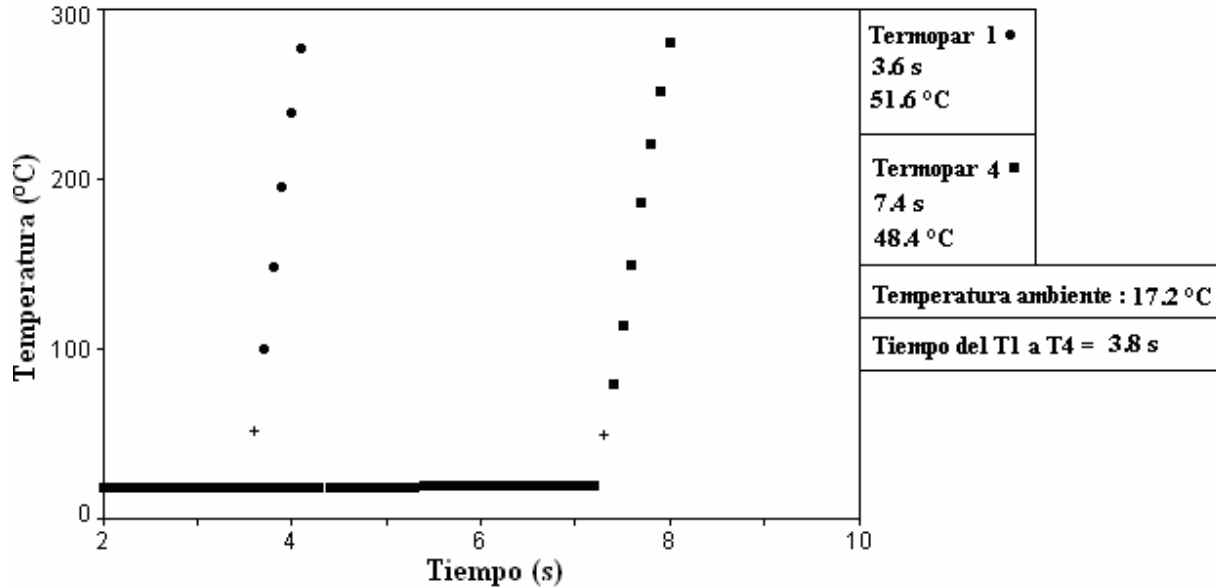


Figura 5.25. Prueba 1, análisis térmico para la determinación del tiempo total para el composito con 10 % SiCp y con RC1.

Tiempo de llenado total del sistema de colada y pieza (10%SiCp-2-RC1)

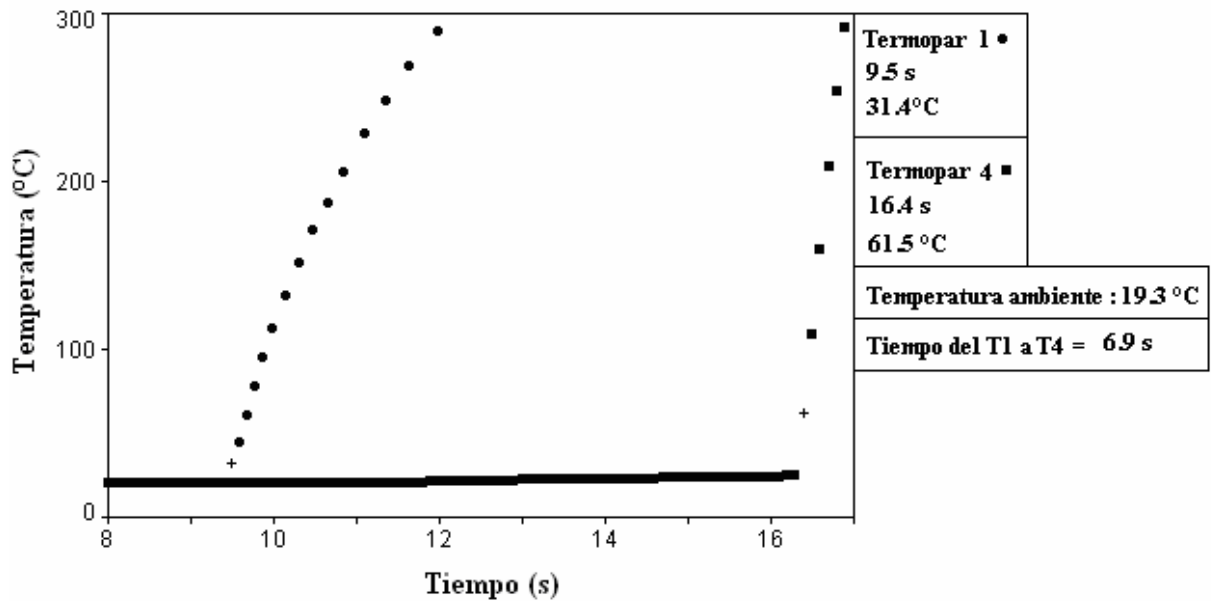


Figura 5.26. Prueba 2, análisis térmico para la determinación del tiempo total para el composito con 10 % SiCp y con RC1.



Tiempo de llenado total del sistema de colada y pieza (10%SiCp-3-RC1)

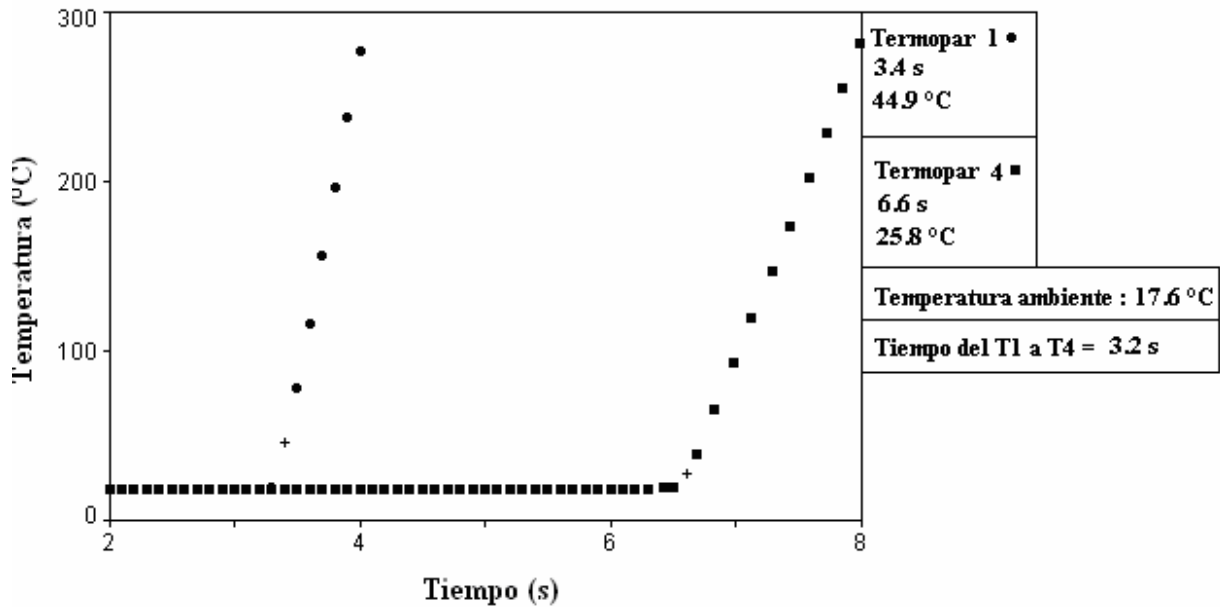


Figura 5.27. Prueba 3, análisis térmico para la determinación del tiempo total para el compuesto con 10 % SiCp y con RC1.

Tiempo de llenado total del sistema de colada y pieza (10%SiCp-1-RC2)

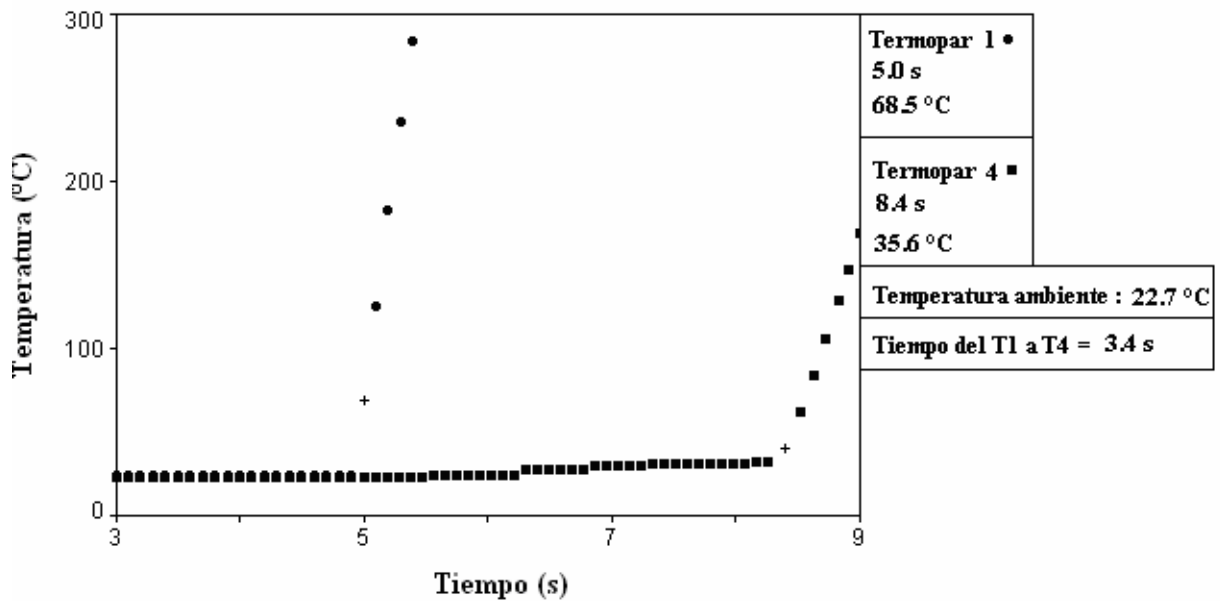


Figura 5.28. Prueba 1, análisis térmico para la determinación del tiempo total para el compuesto con 10 % SiCp y con RC2.



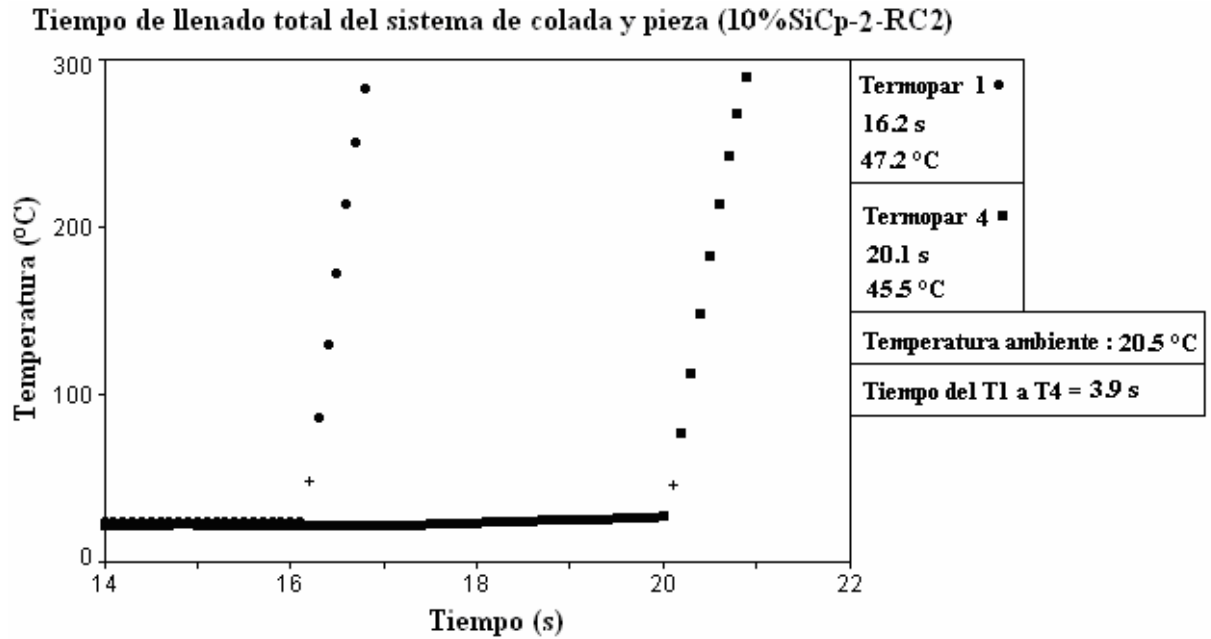


Figura 5.29. Prueba 2, análisis térmico para la determinación del tiempo total para el composito con 10 % SiCp y con RC2.

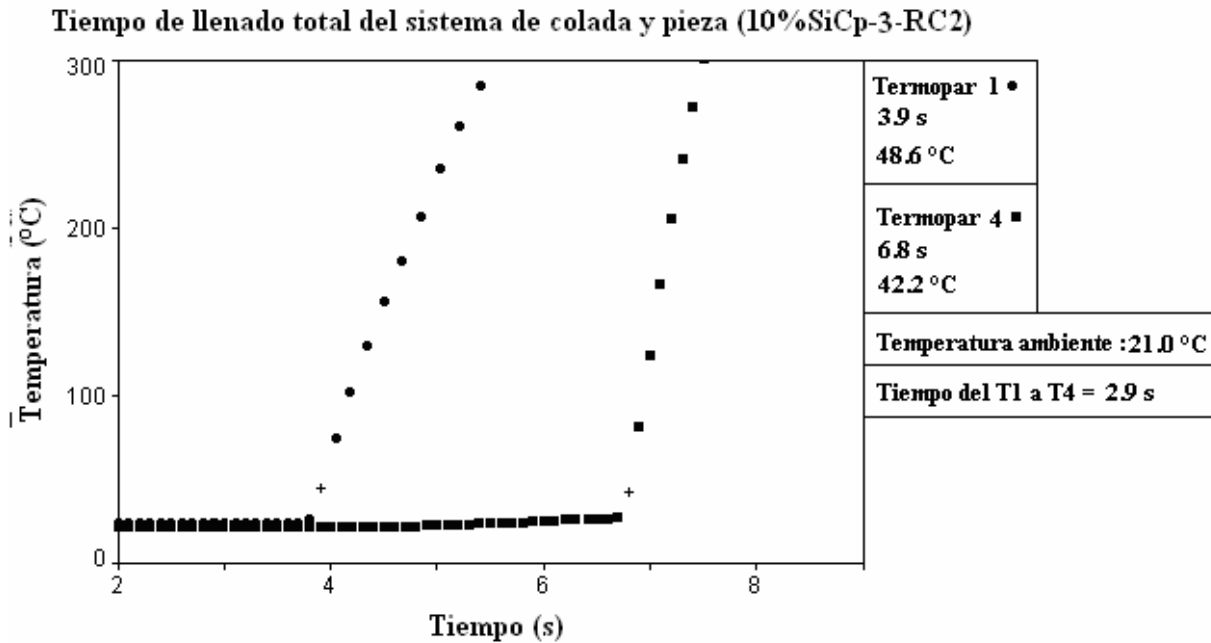


Figura 5.30. Prueba 3, análisis térmico para la determinación del tiempo total para el composito con 10 % SiCp y con RC2.



Tiempo de llenado total del sistema de colada y pieza (15 % SiCp-1-RC1)

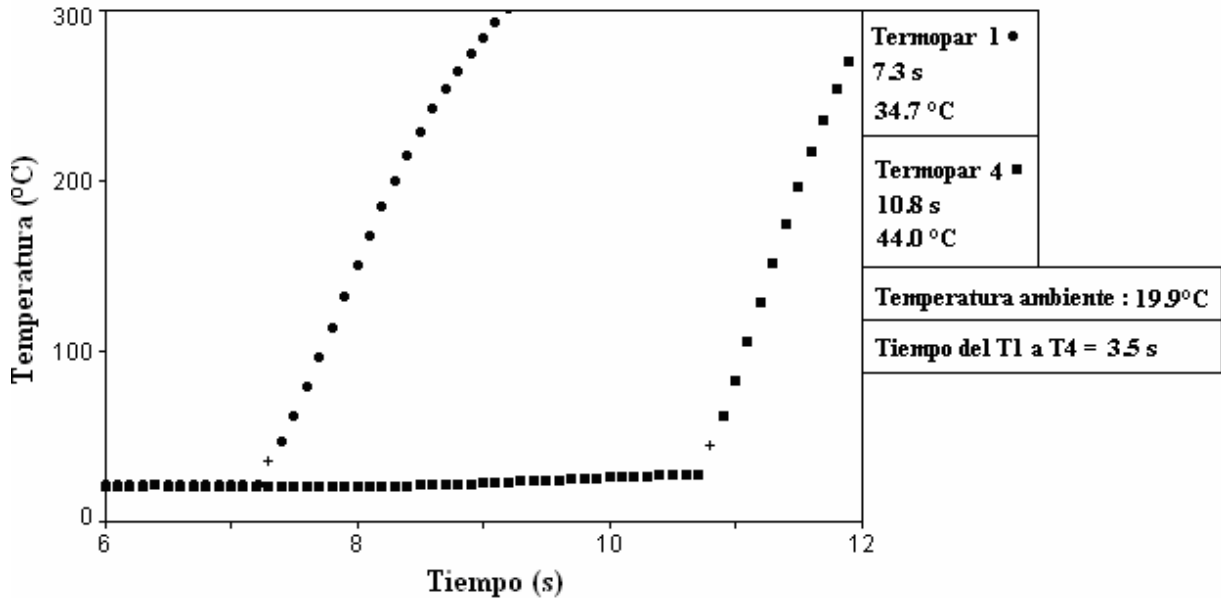


Figura 5.31. Prueba 1, análisis térmico para la determinación del tiempo total para el composito con 15 % SiCp y con RC1.

Tiempo de llenado total del sistema de colada y pieza (15 % SiCp-2-RC1)

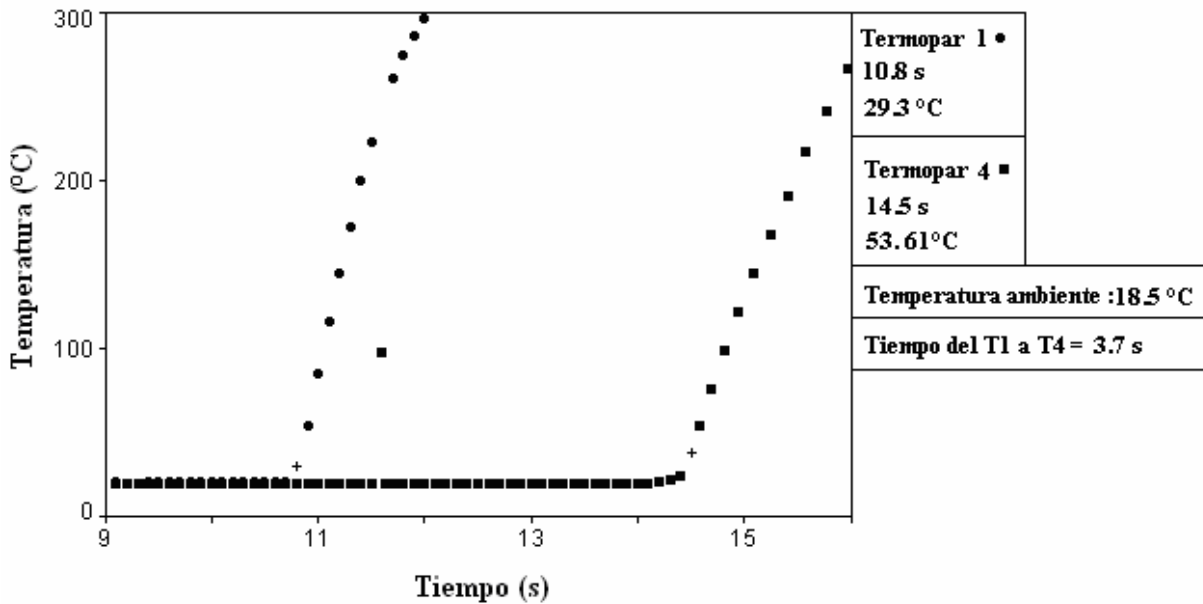


Figura 5.32. Prueba 2, análisis térmico para la determinación del tiempo total para el composito con 15 % SiCp y con RC1.



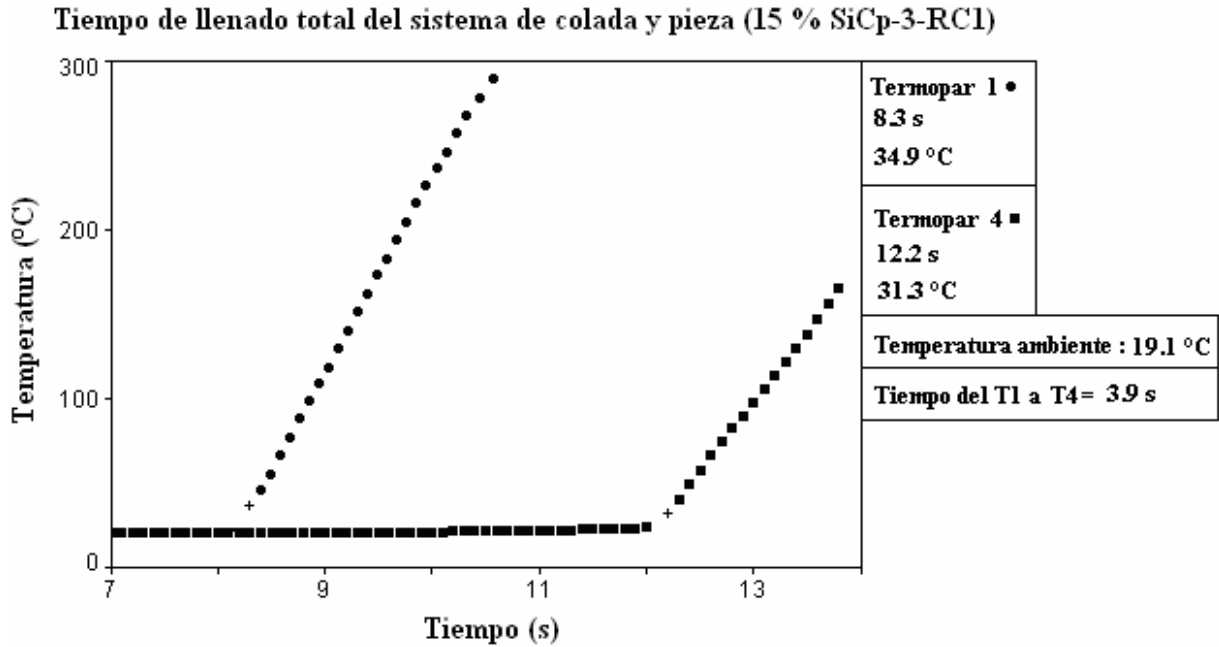


Figura 5.33. Prueba 3, análisis térmico para la determinación del tiempo total para el composito con 15 % SiCp y con RC1.

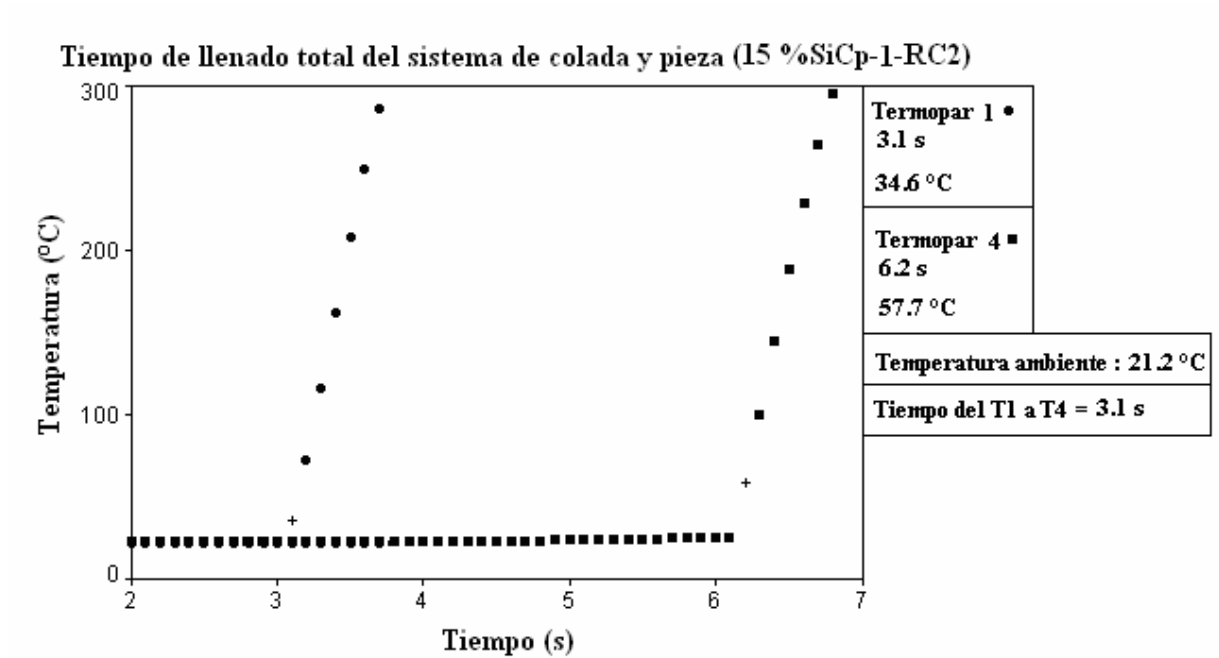


Figura 5.34. Prueba 1, análisis térmico para la determinación del tiempo total para el composito con 15 % SiCp y con RC2.



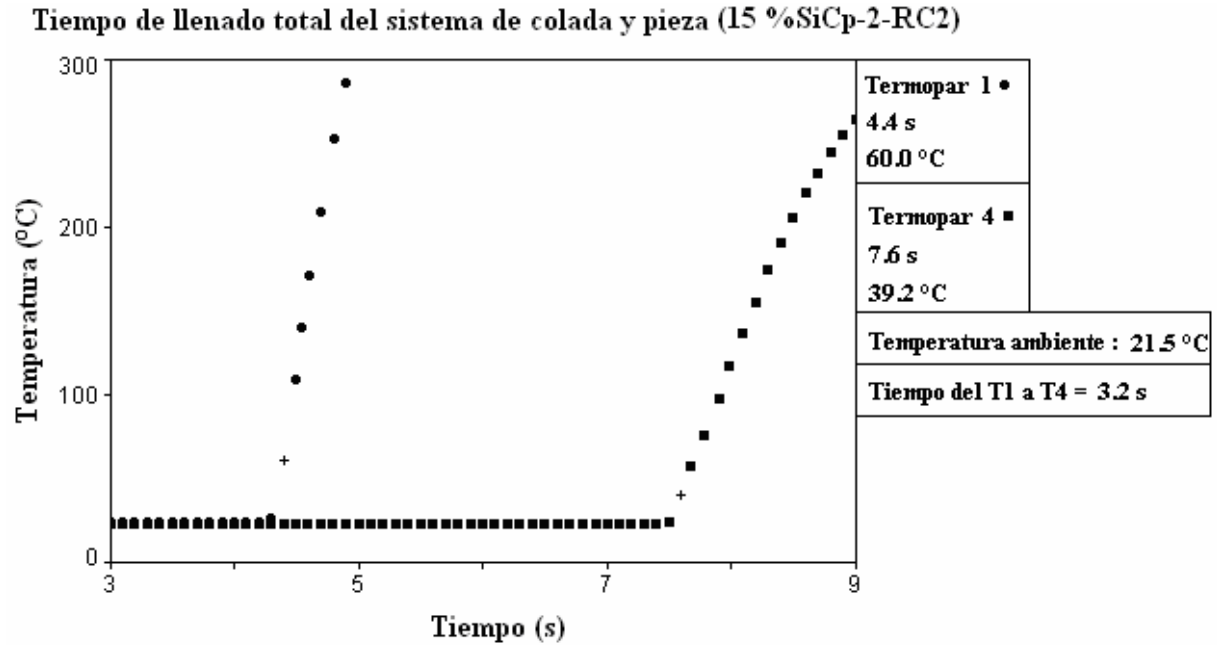


Figura 5.35. Prueba 2, análisis térmico para la determinación del tiempo total para el composito con 15 % SiCp y con RC2.

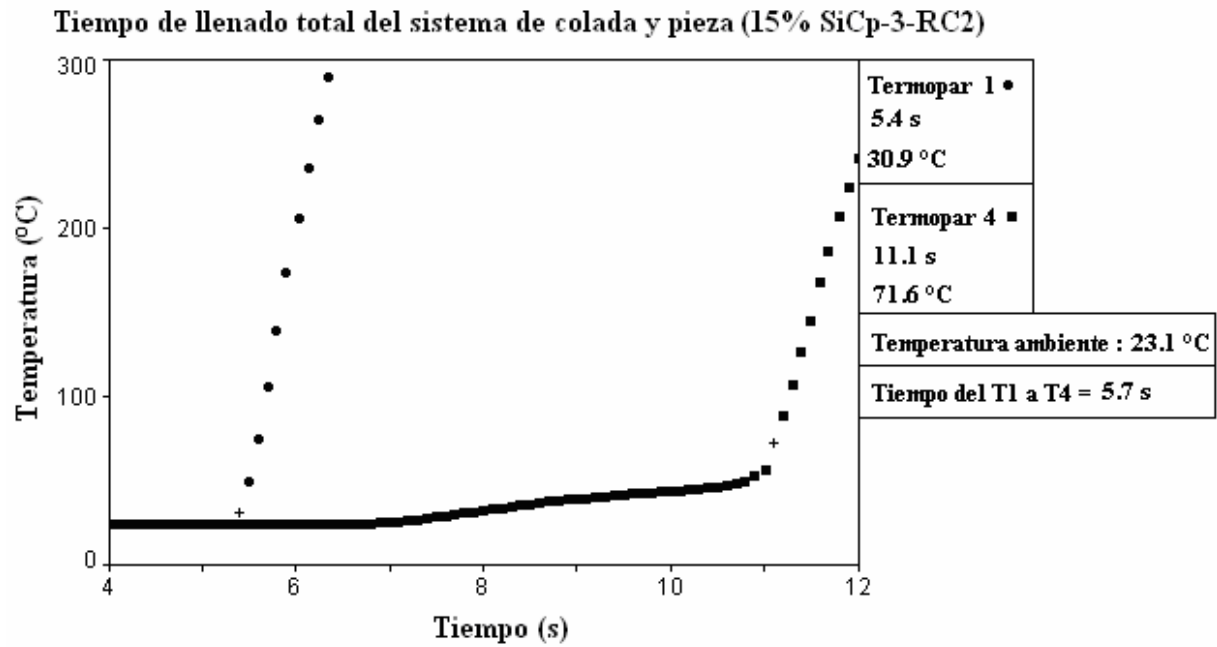


Figura 5.36. Prueba 3, análisis térmico para la determinación del tiempo total para el composito con 15 % SiCp y con RC2.

5.1.3. Tiempos de llenado de la pieza.



De igual forma que en los tiempos anteriores, la presentación de los resultados inicia con la aleación monolítica y RC1 a la cual corresponden las Figuras 5.37, 5.38 y 5.39 y para la RC2 corresponden las Figuras 5.40, 5.41 y 5.42. Posteriormente se presentan los resultados de los compositos con 10% de SiCp, Figuras 5.43, 5.44 y 5.45 para la RC1 y las Figuras 5.46, 5.47 y 5.48 para la RC2. Por último se muestran los resultados de los compositos con 15 % de SiCp, Figuras 5.49, 5.50 y 5.51 para la RC1 y las Figuras 5.52, 5.53 y 5.54 para la RC2.

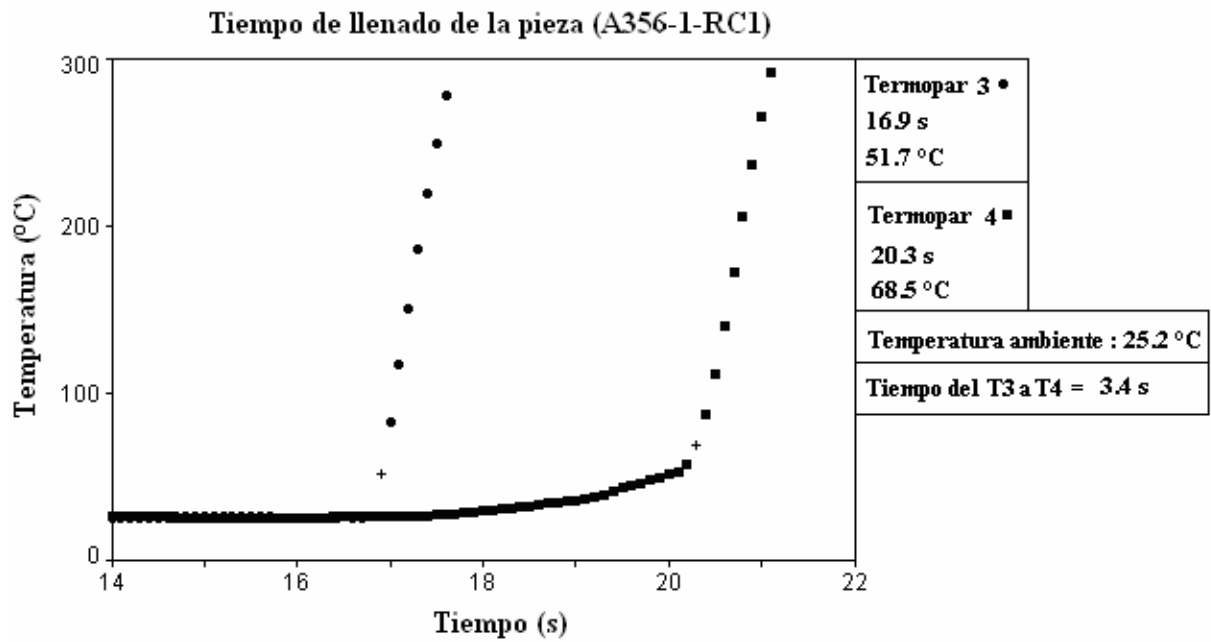


Figura 5.37. Prueba 1, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado de la pieza para la aleación A356 y RC1.



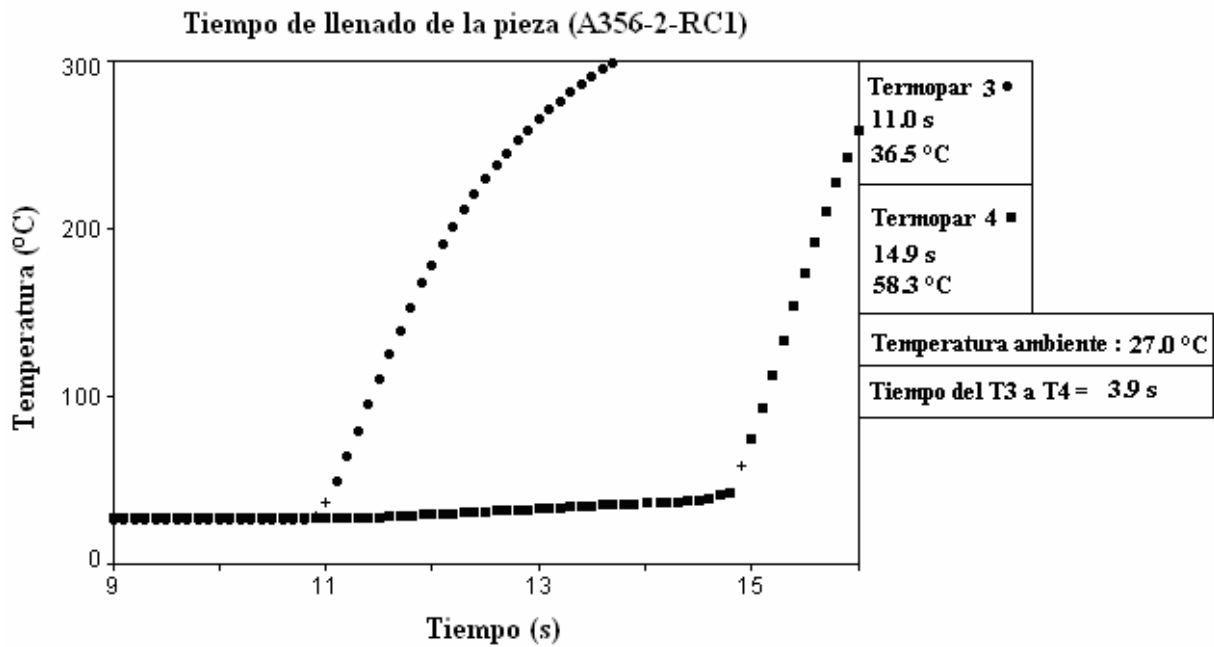


Figura 5.38. Prueba 2, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado de la pieza para la aleación A356 y RC1.

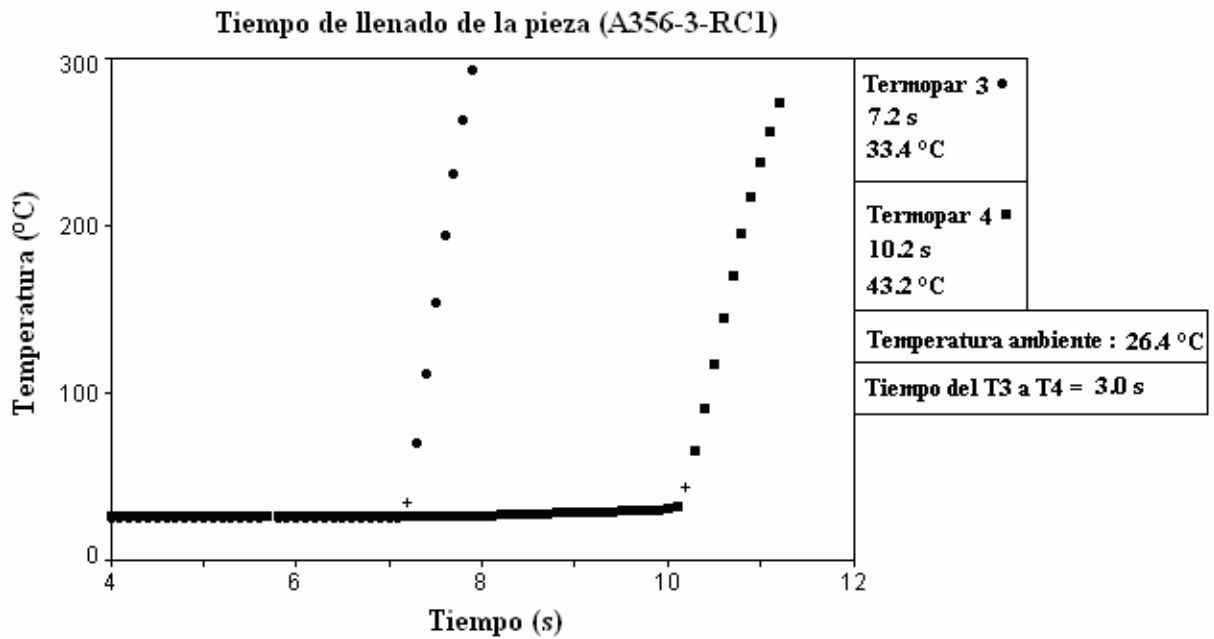


Figura 5.39. Prueba 3, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado de la pieza para la aleación A356 y RC1.



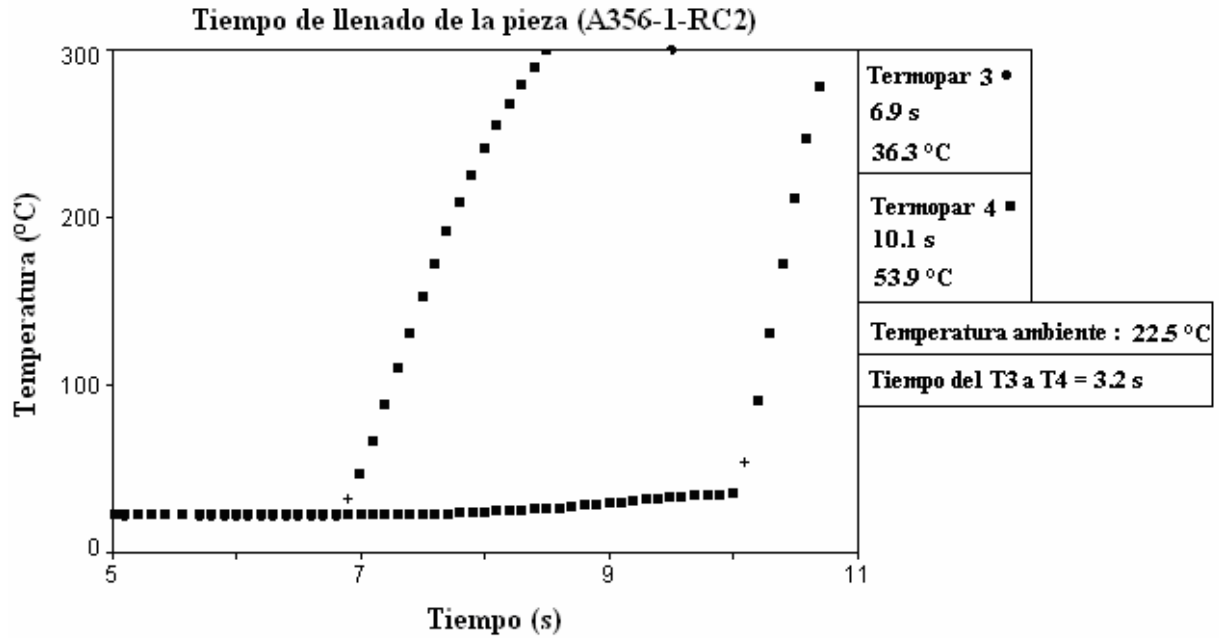


Figura 5.40. Prueba 1, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado de la pieza para la aleación A356 y RC2.

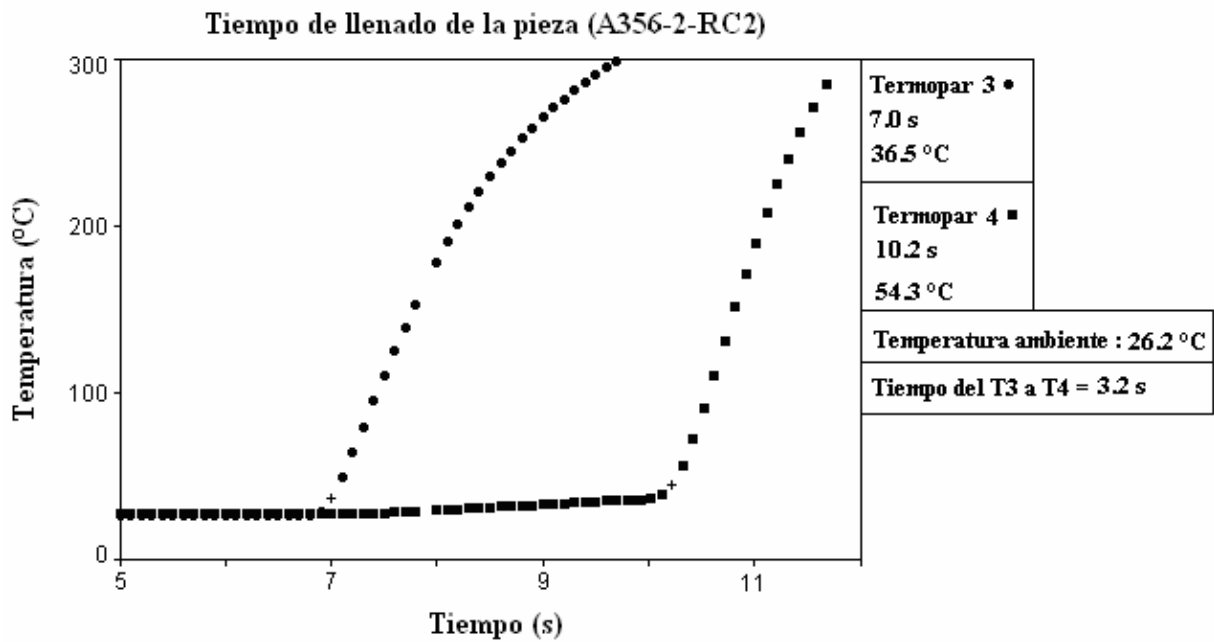


Figura 5.41. Prueba 2, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado de la pieza para la aleación A356 y RC2.



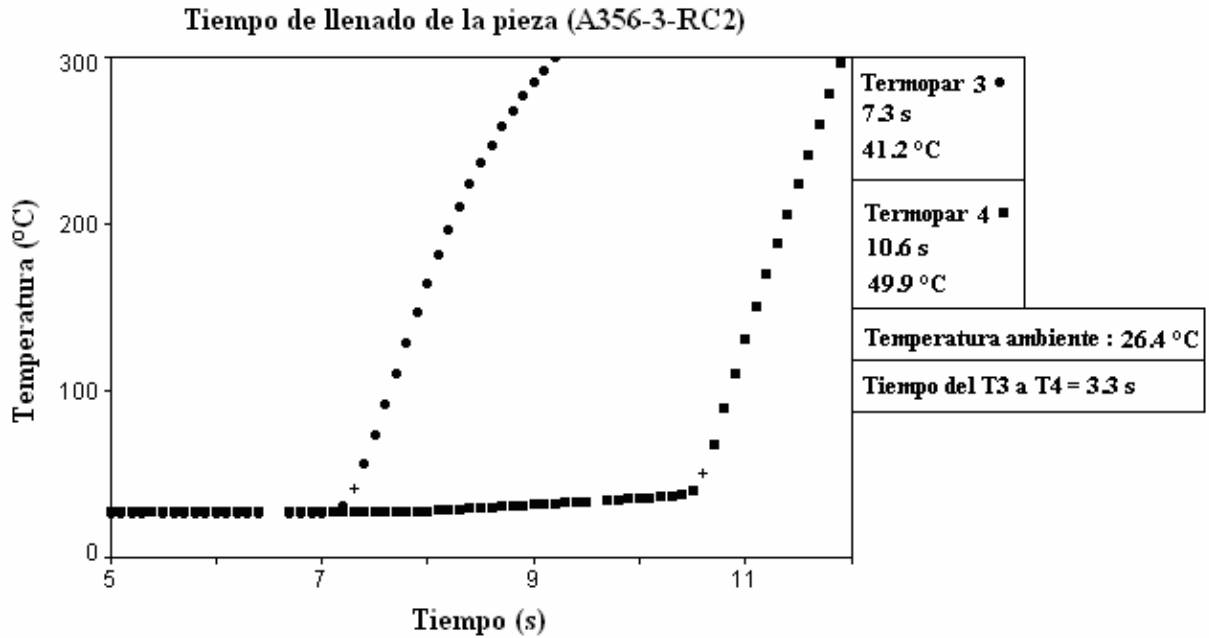


Figura 5.42. Prueba 3, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado de la pieza para la aleación A356 y RC2.

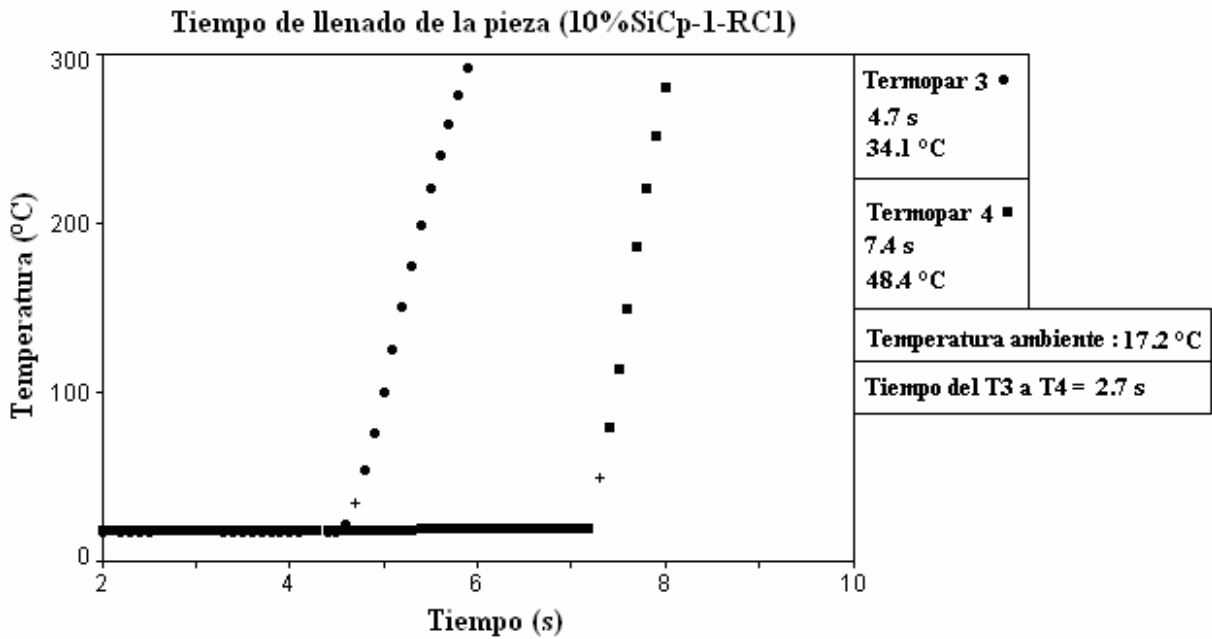


Figura 5.43. Prueba 1, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado del composito con 10 % SiCp para la RC1.



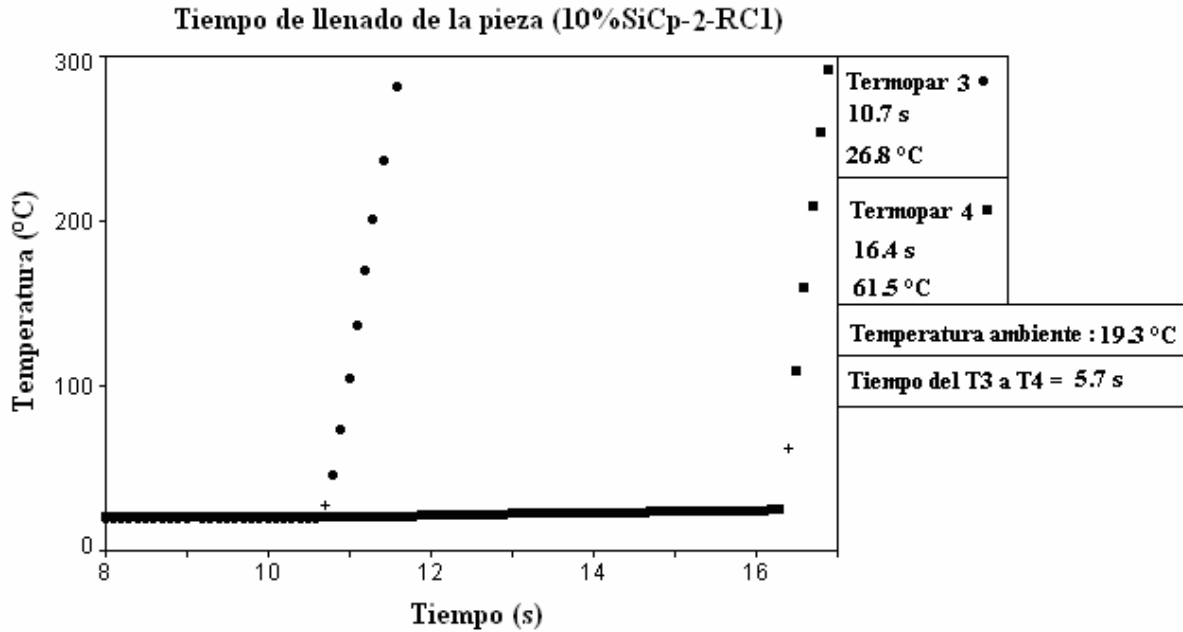


Figura 5.44. Prueba 2, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado del composito con 10 % SiCp para la RC1.

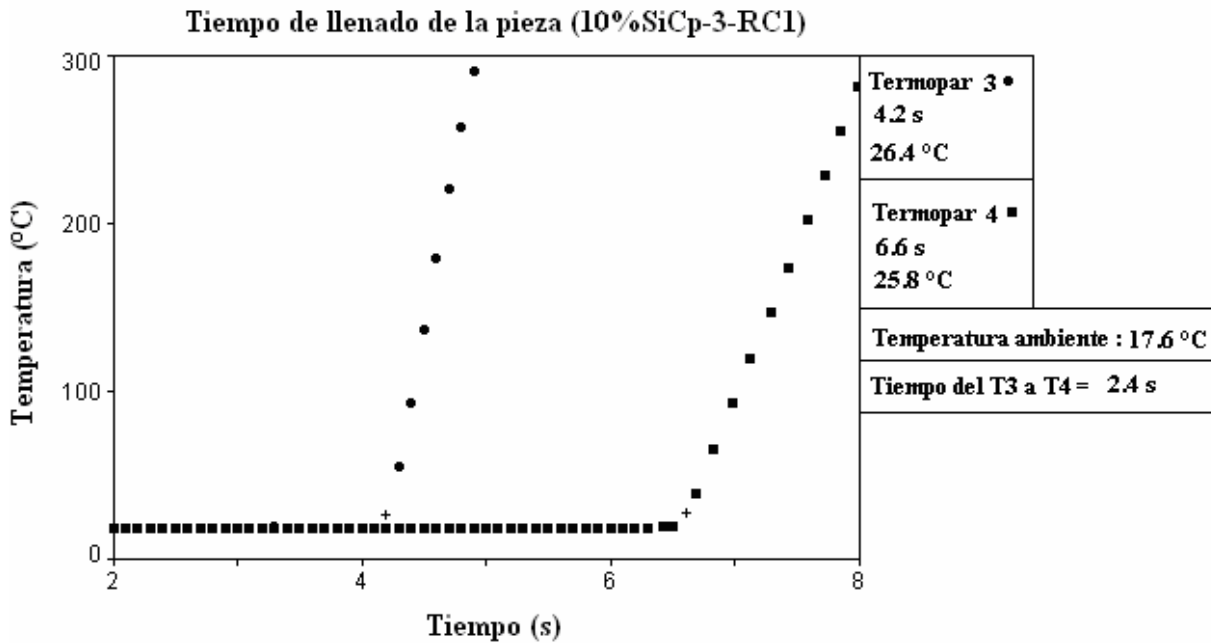


Figura 5.45. Prueba 3, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado del composito con 10 % SiCp para la RC1.



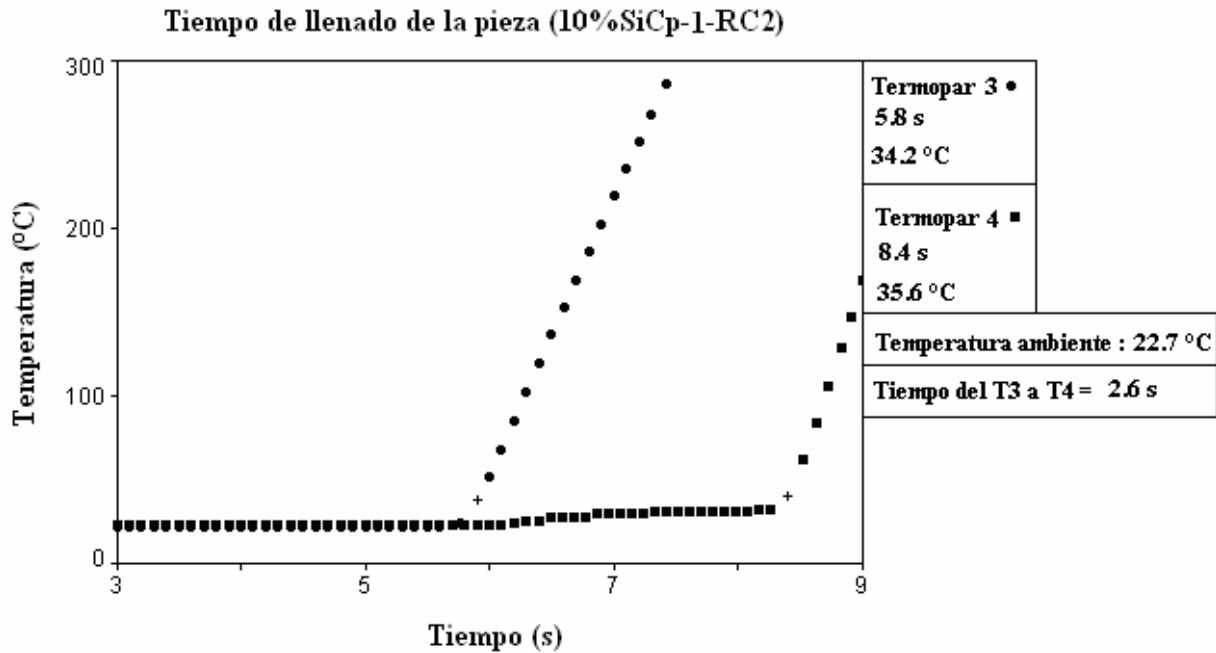


Figura 5.46. Prueba 1, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado del composito con 10 % SiCp para la RC2.

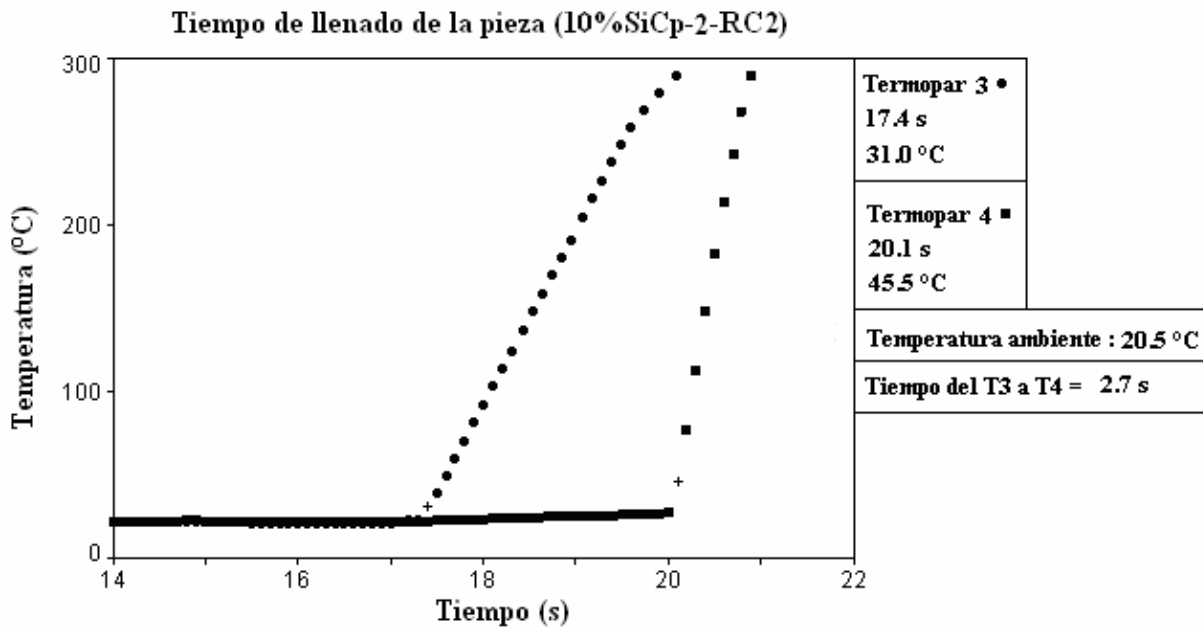


Figura 5.47. Prueba 2, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado del composito con 10 % SiCp para la RC2.



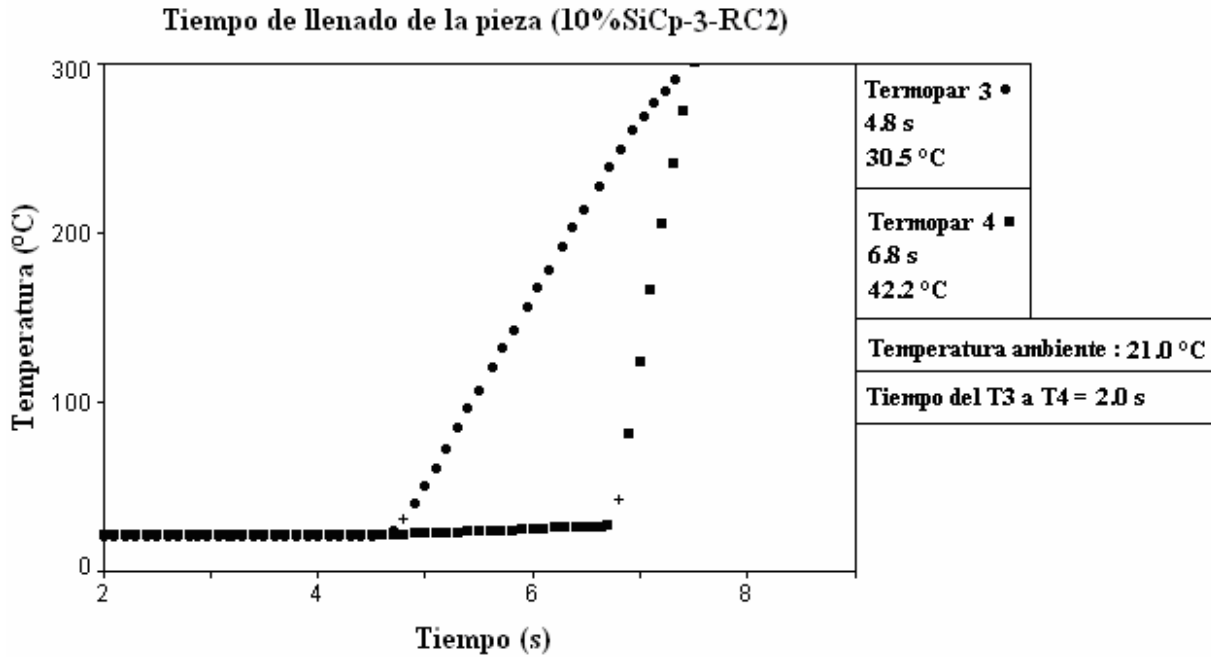


Figura 5.48. Prueba 3, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado del composito con 10 % SiCp para la RC2.

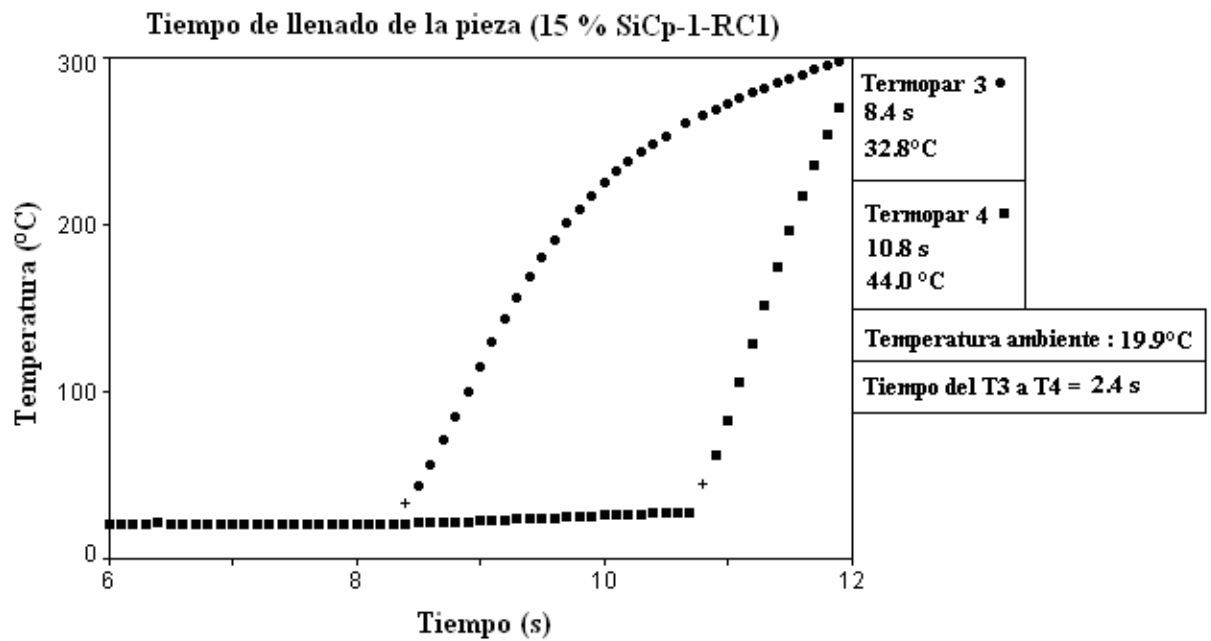


Figura 5.49. Prueba 1, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado del composito con 15 % SiCp para la RC1.



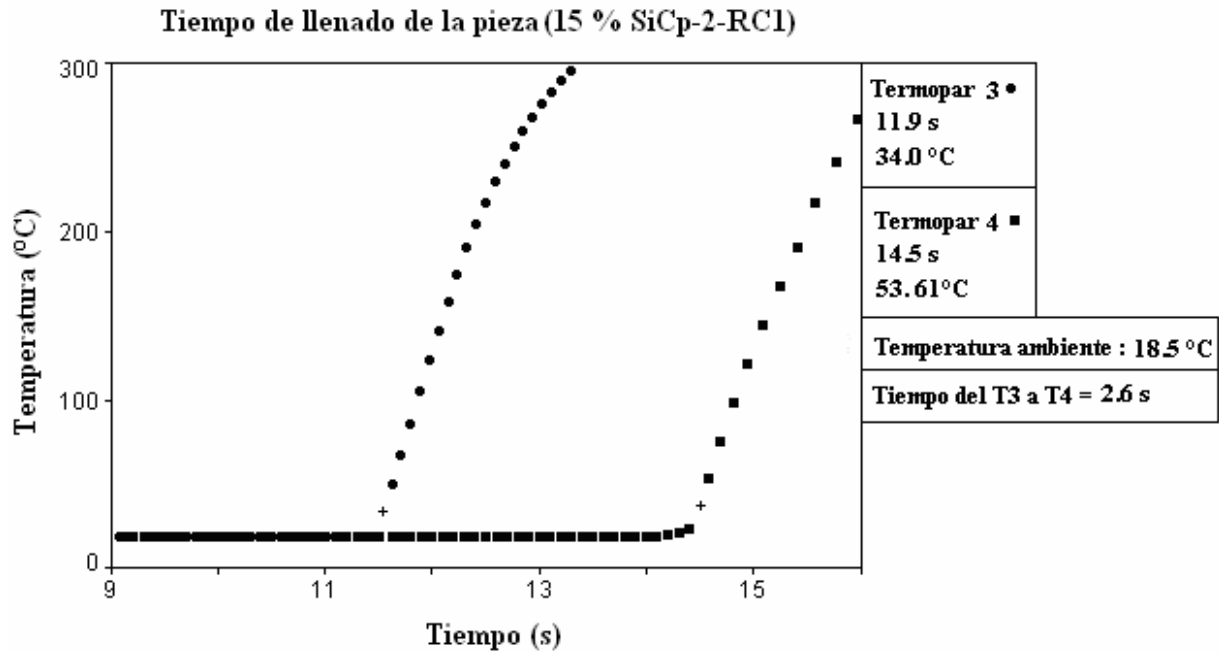


Figura 5.50. Prueba 2, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado del composito con 15 % SiCp para la RC1.

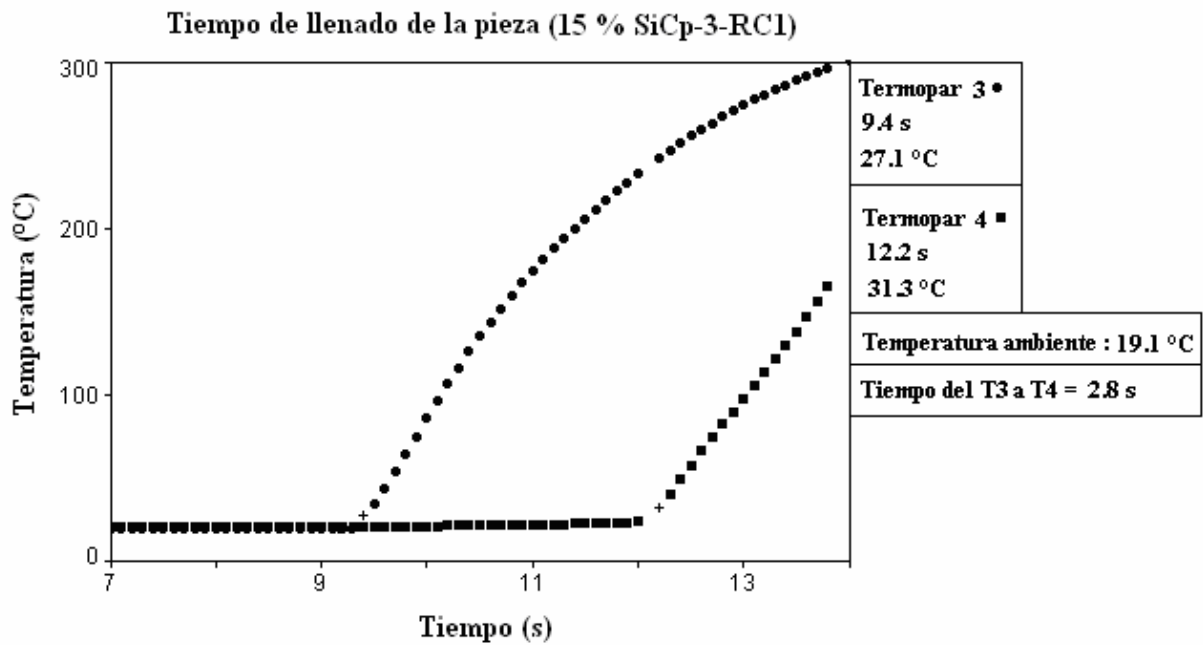


Figura 5.51. Prueba 3, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado del composito con 15 % SiCp para la RC1.



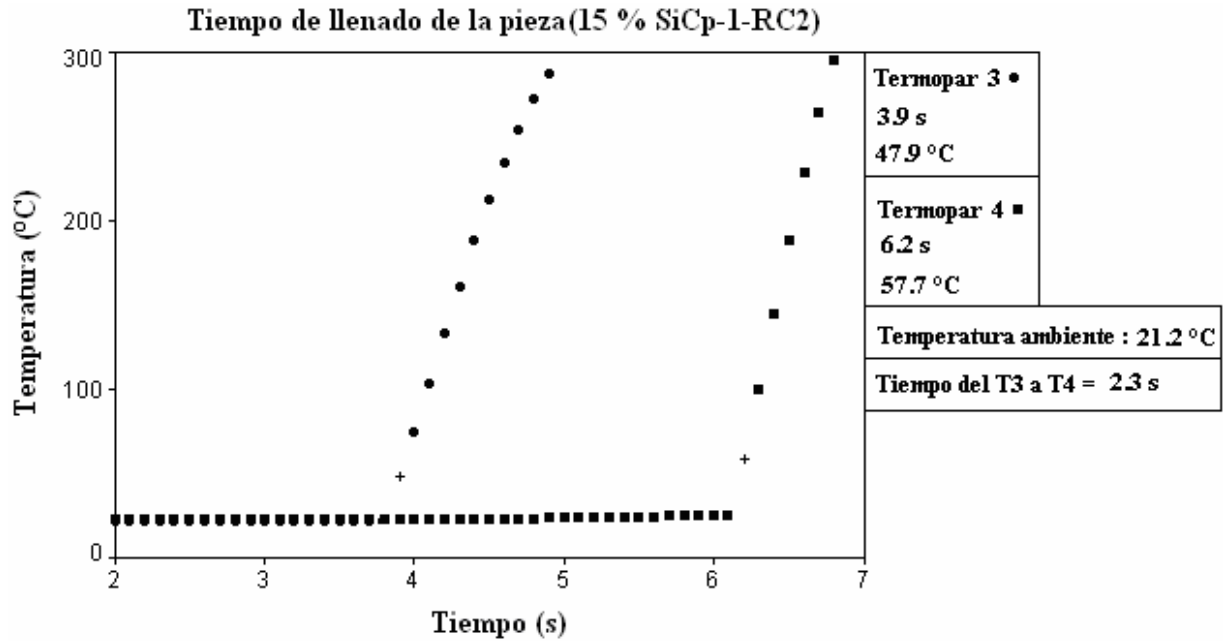


Figura 5.52. Prueba 1, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado del composito con 15 % SiCp para la RC2.

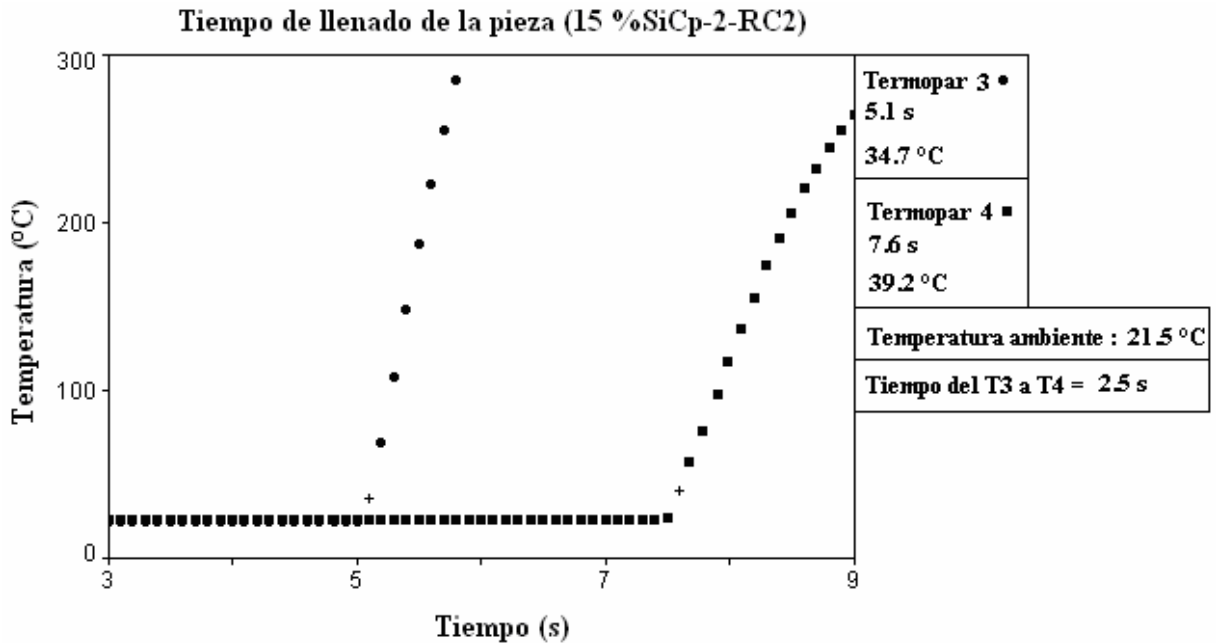


Figura 5.53. Prueba 2, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado del composito con 15 % SiCp para la RC2.



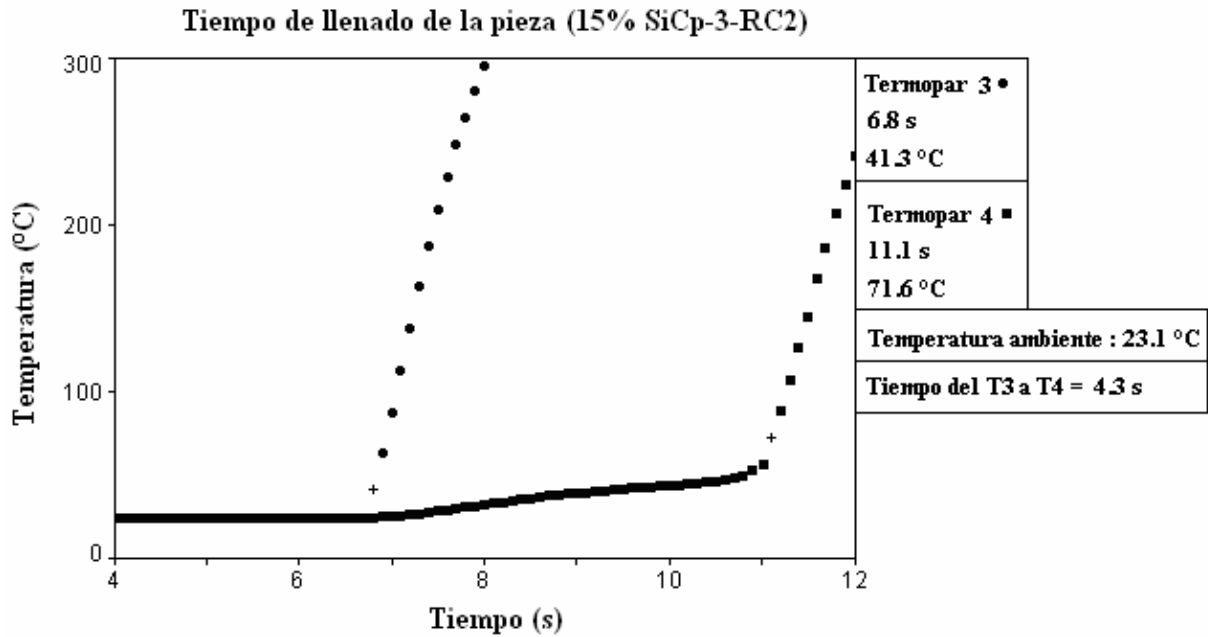


Figura 5.54. Prueba 3, análisis térmico para la determinación del tiempo de llenado del composito con 15 % SiCp para la RC2.

Los resultados de los tiempos obtenidos a partir de las gráficas anteriores se muestran en la Tabla 5.1, los cuales se utilizarán para el cálculo y análisis de las variables en estudio.

Aleación y # de prueba (Relación de colada)	Tiempo de llenado del sistema de colada (s).	Tiempo de llenado total (s).	Tiempo de llenado de la pieza (s).
A356-1 (RC1)	1.0	4.4	3.4
A356-2 (RC1)	1.0	5.0	3.9
A356-3 (RC1)	1.0	4.0	3.0
A356-1 (RC2)	0.7	3.0	2.1
A356-2 (RC2)	0.9	4.4	3.2
A356-3 (RC2)	0.8	4.1	3.3
A356/10%SiC _p -1 (RC1)	0.8	3.8	2.7
A356/10%SiC _p -2 (RC1)	1.0	6.9	5.7
A356/10%SiC _p -3 (RC1)	0.7	3.2	2.4
A356/10%SiC _p -1 (RC2)	0.7	3.4	2.6
A356/10%SiC _p -2 (RC2)	0.7	3.9	2.7
A356/10%SiC _p -3 (RC2)	0.6	2.9	2.0
A356/15%SiC _p -1 (RC1)	0.8	3.5	2.4
A356/15%SiC _p -2 (RC1)	0.8	3.7	2.6
A356/15%SiC _p -3 (RC1)	0.8	3.9	2.8
A356/15%SiC _p -1 (RC2)	0.7	3.1	2.3



A356/15%SiC _p -2 (RC2)	0.7	3.2	2.5
A356/15%SiC _p -3 (RC2)	0.9	5.7	4.3

Tabla 5.1. Resultados de los tiempos experimentales obtenidos por el análisis térmico.

5.2. CÁLCULO, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE: VELOCIDAD DEL FLUJO METÁLICO, NÚMERO DE REYNOLDS, GASTO VOLUMÉTRICO PROMEDIO DENTRO DEL SISTEMA DE COLADA Y DEL TIEMPO DE LLENADO DE LA PIEZA.

A continuación se muestran los cálculos, resultados, análisis así como la discusión de los mismos, todos estos fueron calculados a partir de los resultados experimentales de la medición de los tiempos presentados en la Tabla 5.1. Para ello se presentan en el siguiente orden: cálculo de las velocidades experimentales globales, número de Reynolds global y gasto volumétrico global que se generan en cada sistema de colada propuesto, finalmente se calcula y analiza el tiempo de llenado de la pieza.

En las aleaciones coladas base aluminio se utilizan sistemas de colada no presurizados, por lo que en estos sistemas el área de control corresponde al área transversal inferior de la bajada. Las relaciones de colada propuestas para este trabajo fueron tomadas de la bibliografía ³⁶ y sugeridas para aleaciones de aluminio, por lo que y de acuerdo con los objetivos establecidos, se generó información en relación a las condiciones de llenado del sistema de colada y la pieza, tanto para la aleación sin reforzar como para los composites con 10 y 15 % en volumen de SiC_p. Uno de los parámetros más importantes es la velocidad de flujo la cual tiene un efecto directo en el cálculo del número de Reynolds, el gasto volumétrico y el tiempo de llenado.

5.2.1. Velocidades experimentales promedio dentro del sistema de colada.

Para la obtención de las velocidades experimentales globales dentro del sistema de colada, se parte de los tiempos registrados por el análisis térmico, en el Capítulo 4 se explicó como se determinan éstos tiempos. Para el cálculo de esta variable se tomó como primer dato la distancia entre el primer termopar situado en el inicio de la bajada (termopar 1) y el termopar colocado al final de la entrada (termopar 2), ver Figura 4.4 del Capítulo 4. Como segundo dato



se toma el tiempo que tarda en llegar el metal líquido de uno a otro termopar, este dato se obtiene a partir de las curvas generadas en el adquisidor de datos, de manera que, el cálculo de la velocidad experimental se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$v = d/t$, donde: v es la velocidad calculada en cm/s y d es la distancia entre termopares en cm., la cual comprende a todo el sistema de colada desde la bajada hasta la entrada y t es el tiempo en segundos que tarda en recorrer el metal líquido todo el sistema. Para los casos en estudio la distancia entre los termopares es de 22.7 cm. para ambos diseños.

De acuerdo a las relaciones de colada propuestas, RC1 = 1: 2: 3 y RC2 = 1: 1.5: 2, se esperaría que la velocidad del metal líquido generada dentro del sistema de colada para la RC1 fuera menor que en la RC2, esto debido a que la RC1 presenta mayores áreas transversales por componente, lo cual tiene como consecuencia que no se desarrollen altas velocidades. Los resultados de las velocidades experimentales promedio calculadas dentro del sistema de colada se muestran en la Tabla 5.2, en la misma se presentan también los valores promedio de las velocidades teóricas que se esperaría dentro del sistema de colada para cada aleación, la cual se calcula a partir de la Ley de Continuidad:

$A_1v_1 = A_2v_2 = A_3v_3$; dónde A_1 , A_2 y A_3 representan las áreas transversales de la bajada, corredor y entrada respectivamente en cm^2 y v_1 , v_2 y v_3 son las velocidades que se generan en dichos componentes en cm/s.

Inicialmente se conocen las áreas transversales de cada componente y la única velocidad que se puede calcular es la uno (velocidad en la bajada), aplicando el Principio de Torricelli:

$v = (2gh)^{1/2}$, donde g es la aceleración debido a la gravedad en cm/s^2 , h es la altura de la bajada en cm.

A partir de esta velocidad se pueden conocer las otras dos para posteriormente compararlas con las velocidades experimentales. Cabe señalar que para este cálculo no se toma en cuenta el factor de fricción ó coeficiente de descarga, llamado también por algunos autores como coeficiente de pérdida total. Sin embargo de acuerdo a Bjoklund³⁷ este coeficiente de pérdida total se puede calcular como:

$C_D = \text{Velocidad actual} / \text{Velocidad teórica}$, el resultado obtenido para este trabajo se muestra en la Tabla 5.2.



Aleación (Relación de colada).	Velocidad experimental promedio dentro del sistema de colada (cm/s).	Velocidad teórica promedio dentro del sistema de colada. (cm/s).	Coefficiente de pérdida total (C_D).
A356 (RC1)	22.70	74.62	0.30
A356 (RC2)	30.26	88.18	0.34
A356/10%SiC _p (RC1)	30.26	74.62	0.40
A356/10%SiC _p (RC2)	34.39	88.18	0.38
A356/15%SiC _p (RC1)	28.37	74.62	0.38
A356/15%SiC _p (RC2)	32.42	88.18	0.36

Tabla 5.2. Resultados de las velocidades experimentales y teóricas promedio.

Al observar los resultados de las velocidades experimentales y teóricas, se puede apreciar que las experimentales son mucho menores que las teóricas, lo cual se ve reflejado en el coeficiente de pérdida total, lo cual significa que éste depende del tipo de aleación así como de la relación de colada, por lo que existen pérdidas significativas por fricción cuando el metal líquido fluye a través de cada uno de los componentes del sistema de colada, debido a la viscosidad del material, rugosidad del molde, los cambios de área y dirección, así como a la geometría de cada uno de ellos. En general las velocidades experimentales disminuyen cerca de un 65 ± 5 % comparadas con las velocidades teóricas.



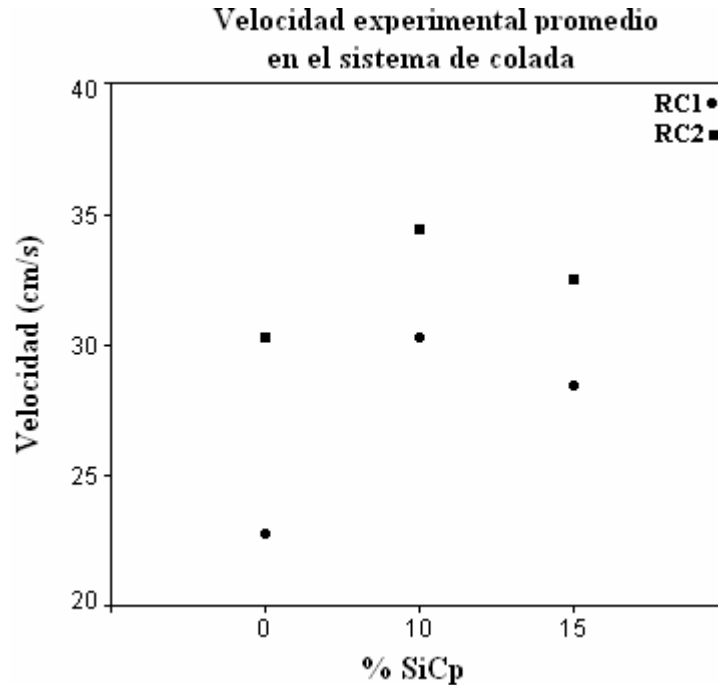


Figura 5.55. Resultados de las velocidades experimentales promedio generadas dentro del sistema de colada, para cada aleación en estudio.

Los resultados de la Tabla 5.2 se muestran comparativamente en la Figura 5.55, en donde se puede visualizar que las velocidades para las aleaciones en estudio son mayores en el caso de la RC2, por las razones mencionadas anteriormente.

Comparando las velocidades experimentales entre aleaciones para una relación de colada fija se observa que las velocidades son mayores en los composites. La máxima velocidad se alcanza en el composite con 10% de SiCp y RC2. El comportamiento de los composites líquidos en los sistemas de colada obtenidos experimentalmente, contradice a lo mencionado por Rohatgi ³⁸ que señala que las velocidades de los composites en el sistema de colada son menores que en las aleaciones sin reforzar debido al efecto del incremento en la viscosidad por la presencia de reforzantes, lo cual también disminuye la fluidez del composite, el autor sin embargo no presenta evidencia cuantitativa.

Con el propósito de explicar el comportamiento anterior y las diferencia con lo citado por Rohatgi ³⁸, estudios realizados por Dutta B. ³⁹ y Moon H. K. ⁴⁰ y, indican que cuando existen partículas reforzantes las cuales tienen una conductividad térmica menor que la matriz, pueden afectar el gradiente de temperatura en el frente de la punta de la dendrita con velocidades de



enfriamiento estable, es decir, puede existir una saturación térmica debido a la retención de calor por dichas partículas, lo cual hace suponer que la temperatura no disminuya tan rápidamente como en la aleación sin reforzar, lo que puede repercutir en la fluidez y en el tiempo de solidificación y por tanto en las velocidades de los flujos de composites líquidos a través del sistema de colada durante el llenado de la pieza.

En relación al índice de fluidez, estudios recientes realizados por Escobar Mejía ⁴¹ indican que esta característica de los materiales líquidos es muy importante durante el llenado de la cavidad del molde, para el caso de los composites del sistema Al-7Si/SiCp presentan mayor fluidez que la aleación sin reforzar, el % de fluidez para composites reforzados con 10 y 15 % de SiC es mayor a 104.55 ± 2.55 % cuando las temperaturas de colada son de 710 a 810 °C. Basado en el comportamiento de mayor fluidez en los composites, los resultados obtenidos de las velocidades para este material explican las mayores velocidades en el sistema de colada durante el llenado de la pieza experimental

De acuerdo a las velocidades experimentales obtenidas, éstas se encuentran por debajo de las velocidades críticas reportadas por J. Runyoro ⁴², donde menciona que durante el llenado a moldes la velocidad del metal líquido (para aleaciones de aluminio) no debe de exceder los 50 cm/s, ya que de lo contrario puede generarse turbulencia lo cual trae como consecuencia oxidación del metal líquido, erosión de arena, etc., repercutiendo lo anterior en la calidad de la pieza.

5.2.2. Número de Reynolds promedio experimentales dentro del sistema de colada.

El número de Reynolds (Re) es importante en sistemas de flujo de fluidos porque define el tipo de régimen presente: laminar, laminar-turbulento o turbulento, que se origina por el movimiento del fluido a través del sistema de colada. La importancia del Re aplicado a sistemas de coladas para moldes de arena en verde, radica en que es un parámetro en el cual además de determinar el régimen de flujo, puede ser relacionado con la posible erosión de arena de la pared del molde, atrapamiento de gases y aire e incluso oxidación del metal (flujo turbulento), por lo que es posible predecir la calidad de la pieza. De acuerdo a la selección de los sistemas de colada y los diseños propuestos (no presurizados), así como la aleación (aluminio), se espera que el flujo sea lo menos turbulento posible y con esto evitar que se



presenten defectos en la pieza asociados al sistema de colada (gases atrapados, llenado incompleto, erosión del molde).

Para el cálculo del número de Reynolds se utilizan los resultados de las velocidades experimentales, la viscosidad cinemática de cada aleación y el diámetro equivalente. Para el cálculo del número de Reynolds se emplea la siguiente ecuación:

$Re = D_e v / \nu$, donde: D_e es una dimensión transversal al flujo equivalente en cm, v es la velocidad del fluido en cm/s y ν es la viscosidad cinemática en cm^2/s .

Como se menciona anteriormente para estos tipos de sistemas empleados el área de control se localiza en la parte inferior de la bajada, por lo que el diámetro empleado en los cálculos corresponde a 0.93 cm.

La estimación del valor de la viscosidad cinemática (ν) para las tres aleaciones se realizó a una temperatura de 720 °C y se realiza en función del valor de la viscosidad dinámica (μ) y la densidad (ρ). Para determinar el valor de μ de la aleación comercial A 356, fue necesario emplear la Figura 5.56 reportada por W. R. D Jones y W. L. Bartlett ⁴³. Para su estimación es necesario conocer el % de silicio presente en la aleación y la temperatura de colada. Posteriormente se extrapola para ver a que curva intercepta y tomar el valor de la viscosidad dinámica, siendo éste de 0.0266 g/s cm.



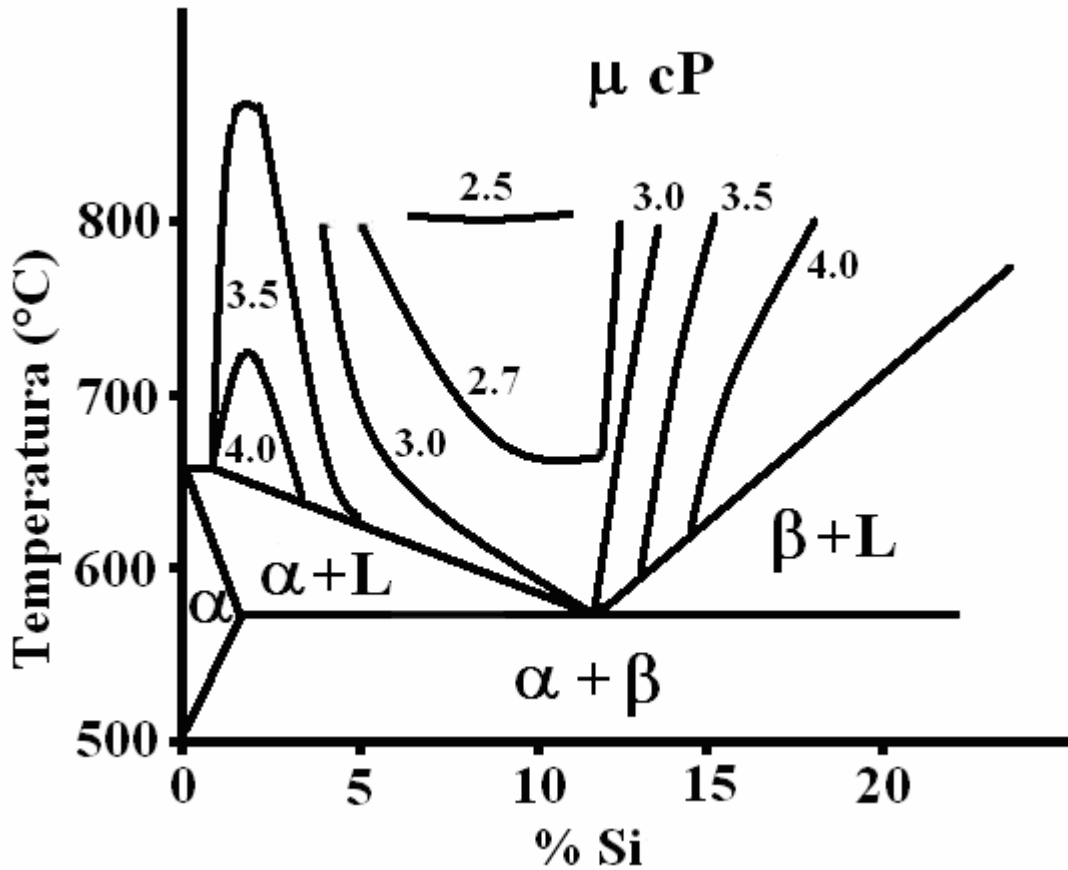


Figura 5.56. Valores de la viscosidad dinámica como función de la temperatura y del % de silicio.

Es importante enfatizar que el cálculo de la viscosidad dinámica es diferente para la aleación comercial A 356 y los composites con 10 y 15 % en volumen de reforzante (SiCp).

Para calcular la viscosidad dinámica de los composites se emplea la ecuación de Stokes-Einstein⁴⁴:

$$\mu_c = \mu_o (1 + 2.5V_f + 10.52V_f^2); \text{ para } V_f < 0.25,$$

Donde: μ_o y μ_c son las viscosidades cinemáticas de la aleación sin reforzar y del composite respectivamente y V_f es la fracción en volumen del reforzante, por lo que para un composite con 10% SiCp es:

$$V_f = 0.10, \frac{\mu_c}{\mu_o} = 1.3552.$$

y para el composite con 15% SiCp es:



$$V_f = 0.15, \frac{\mu_c}{\mu_o} = 1.6117.$$

Los resultados de las viscosidades se muestran en la Tabla 5.3.

Aleación.	μ (g/scm).
A356	0.0266
A356/10%SiC _p	0.036
A356/15%SiC _p	0.0428

Tabla 5.3. Resultados de las viscosidades dinámicas para las tres aleaciones en estudio.

Para el cálculo de la viscosidad cinemática es necesario conocer la densidad de cada aleación. La densidad de la aleación A356 se obtiene directamente de la literatura y para los compositos se calcula mediante la ecuación de la regla de las mezclas:

$$\rho_c = \rho_{A356} X_{A356} + \rho_{SiC_p} X_{SiC_p}.$$

Donde: ρ_c es la densidad del composito, ρ_{A356} es la densidad de la matriz, X_{A356} y X_{SiC_p} es la fracción en volumen de la matriz y del reforzante respectivamente.

La Tabla 5.4 muestran los resultados de los cálculos correspondientes.

Aleación.	ρ (g/cm ³).
A356	2.67
A356/10%SiC _p	2.723
A356/15%SiC _p	2.7495

Tabla 5.4. Resultados de las densidades para las tres aleaciones en estudio.

Por último se calcula la viscosidad cinemática de acuerdo con los datos de las Tablas 5.4 y 5.5. Estos valores se muestran en la Tabla 5.5.

Aleación.	ν (cm ² /s).
A356	0.0099
A356/10%SiC _p	0.0132
A356/15%SiC _p	0.0155

Tabla 5.5. Resultados de las viscosidades cinemáticas para las tres aleaciones en estudio.



Con los resultados obtenidos de velocidad experimental, diámetro equivalente y viscosidad cinemática se procede al cálculo del Re. En la Tabla 5.6 se presentan los valores del número de Reynolds (Re):

Aleación-Relación de colada.	Número de Reynolds (Re).
A356-RC1	2132
A356-RC2	2843
A356/10%SiC _p -RC1	2131
A356/10%SiC _p -RC2	2423
A356/15%SiC _p -RC1	1702
A356/15%SiC _p -RC2	2065

Tabla 5.6. Número de Reynolds (Re) promedio experimental generado dentro del sistema de colada para cada aleación en estudio.

Al analizar los resultados obtenidos para cada una de las aleaciones, muestra que el Re obtenido en la aleación sin reforzar es mayor en la RC2 que en la RC1, lo cual es válido debido a que en la RC2 (1:1.5:2) se generan velocidades mayores que en la RC1 (1:2:3). Para los compositos con 10 y 15 % de SiC_p el efecto del Reynolds es de manera similar a la presentada por la aleación sin reforzar (A356), es decir mayor Re para la RC2.

De la Tabla 5.6 se puede observar que el valor del Re es prácticamente el mismo en la aleación sin reforzar y el composito con 10%, para la RC1, mientras que el composito reforzado con 15% de SiC_p, su valor disminuye, lo anterior se puede explicar en base a la viscosidad cinemática. De acuerdo a los resultados obtenidos y basándose en lo reportado por Dutta y Surappa¹⁸ la viscosidad cinemática se incrementa con el contenido de SiC_p, entonces se esperaría que el composito con 15% presente una mayor viscosidad cinemática y por ende también una mayor viscosidad dinámica. Lo anterior significa que el Re disminuye a medida que aumenta la viscosidad dinámica debido a que las fuerza viscosas predominan sobre las fuerzas inerciales.



Por otra parte, comparando el Re de las tres aleaciones en estudio, se puede apreciar en la Figura 5.57 que la aleación sin reforzar presenta los valores más altos que en los compositos con 10 y 15 % de SiCp, a pesar de que en ésta aleación se presentaron las menores velocidades, se puede notar también que el efecto de la viscosidad cinemática es muy notorio ya que presentan una menor viscosidad comparada con la de los compositos con 10 y 15% de SiCp.

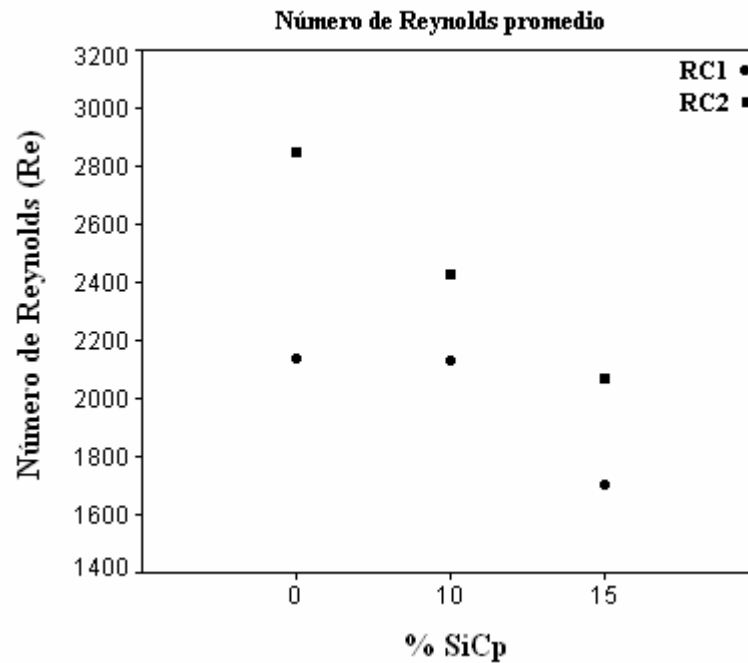


Figura 5.57. Representación gráfica del número de Reynolds promedio para cada aleación.

Referente a datos en la bibliografía del Re para metales líquidos en canales, la AFS³⁶ cita valores numéricos del Re para establecer el régimen de flujo que predomina dentro del sistema de colada, en la Tabla 5.7 se muestran estos valores. Al comparar los valores del Re de dicha tabla con los obtenidos experimentalmente, se establece que para las tres aleaciones y las dos relaciones de colada, el Re se encuentra bajo un régimen de transición laminar –turbulento, a excepción de la aleación con 15 % de SiCp con RC1, el cual presenta valores para mantener un régimen de un flujo laminar.



Tipo de flujo	Re
Laminar.	< 2000
Laminar-turbulento	>2000 a < 20000
Turbulento	> 20000

Tabla 5.7. Valores del número Reynolds correspondientes al tipo de flujo que se origina dentro del sistema de colada.

5.2.3. Gasto volumétrico experimental promedio dentro del sistema de colada.

El gasto volumétrico ó másico del llenado de una pieza tiene relación directa con el tiempo de llenado. Este último parámetro es importante debido a que tiempos muy largos de llenado pueden provocar problemas de derrumbes dentro de la cavidad del molde debido al tiempo de exposición de las paredes de la cavidad a la radiación del flujo metálico y por consecuencia formar costras de arena en la superficie de la pieza. Caso contrario tiempos muy cortos de llenado pueden promover altas velocidades del flujo metálico causando erosión de las paredes del molde y atrapamiento de gases.

El cálculo del gasto volumétrico experimental se obtiene a partir del área de control y las velocidades obtenidas experimentalmente, por lo que se esperaran gastos mayores en relaciones de colada mayores, que es el caso de la relación 1:2:3. El cálculo del gasto volumétrico se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$G_v = v_{exp} A$$

Donde: v_{exp} es la velocidad experimental generada dentro del sistema en estudio en cm/s A es el área de control del sistema en nuestro caso el área inferior de la bajada

De acuerdo a la Ley de Continuidad el valor de G_v debe ser igual en todos los componentes (bajada, corredor y entrada). En este trabajo se calculo un gasto global a partir de las velocidades promedio generadas desde la bajada hasta la entrada para cada material y relación de colada experimental. Los resultados de los gastos volumétricos experimentales se comparan contra el gasto volumétrico teórico, estos se muestran en la Tabla 5.8.

Aleación.(Relación de	Gasto volumétrico	Gasto volumétrico	% de pérdida de
-----------------------	-------------------	-------------------	-----------------



colada)	experimental promedio (cm ³ /s).	teórico (cm ³ /s).	gasto.
A356 (RC1)	15.4	50.7	69.6
A356 (RC2)	20.6	60.0	65.6
A356/10%SiC _p (RC1)	20.6	50.7	59.4
A356/10%SiC _p (RC2)	23.4	60.0	61.0
A356/15%SiC _p (RC1)	19.3	50.7	61.9
A356/15%SiC _p (RC2)	22.0	60.0	63.3

Tabla 5.8. Resultados comparativos entre los gastos volumétricos experimentales y los teóricos.

Como se puede apreciar en la tabla 5.8 los gastos teóricos son significativamente mayores que los experimentales, esta diferencia se explica en base a las pérdidas por fricción que tiene el flujo metálico a través del sistema de colada. Las cuales de acuerdo a los resultados obtenidos alcanzan valores de $64.5 \pm 5.1\%$.

De la Figura 5.58 también se puede observar que los gastos siempre son mayores en la RC2 (1:1.5:2), lo cual es asociado a que las velocidades son mayores. La explicación a lo anterior es que a pesar de que la RC1 (1:2:3) tiene un área mayor secuencial de expansión que la RC2, donde se esperaría que el gasto fuera mayor, notamos que el efecto del área no influye debido principalmente a que ésta es la de control, la cual es la misma para ambas relaciones de colada (0.68 cm.), por lo que la variable significativa para este caso es la velocidad.

Sí se comparan los gastos para las tres aleaciones experimentales se observa que los menores valores se presentan en la aleación sin reforzar y los mayores en el compuesto con 10 % de SiC_p, observar Tabla 5.8. Lo anterior se puede explicar en base a que las velocidades experimentales máximas y mínimas obtenidas de manera global se encuentran en las aleaciones del compuesto con 10 % de SiC_p y sin reforzar respectivamente, esta comparación se puede visualizar en la Figura 5.58.



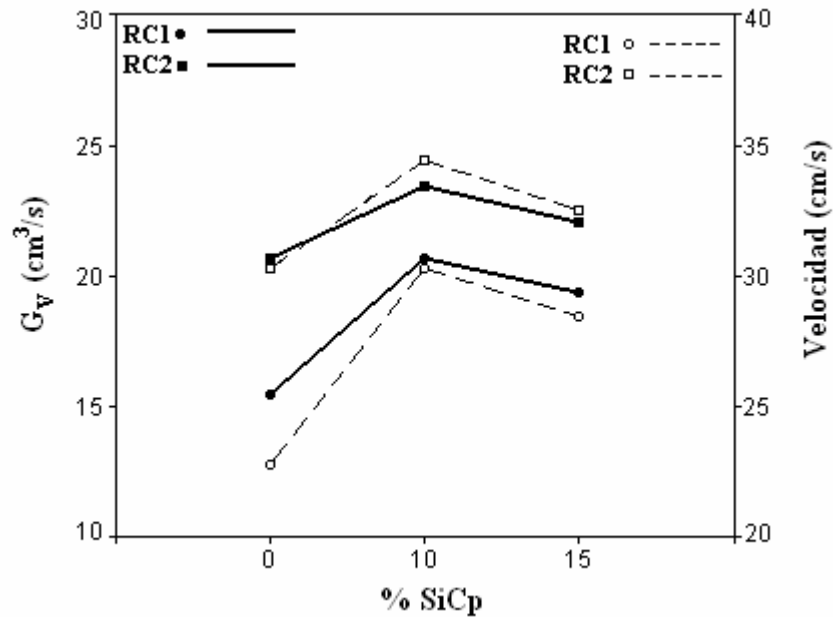


Figura 5.58. Comparación gráfica de los gastos volumétricos y las velocidades experimentales promedio en cada aleación (----- velocidad, ——— gasto).

5.2.4. Tiempo de llenado de la pieza.

Los tiempos de llenado de la pieza al igual que el gasto se calculan, analizan y comparan desde tres puntos de vista: (1) de acuerdo al análisis térmico experimental, (2) en base a los gastos volumétricos experimentales en la entrada considerando el volumen de la pieza y (3) en base a lo que establece el método de diseño de la AFS para piezas de aleaciones base aluminio convencionales. Los resultados se muestran en la Tabla 5.9.

El tiempo de llenado de acuerdo al análisis térmico se obtiene directamente de los resultados registrados por el termopar 3 y 4, ver Figura 4.4 del Capítulo 4.

El tiempo de llenado a partir de los gastos volumétricos se calcula a partir de la siguiente relación:

$$G_v = V / t, \text{ por lo tanto se puede decir que: } t_{ll} = V / G_v \text{ ó } t_{ll} = V / vA_c,$$



CAPITULO V

Donde: t_{ll} es el tiempo de llenado de la pieza en segundos, V es el volumen de la pieza en cm^3 , v es la velocidad experimental a la cual va entrar a la pieza en cm / s y A_c es el área de control, en este caso corresponde a la bajada. Los datos requeridos para este cálculo son:

- Velocidades: son las reportadas en la Tabla 5.2.
- Volumen de la pieza = 100.53 cm^3 .
- Áreas: para ambas relaciones es de 0.68 cm .

Por último el tiempo de llenado calculado por el método AFS para la pieza bajo se obtuvo a partir de la siguiente relación:

$$t_{ll} = w_p / G_m$$

donde w_p es el peso de la pieza en lb. y G_m es el gasto másico en lb/s.

Los resultados de los tres tiempos se reportan en la Tabla 5.9.

Aleación y Relación de colada	1. Tiempo de llenado obtenido por análisis térmico (s).	2. Tiempo de llenado obtenido a partir de los gastos experimentales (s).	3. Tiempo de llenado teórico, MétodoAFS (s).
A356 (RC1)	3.43	6.49	1.10
A356 (RC2)	3.25	4.88	1.10
A356/10%SiC _p (RC1)	2.55	4.88	—
A356/10%SiC _p (RC2)	2.30	4.30	—
A356/15%SiC _p (RC1)	2.60	5.21	—
A356/15%SiC _p (RC2)	2.40	4.57	—

Tabla 5.9. Comparación de los resultados de los tiempos de llenados obtenidos por: (a) análisis térmico, (b) a partir de gastos experimentales y (c) de acuerdo al método de la AFS, para aleaciones monolíticas.



Analizando los resultados obtenidos por el análisis térmico, con respecto a la relación de colada se observa que el menor tiempo de llenado para cada una de las aleaciones se encuentra en las RC2, lo cual es congruente con los resultados calculados de las velocidades de llenado, es decir, a mayor velocidad menor es el tiempo de llenado, ver Figura 5.59.

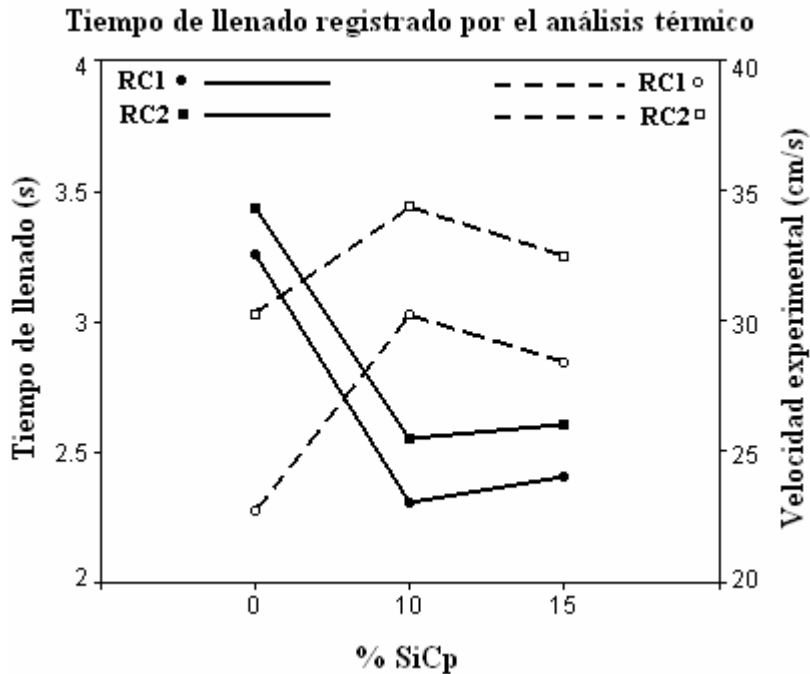


Figura 5.59. Representación gráfica de las velocidades experimentales y tiempos de llenado experimentales en función del contenido de SiCp. (—Tiempo de llenado, - - -Velocidad).

Los resultados de los tiempos de llenado obtenidos a partir de los gastos experimentales de acuerdo a la relación de colada muestran que son mayores para la RC2. Lo anterior se fundamenta a que el único efecto sobre esta variable es el gasto ya que el volumen siempre es el mismo en ambas relaciones. De acuerdo a lo anterior, sí el tiempo de llenado es inversamente proporcional al gasto, por lo tanto se tiene que a gastos mayores el tiempo de llenado es menor, por lo que los gastos experimentales obtenidos siempre son mayores en la RC2 y por consecuencia los tiempos disminuyen. En la Sección 5.2.3 del presente capítulo se justifican los valores obtenidos del gasto experimental.



Los resultados del tiempo de llenado calculado de acuerdo a la AFS únicamente son para la aleación sin reforzar ya que es exclusivamente para aleaciones monolíticas de aluminio, esto se puede apreciar en la Tabla 5.9, donde solo se presentan los valores de la aleación sin reforzar. El tiempo de llenado de la pieza fue de 1.10 segundos para ambas relaciones, observando que este método no toma en cuenta para el cálculo de dicho tiempo la relación de colada.

Al comparar los valores de los tiempos de llenado obtenidos por el análisis térmico y los gastos experimentales se puede notar que estos últimos son mayores, para una mejor visualización ver la Figura 5.60. La posible explicación de que los resultados sean diferentes, no así el comportamiento (ya que para ambos tiempos los mayores se encuentran en la RC1), es que el primer tiempo toma en cuenta exclusivamente lo que tarda en llenar la pieza en base a los datos registrados por los termopares 3 y 4, en cambio para el segundo tiempo calculado, la única variable significativa es el gasto y en específico la velocidad, ya que el volumen y el área de control es la misma en ambas relaciones.

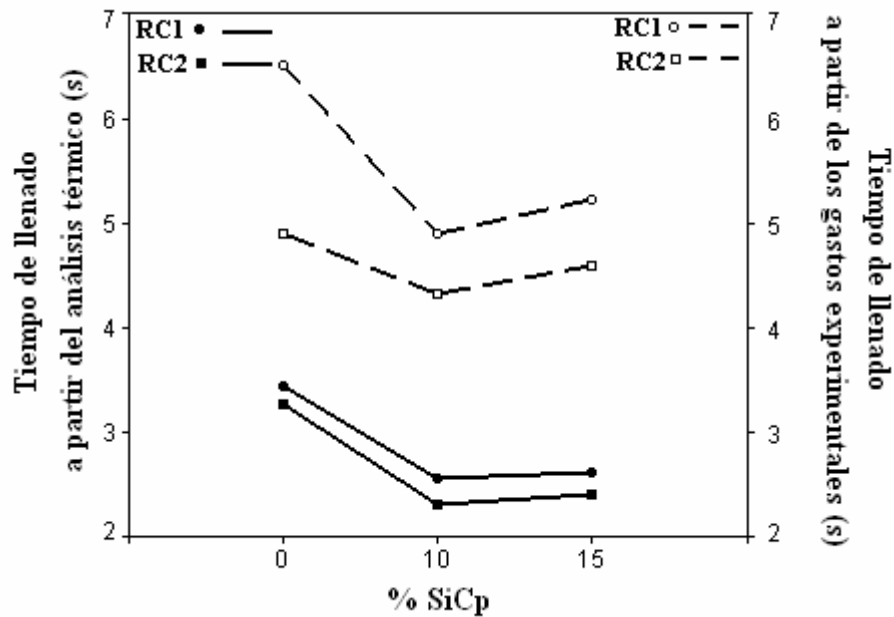


Figura 5.60. Comparación gráfica de los tiempos de llenado experimentales en función del contenido de SiCp. (—Tiempo de llenado a partir del análisis térmico, ----Tiempo de llenado a partir de los gastos experimentales).

Comparando los 3 tiempos de llenado se observa que el calculado por el Método de la AFS, es el que presenta el menor tiempo, lo anterior es una consecuencia de que este método no toma en cuenta al tipo de relación de colada, las cuales repercuten en la velocidad a la que va a entrar el metal líquido para llenar la cavidad y tampoco se hace mención a valores globales o parciales del factor de fricción en el sistema de colada, además este valor considera que la pieza se sitúa totalmente por debajo de la línea de partición, por lo que no habrá ningún contratiempo durante el llenado. Sin embargo si la pieza se encuentra dividida o totalmente por arriba de la línea de partición, el tiempo de llenado esperado debería ser mayor, debido a que el metal líquido que fluye por la entrada debe contrarrestar la presión metalostática después de que el nivel de metal líquido rebasa la línea de partición.

Por otra parte al comparar los valores de los tiempos de llenado con respecto a las relaciones de colada se puede apreciar que la RC2 presenta los menores, lo cual conlleva a que estos valores tienen una coherencia de acuerdo a los resultados de las velocidades obtenidas, si se observa la Tabla 5.2 y se comparan con los tiempos, las velocidades mayores se encuentran en la RC2, lo cual hace suponer y confirmar que los tiempos de llenado en esta relación son menores.

Al comparar los tiempos de llenado para las tres aleaciones, los menores se encuentran en los compositos con 10% de SiCp, lo cual hace suponer que las temperaturas del metal líquido no se pierden tanto y por lo tanto la fluidez sea mayor que las otras dos aleaciones (compositos con 15 % de SiCp y aleación sin reforzar), teniendo como consecuencia la afirmación de que las velocidades más altas se encuentren en esta aleación (ver Sección 5.2.1 del presente Capítulo).



Por último si se analizan únicamente los compositos, los que presentan los tiempos de llenado mayores son lo que tienen 15 % de SiCp. La explicación que tentativamente se puede dar de acuerdo a los resultados obtenidos es en base a las velocidades obtenidas. Anteriormente se mencionó que las velocidades más altas se encuentran en los compositos con 10 %, por lo que hace suponer que la distribución de partículas

5.3. EFECTO DE LA RELACIÓN DE COLADA SOBRE LA DISTRIBUCIÓN DE PARTÍCULAS.

Una de los problemas importantes en piezas de fundición de compositos colados en moldes de arena es la segregación de partículas por asentamiento o flotación de las mismas durante el llenado y solidificación de la pieza. Esto tiene como consecuencia una distribución heterogénea del reforzante en la matriz y deficiencia en las propiedades mecánicas. Considerando lo anterior un aspecto importante en esta tesis fue la evaluación de la distribución de las partículas de SiC en la pieza y relacionar los resultados con el diseño de colada aplicado. La evaluación se realizó a nivel cualitativo y comparativo entre las piezas.

La figura 5.61, muestra comparativamente la distribución de partículas para la relación de colada 1, en ella se puede apreciar distribuciones muy similares y ligeramente mejores en el caso de los compositos con 10%. Para el caso del compositos reforzado con 15 % existen algunas zonas libres de partículas, lo anterior se puede explicar en base a estudios realizados por Vugt L. y Froyen L. ⁴⁵, mencionando que a medida que se incrementa el % de SiCp, el carburo se va aglomerando formando los llamados cluster, de tal manera que cuando se observa la distribución, existen zonas libres de carburo dentro de las piezas.



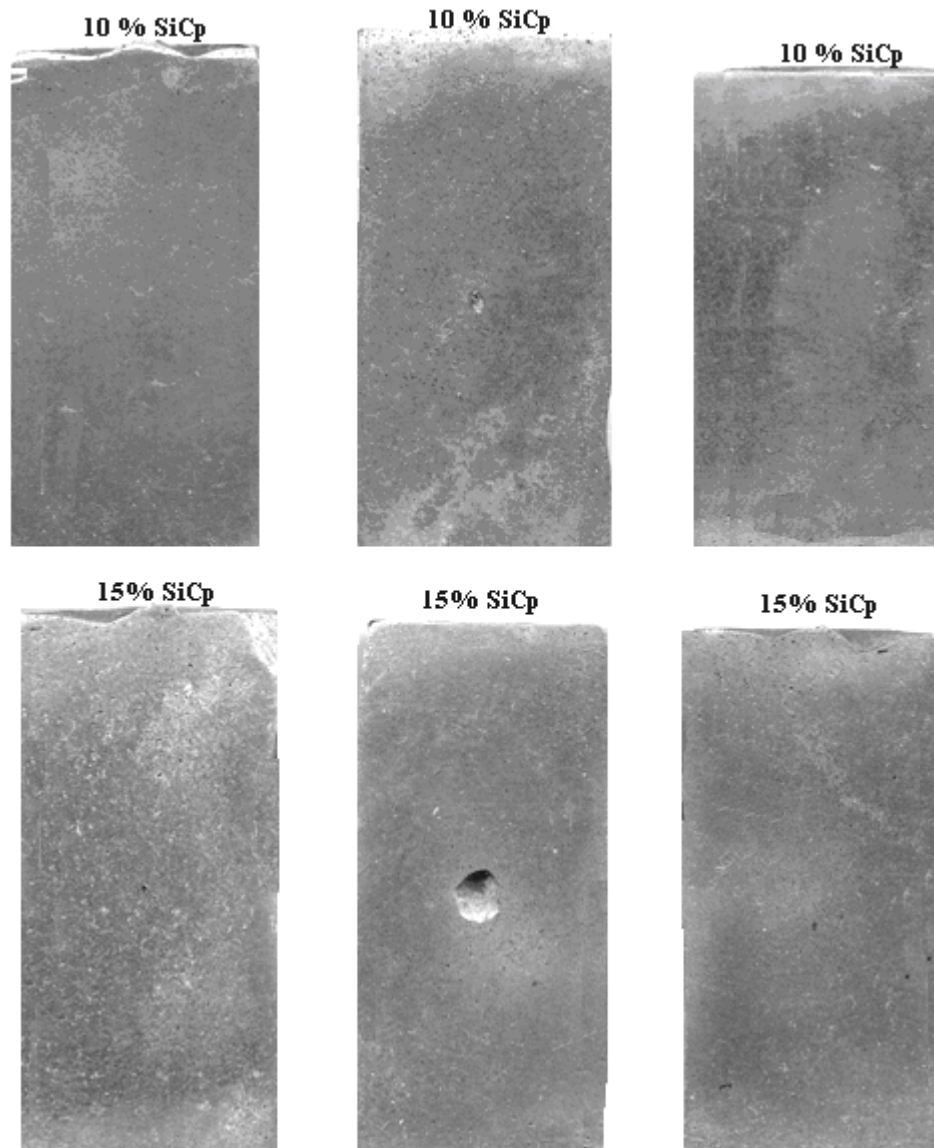


Figura 5.61. Distribución de partículas en la pieza para los compositos con 10 y 15% de SiCp para la relación de colada 1. (Diámetro de la pieza: 4 cm.).

Para la relación de colada 2, la distribución de partículas se presenta en la figura 5.62. Al igual que en la RC1 se nota una ligera mejor distribución en los compositos con 10% de SiCp.



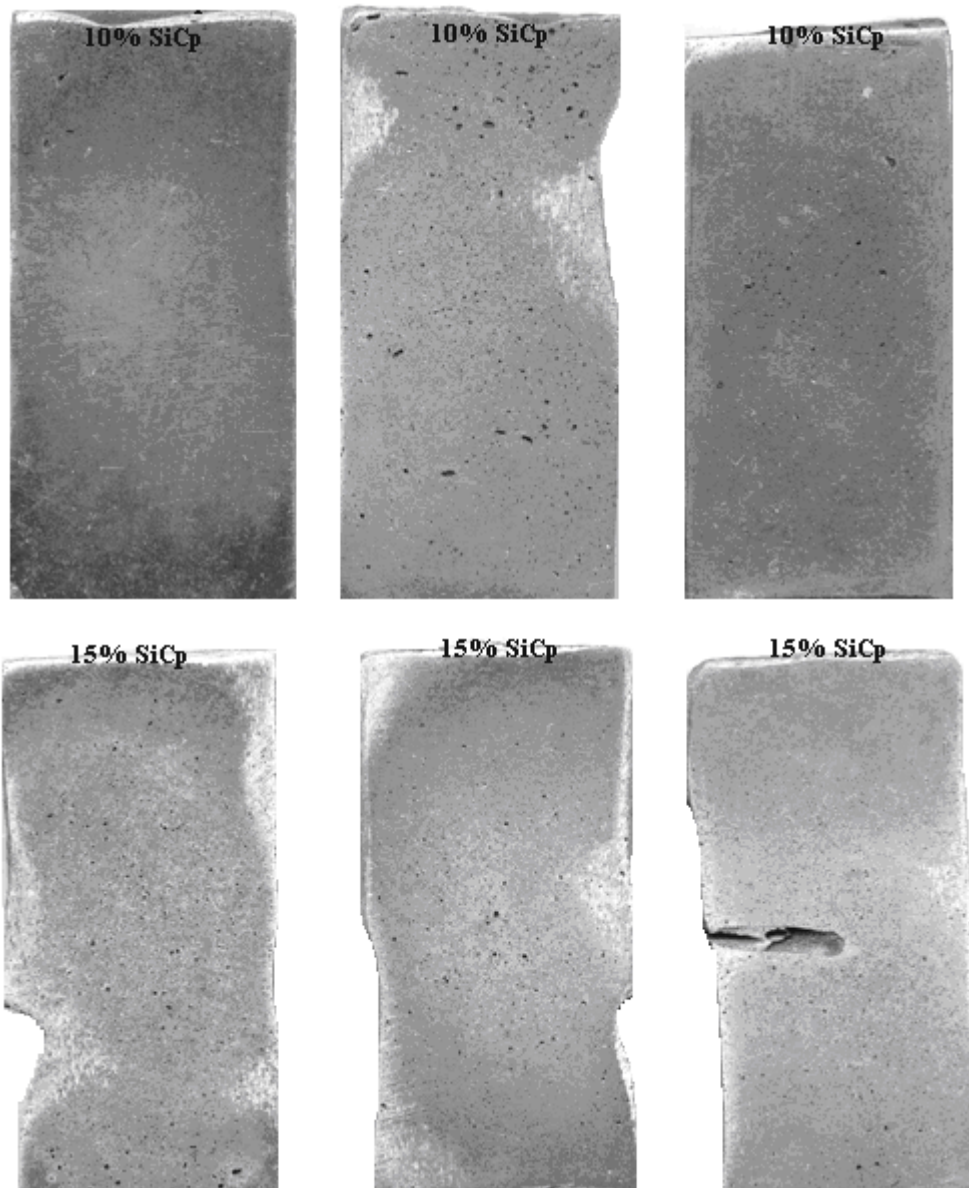


Figura 5.62. Distribución de partículas en la pieza para los composites con 10 y 15% de SiCp para la relación de colada 2.



La mejor distribución de SiCp para las piezas obtenidas con RC2 se asocia a las velocidades y Reynolds mayores los cuales provocan regímenes laminares-turbulentos durante el llenado de la pieza, condición que explica la distribución de las mismas a través de toda la matriz. Sin embargo como se observa en la Figuras 5.61 y 5.62, las piezas obtenidas con RC2 presentan un mayor nivel de porosidad, debido a que las altas velocidades de llenado provocaron el atrapamiento de gases y aire.

Finalmente se aprecia que las condiciones de llenado de las piezas de composites colados establecidas por las relaciones de colada y el diseño del mismo son muy importantes en la calidad de las piezas.



CAPITULO VI.

CONCLUSIONES.

De acuerdo a los resultados obtenidos y su análisis, para las relaciones de colada, la aleación A356 y los dos compositos estudiados en el presente trabajo, las conclusiones finales son las siguientes:

1. La técnica empleada para la determinación de la velocidad experimental, se tiene que perfeccionar debido a que puede generar controversia en la determinación de los tiempos obtenidos por el análisis térmico.
2. Los resultados obtenidos con respecto a las velocidades experimentales globales son coherentes considerando que se utilizaron sistemas no presurizados (1:2:3 y 1:1.5:2), en los que el incremento en las áreas transversales (área transversal bajada < área transversal del corredor < área transversal de la entrada), propician una disminución en la velocidad.
3. Comparando las velocidades en el sistema de colada de la aleación monolítica (A356) con respecto a los compositos (10 y 15 % SiCp), estas últimas son mayores debido a la presencia de partículas de SiCp, las cuales aparentemente retardan la solidificación del flujo metálico haciéndolo más fluido que la aleación monolítica.
4. El número de Reynolds se ve afectado por la viscosidad cinemática y esta a su vez por el % de refuerzo (SiCp), por lo que de acuerdo a la ecuación de Stokes-Einstein la viscosidad cinemática es mayor con altos contenidos de SiCp y en consecuencia el número de Reynolds se ve disminuido.



5. La metodología de cálculo empleada para la obtención del gasto volumétrico es a partir de las velocidades experimentales y del área de control (bajada), por lo que se tienen gastos mayores en la RC2.
6. Los tiempos de llenado de la pieza generados por el análisis térmico son mayores en un rango del 33 al 50% que los obtenidos a partir de los gastos experimentales.
7. De acuerdo a las relaciones de colada propuestas para corredores y entradas cortos se concluye que se tiene una mejor distribución con porcentajes de 10% SiCp.
8. Existe una distribución de partículas más homogénea y con menor cantidad de porosidad en los compositos que utilizan la RC1, debido a que se genera una menor turbulencia que en las RC2. esta distribución se puede decir que está íntimamente ligada con el tiempo de llenado, es decir, a menores tiempos de llenado se observa una mejor distribución de las partículas.
9. Para los compositos, es posible obtener piezas de buena calidad sin necesidad de que los componentes del sistema sean tan extensos y que las relaciones de colada sean muy grandes (1: 8: 8 ó 1: 10: 10), por lo que la relación peso del sistema de colada-peso de la pieza será menor y por ende los rendimientos con respecto a la relación anterior aumentarán.



RECOMENDACIONES.

De acuerdo a lo realizado en el presente trabajo, se proponen las siguientes recomendaciones empleando el mismo proceso de fabricación de piezas:

Para la evaluación de las variables: velocidad, Re, gasto volumétrico y tiempo de llenado de la pieza las propuestas son las siguientes:

1. Proponer una pieza de composito de uso industrial y relaciones de colada que no sean tan grandes para que los retornos sean menores, recordando que en la industria siempre se trata de reducir los costos.
2. Realizar un estudio de las velocidades generadas en cada componente del sistema de colada (bajada, corredor, entrada). La información generada conlleva a la determinación del Re y gasto volumétrico. La importancia de lo anterior es ver el comportamiento que tiene el metal líquido desde el punto de vista de flujo de fluidos.
3. Realizar estudios con respecto a la solidificación de la pieza y relacionarlo con el tiempo de llenado y la evaluación metalográfica (distribución del SiCp).
4. La técnica experimental que se propone es: emplear un sistema de adquisición de datos con mayor sensibilidad, de preferencia que registre un dato cada 0.01 segundo, esto se menciona debido a estudios realizados anteriormente ⁴⁶, donde el principal problema fue determinar la velocidad experimental en la bajada.



BIBLIOGRAFÍA.

1. 1. Ourdjini A., Chew K. C., Khoo B. T., “ *Settling of silicon carbide particles in cast metal matrix composites*”, Journal of Materials Processing Technology, 2001, p.p. 72-76.
2. Ejiofor J. U., Reddy R. G., “*Developments in the processing and properties of particulate Al-Si composites*“, The Minerals, Metals & Materials Society, 1997, p.p. 31-37.
3. Attia A. N., “*Surface Metal Matrix Composites*”, Material and Desing, 2001, p.p. 451-457.
4. King F., “*El aluminio y sus aleaciones*”; Editorial Limusa, 1992, p.p. 107-110.
5. Tiriyakioglu M., Askeland D. R. and Ramsay C. W., “*Relationnship Between Metal Fluidity and Optimum Pouring Time: A Literature Review*”, AFS Transactions, año, p.p. 93-120.
6. Bindumadhavan P. N., Chia T. K., Chandrasekaran M., Wah H. K., Lam L. N., Prabhakar O., “*Effect of Particle-Porosity Clusters on Tribological Behavior of Cast Aluminum Alloy A356-SiCp Metal Matrix composite*”, Materials Science and Engineering, 2001, p.p. 217-226.
7. Miracle B. D., Donaldson S. L., “*Introduction to Composites*” Air Force Research Laboratory, 2001, p.p. 1-17.



8. Stefanescu D. M., “*Issues in Liquid Processing of Particulate Metal Matrix Composites*”. In: Taha MA, El-Mahallawy NA, editors. *Advances in Metal Matrix Composites*. Switzerland: Trans Tech Publications, 1993, p.p. 75-89.
9. T. W. Clyne, “*Metal Matrix Composites: Matrices and Processing*”; *Encyclopaedia of Materials: Science and Technology*, 2001, p.p. 2-14.
10. Hashmi J., Looney L., Hashmi M. S. J., “*Particle distribution in cast metal matrix composites-Part I*”; *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, p.p. 251-257.
11. Thomas D.G., *AIChEJ.*, 1962, p.p. 373.
12. Lloyd D. J., *J. Int. Mater. Rev.* 39, 1994, p.p. 1-23.
13. Mortensen A., Jin I., *Int. Mater. Rev.* 37, 1992, p.p. 101-128.
14. Strobl S. M., “*Fundamentos en la preparación y control de la arena verde*”; *Modern Casting, FundiExpo 2000*, p.p. 5-8.
15. Fuoco R., Cabezas C. S., Corrêa E. R. y Bastos M. A., “*Study and Gating System Desing for Aluminum Gravity Casting Using Water Models*”, 1st International Conference on Gating, Filling and Feeding of Aluminum Castings, AFS 1999, p.p. 65-86.
16. Sulaiman S. and Keen I-H. C., “*Flow Analysis Along the Runner and Gating System of a Casting*”, *Journal Materials Processing Technology*, 1997, p.p. 690-695.



17. Barkhudarov M. R., “*Advanced Simulation of the Flow and Heat Transfer Processes in Simultaneous Engineering*”, Flow Science, 1998, p.p. 1-15.
18. Masoumi M., Hu H., “*Effect of Gating Design on Mold Filling*”, AFS Transactions, 2005, Paper 05-152 (02), p.p. 1-12.
19. Kennedy D. O., Church J. C., “*Gating Castable Metal Matrix Composite*”, AFS Transactions, 1991, p.p. 729-735.
20. Hoover W.R., “*The Commercialization of Castable Aluminum Composites*”, 2nd International Conference on Cast Metal Matrix Composites, AFS 1994, p.p. 1-7.
21. Savage W.J., “*Process, Technology, Plant and Equipment Requirements for the Large Scale Production of Aluminum Based Particulate Reinforced MMC's*”, 2nd International Conference on Cast Metal Matrix Composites, AFS 1994, p.p. 100-109.
22. Weiss D. J., Rose D., “*Foundry Experience in Casting Aluminum Metal Matrix Composite*”, AFS Transactions, año, p.p. 1065-1076.
23. Cox B. M., Doutré D., “*Advances in the Commercialization of the Shape Casting of Aluminum Composites*”, 2nd International Conference on Cast Metal Matrix Composites, AFS 1994, p.p. 88-98.
24. Perry's Chemical Engineers' Handbook, “*Section 6: Fluid and Particle Dynamics*”, The McGraw-Hill Companies, Inc., 1999, p.p. 6-6.



25. Rundman K. B., “*Metal Casting*”, Dept. of Materials Science and Engineering, Michigan Tech. University, p.p. 39-40.
26. Giles R. V., “*Theory and Problems of Fluid Mechanics and Hidraulics*”, McGraw-Hill, Inc., 1962, p.p. 71-72.
27. McParland A. J., “*Fluidity and Macrosegregation in Al-Si Alloys*”, Solidification Processing Conference, Sheffield, U.K., 1987, p.p. 323-326.
28. F. R. Mollard, M. C. Flemings, E. Niiyama, H. F. Taylor, “*Mold Variables Influence on Fluidity of Aluminum*”; AFS Transactions, 1961, p.p. 566-576.
29. B. P. Betts, V. Kondic; “*Effects of Moulds Dressings on Casting Fluidity of Some Alloys*”; The British Foundryman, 1961, p.p. 1-4.
30. J. Jorstad, “*Aluminum Casting Technology*”, AFS 2nd, 1993, p.p. 353.
31. Metals Handbook, Vol. 15 “*Casting*”, ASM, 1988.
32. Enciclopedia del Aluminio, Volumen 4, URMO 1974.
33. Heine, Loper, Rosenthal, “*Principles of Metal Casting*”, McGraw-Hill Book Co., 1967.
34. Latimer and Read, “*A Review of Theruning, Gating and Feeding Aluminum*”, British Foundryman, 1976, p.p. 44-52.
35. Titov and Stepanov, “*Tecnología del Proceso de Fundición*”, Editorial Mir. Moscú, 1981.
36. American Foundrymen’s Society, “*Gating and Risering*”; Course No. 7-250.



37. Bjoklund B., “*Calculating Ingate Dimensions for Gray Iron Casting*”, AFS Transactions, 1962, p.p. 193-205.
38. Rohatgi P. K., Surappa M. K., “*Fluidity of Aluminum-Silicon-Alumina Composites*”; Metallurgical Transaction B, 1981, p.p. 327-332.
39. Dutta B., Surappa M.K., “*Directional Solidification of a Composite Slurry: Part I Dendrite Morphology*”; Metallurgical and Materials Transaction, April 1998, p.p. 1319-1327.
40. Moon H. K., Sc. Dissetation, MIT, 1990, p.p. 359-360.
41. Escobar Mejia L. D., “*Efecto de la Temperatura de Colada, Fracción de SiCp y Sr sobre la Fluidez de un Composito A356/SiCp*”, Tesis de Maestría, Facultad de Química, UNAM, 2005.
42. Runyoro, J.; Boutorabi, S. M. A. & Campbell, J., “*Critical Gate Velocities for Film-Forming Casting Alloys; A Basis for Process Specification*”, AFS Transactions, 1992, p.p. 225-234.
43. Jones W. R. D, Bartlett W. L., Journal Institute Metals, 1952, p.p. 145.
44. Dutta B. Surappa M. K., “*Microstructure Evolution During Multidirectional Solidification of Al-Cu-SiC Composites*”; Composites Part A, 1998, p.p. 565-573.



45. Vugt L., Froyen L., “*Gravity and Temperature Effects on Particle Distribution in Al-Si/SiC Composites*”, Journal of Materials Processing Technology, 2000, p.p. 133-144.
46. Ruiz A. G., García J. A., Atlatenco E. C., Escobar L. D., “*Estudio de las Variables que Afectan la Relación Tiempo de Llenado-Distribución de Partículas para el Cálculo del Sistema de Colada para Piezas de Composito Al-Si-SiCp Coladas en Arena* “, Jornadas SAM/CONAMET 2005– MEMAT 2005, Mar del Plata, Octubre del 2005.

