

DISEÑO DE UN MOLDE PARA FUNDICIÓN DE ALUMINIO POR INYECCIÓN

DAVID RICARDO TRIANA PRIETO

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

FACULTAD DE INGENIERIA, DIVISIÓN DE INGENIERIA MECANICA

BOGOTÁ D.C

2019

DISEÑO DE UN MOLDE PARA FUNDICIÓN DE ALUMINIO POR INYECCIÓN

DAVID RICARDO TRIANA PRIETO

TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD:
SOLUCION A UN PROBLEMA DE INGENIERIA,
PARA OPTAR AL TITULO DE: INGENIERO MECANICO

DIRECTOR
INGENIERO JORGE ANDRES GARCIA BARBOSA

CODIRECTOR
INGENIERO ANDRES FELIPE CIFUENTES GOMEZ

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERIA, DIVISIÓN DE INGENIERIA MECANICA
BOGOTÁ D.C
2019

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	11
INTRODUCCIÓN.....	12
OBJETIVOS.....	14
CAPITULO 1. REQUERIMIENTOS DE DISEÑO DEL MOLDE	15
1.1. PIEZA A FABRICAR.....	15
1.2. CONTRACCIONES	21
1.3. TIEMPO DE LLENADO	23
1.4. SISTEMA DE LLENADO DEL MOLDE.....	25
1.5. COMPONENTES MECÁNICOS DE UN MOLDE	27
1.6. CONCLUSIONES	29
CAPITULO 2. ALTERNATIVAS DE DISEÑO MOLDE PERMANENTE	31
2.1. PATRONES DE FLUJO.....	31
2.2. SEGMENTACIÓN.....	33
2.3. CORREDORES	35
2.4. DISEÑO DE CAVIDADES	38
2.5. ANALISIS DE LAS ALTERNATIVAS	41
2.6. CONCLUSIONES	44
CAPITULO 3. DISEÑO EN DETALLE MOLDE PERMANENTE	45
3.1. COMPUERTAS	45
3.1.1. VOLUMENES DE LOS SEGMENTOS.....	45
3.1.2. CAUDAL.....	46

3.1.3.	AREA DE LA COMPUERTA	47
3.1.4.	AREA ACTUAL	48
3.1.5.	LONGITUD Y ESPESOR	49
3.1.6.	ANALISIS PQ2	53
3.2.	CORREDOR TANGENCIAL	59
3.3.	CORREDOR PRINCIPAL	63
3.4.	REBOSADEROS	65
3.5.	MAZAROTA.....	67
3.6.	CONCLUSIONES	68
CAPITULO 4. ANALISIS TERMICO		69
4.1.	SECCIONES TERMICAS	69
4.2.	CALOR BASICO DE CADA SECCIÓN.....	71
4.3.	CALOR CEDIDO EN TRANSITO	74
4.4.	TRANSFERENCIA DE CALOR NETA.....	78
4.5.	CALOR PERDIDO EN LA SUPERFICIE	82
4.6.	CONCLUSIONES	86
CAPITULO 5. DISEÑO DEL MOLDE EN SOFTWARE CAD		87
CONCLUSIONES		95
REFERENCIAS		97
ANEXOS		98
ANEXO A.....		99

LISTADO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Dimensiones del álabe recibida.	16
Figura 2. Sugerencias de diseño para evitar defectos en las piezas.	17
Figura 3. Vista superior y frontal del álabe con la identificación de los filos vivos.	18
Figura 4. Vista en isométrico del álabe con sus filos vivos redondeados.	18
Figura 5. Representación ángulo de salida en molde de arena.	19
Figura 6. Comandos empleados para la obtención de la línea de partición.	19
Figura 7. Vista frontal del álabe con su respectiva línea de partición.	20
Figura 8. Plano de partición para el álabe.	21
Figura 9. Porcentajes de contracción por solidificación.	21
Figura 10. Obtención del álabe escalado.	22
Figura 11. Obtención del espesor promedio.	25
Figura 12. Sistema de alimentación del molde.	26
Figura 13. Esquema máquina de cámara fría.	27
Figura 14. Identificación de los componentes de un molde permanente	29
Figura 15. Patrones de flujo de las piezas correspondientes.	31
Figura 16. Patrones de flujo para el álabe.	32
Figura 17. Segmentación de la Figura 15(D).	33
Figura 18. Segmentación del álabe.	34
Figura 19. Espesor de pared a lo largo del álabe.	34
Figura 20. Fan runner.	35
Figura 21. Representación corredora tangencial.	36
Figura 22. Tipos de corredores. Corredor tangencial (A), <i>fan runner</i> (B).	38
Figura 23. Tipos de sistema de alimentación para matriz de multi-cavidades.	39
Figura 24. Tipos de diseño de balanceado para matriz multi-cavidad, (a) sistema de alimentación central, (b) sistema de alimentación inferior.	39

Figura 25. Tipos de diseño sistema de alimentación matriz multi-cavidad. (a) Sistema de alimentación inferior en línea, (b) sistema de alimentación inferior en serie	40
Figura 26. Volumen de toda la pieza.	45
Figura 27. Volumen del segmento 1.	46
Figura 28. Volumen del segmento 2.	46
Figura 29. Ángulo de flujo.	48
Figura 30. Procedimiento para determinar las dimensiones de la compuerta.	49
Figura 31. Grafica PQ2.	54
Figura 32. pq2 para el caso de estudio.	59
Figura 33. Secciones del corredor.	60
Figura 34. Dimensiones del corredor	60
Figura 35. Región delta.....	63
Figura 36. Dimensiones del corredor principal.....	64
Figura 37. Dimensiones del rebosadero y compuerta de salida.	66
Figura 38. Dimensiones del rebosadero y compuerta de salida para el caso de estudio.	67
Figura 39. Sistema de llenado para el álabe.....	68
Figura 40. Secciones térmicas del álabe.	70
Figura 41. Flujo del metal a través de cada sección térmica durante el llenado ...	75
Figura 42. Procedimiento para abrir el asistente para la fabricación de moldes. ..	87
Figura 43. Tipos de moldes.	88
Figura 44. Ventana de selección de tamaños.	89
Figura 45. Distribución de las placas del molde.....	89
Figura 46. Selección de espesores de las placas del molde.	90
Figura 47. Transferencia CAD de las piezas.....	91
Figura 48. Molde obtenido mediante el asistente de Meusburguer.....	92
Figura 49. Placa móvil y fija del molde permanente.....	93
Figura 50. Molde terminado para el álabe.	94
Figura 51. Nomograma para determinar los canales de refrigeración.	99

Figura 52. Nomograma para el álabe.	101
--	-----

LISTADO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Valores requeridos para el cálculo del tiempo de llenado.	24
Tabla 2. Criterio de selección de acuerdo a la forma de la pieza a fundir.....	37
Tabla 3. Planteamientos de alternativas.	43
Tabla 4. Velocidades en la compuerta de entrada.....	47
Tabla 5. Cálculos diseño de compuerta.	49
Tabla 6. Factores de atomización para cada aleación.....	52
Tabla 7. Obtención del espesor y la longitud de la compuerta.	53
Tabla 8. Valores para la ecuación de Bernoulli.....	55
Tabla 9. Coordenadas para los puntos de la gráfica pq^2	58
Tabla 10. Dimensiones del corredor.	62
Tabla 11. Dimensiones para el corredor principal.....	65
Tabla 12. Relación del volumen del rebosadero respecto del espesor de pared...66	66
Tabla 13. Áreas superficiales y volúmenes de cada sección.	71
Tabla 14. Calores y temperaturas para el aluminio.....	73
Tabla 15. Calor básico de cada sección.	74
Tabla 16. Calor perdido durante el llenado de la cavidad.	77
Tabla 17. Análisis térmico para cada sección.....	79
Tabla 18. Porcentaje del área superficial para cada componente.	80
Tabla 19. Calor neto para cada componente.....	81
Tabla 20. Transferencia de calor final.....	83
Tabla 21. Transferencia de calor corregida.	85
Tabla 22. Valor de transferencia de calor corregida en Btu/Hr.	99
Tabla 23. Valores de área superficial en in^2	100

Dedicatoria

Esta tesis de grado es dedicada a mi madre, quien me ha demostrado siempre su cariño y apoyo incondicional. Te amo, mamá.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecerles a mis padres por el esfuerzo y sacrificio que han realizado para que yo pudiera cumplir con este objetivo. Tanto a mi hermano como a mis hermanitas, ya que son uno de los pilares de mi vida. A mi director y codirector de tesis por la disposición y colaboración prestada para que yo lograra culminar el trabajo de grado. A mis amigos y a mi novia por apoyarme y escucharme en los momentos que los necesité.

RESUMEN

Se diseñó un molde para fundición de aluminio por inyección para la geometría de un álabe de una turbina hidrocínética. Inicialmente, se determinaron los requerimientos de diseño del molde de inyección, posteriormente se realizó el planteamiento de alternativas y mediante la comparación de cada una, se seleccionó aquella que cumplía con todas las recomendaciones propuestas por NADCA (*North American Die Casting Association*). Permitiendo así, continuar la etapa de diseño en detalle del molde, la cual se centra en los cálculos de los canales de alimentación (compuertas, corredores, rebosaderos y mazarota) y el análisis térmico de toda la cavidad. Por último, se realizó el CAD tanto de los componentes mecánicos del molde como de los canales de alimentación del mismo. Concluyendo, con el correcto diseño de un molde permanente y con la generación de documento que permite ser utilizado como material de apoyo para los estudiantes o investigadores interesados en el tema.

INTRODUCCIÓN

Una pieza de geometría compleja y de vital importancia en las turbinas hidrocinéticas, es el álabe, ya que este elemento permite la transformación de energía cinética a energía mecánica [1]. Para la obtención de este y otras piezas con geometría compleja existen diversos tipos de procesos de manufactura, sin embargo, uno de los más utilizados es el proceso de fundición por inyección, ya que permite fabricar piezas con un buen acabado superficial, alta resistencia mecánica y buena calidad dimensional [2],

Sin embargo, para que este proceso sea llevado a cabo correctamente y se obtengan piezas de buena calidad, es necesario realizar un diseño adecuado del molde, el cual se enfoca en tres etapas; 1) identificar los requerimientos de diseño del molde, 2) realizar el planteamiento de alternativas del mismo, 3) diseñar en detalle para la alternativa seleccionada.

En los requerimientos de diseño del molde es necesario evaluar el tipo de geometría que se va a fabricar, las contracciones que se producen en la pieza, determinar el sistema de llenado, el tiempo que tarda en llenarse toda la cavidad del molde, y los componentes mecánicos del mismo. En cuanto al planteamiento de las alternativas es necesario identificar los patrones de flujo, la segmentación, el tipo de corredor y el diseño de la cavidad, esto con el objetivo de comparar y determinar la alternativa más adecuada.

Con relación al diseño en detalle del molde, se realiza el cálculo de las compuertas, el corredor, los rebosaderos y la mazarota, posteriormente se hace un análisis térmico el cual determina el sistema de refrigeración a ser utilizado, para finalmente realizar los planos de detalle de los componentes del molde en software CAD. Por otro lado, la metodología desarrollada a lo largo del trabajo permite que este

documento pueda servir de apoyo a los estudiantes interesados en el diseño de un molde, aplicando el procedimiento propuesto para un álabe o cualquier otra geometría compleja.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar un molde para fundición de aluminio por inyección, con la geometría del álabe para una turbina hidrocínética.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Definir los requerimientos de diseño de un molde para fundición de aluminio por inyección
- Generar y evaluar diferentes alternativas del molde para fundición de aluminio por inyección
- Realizar el diseño en detalle para la alternativa seleccionada del molde para fundición de aluminio por inyección

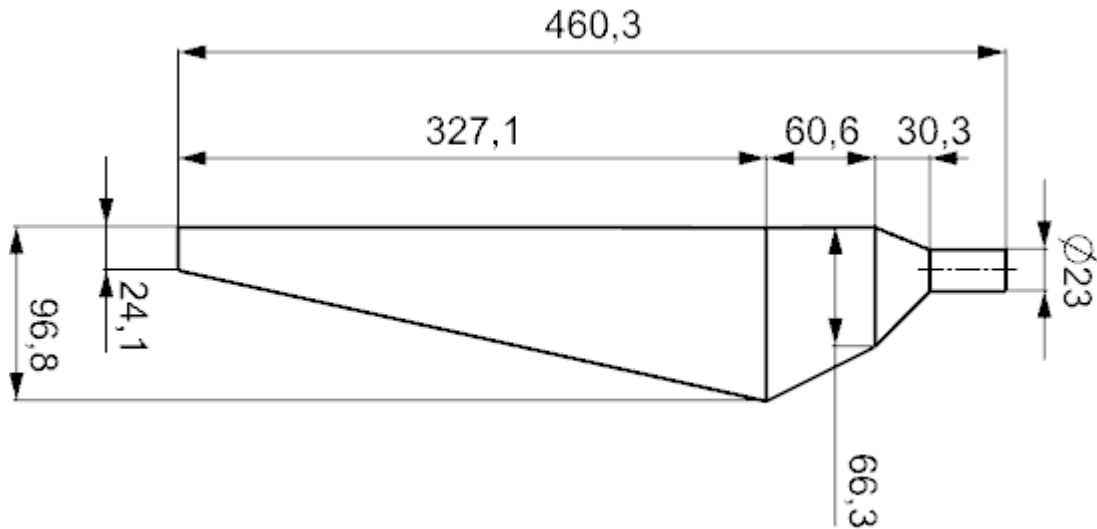
CAPITULO 1. REQUERIMIENTOS DE DISEÑO DEL MOLDE

Inicialmente se revisó la geometría del molde para determinar si la pieza se puede fabricar o si se deben realizar cambios en el álabe con el objetivo de mitigar posibles errores en la fundición. Así mismo, se revisó el sobredimensionamiento que debe tener la pieza para contemplar la contracción de la misma al momento de la solidificación. Por otro lado, se determinó tanto el tiempo de llenado para la pieza como las temperaturas que debe manejar el molde para el correcto funcionamiento. Por último, se identificó sobre el sistema de alimentación y los componentes mecánicos para un molde permanente.

1.1. PIEZA A FABRICAR

De acuerdo al proyecto de grado previamente realizado sobre el diseño de una turbina hidrocínética de eje horizontal para micro generación de energía eléctrica (5,6 kWh/día) [1], el área de termo fluidos de la Universidad Santo Tomás, solicita el diseño de un molde para fundición de aluminio por inyección para la obtención de tres álabes para dicha turbina. Algunos de los requerimientos que deben tenerse en cuenta son; buen acabado superficial, alta resistencia en la fundición fabricada, así como un dimensionamiento aproximado de la misma (Figura 1).

Figura 1. Dimensiones del álabe recibida.

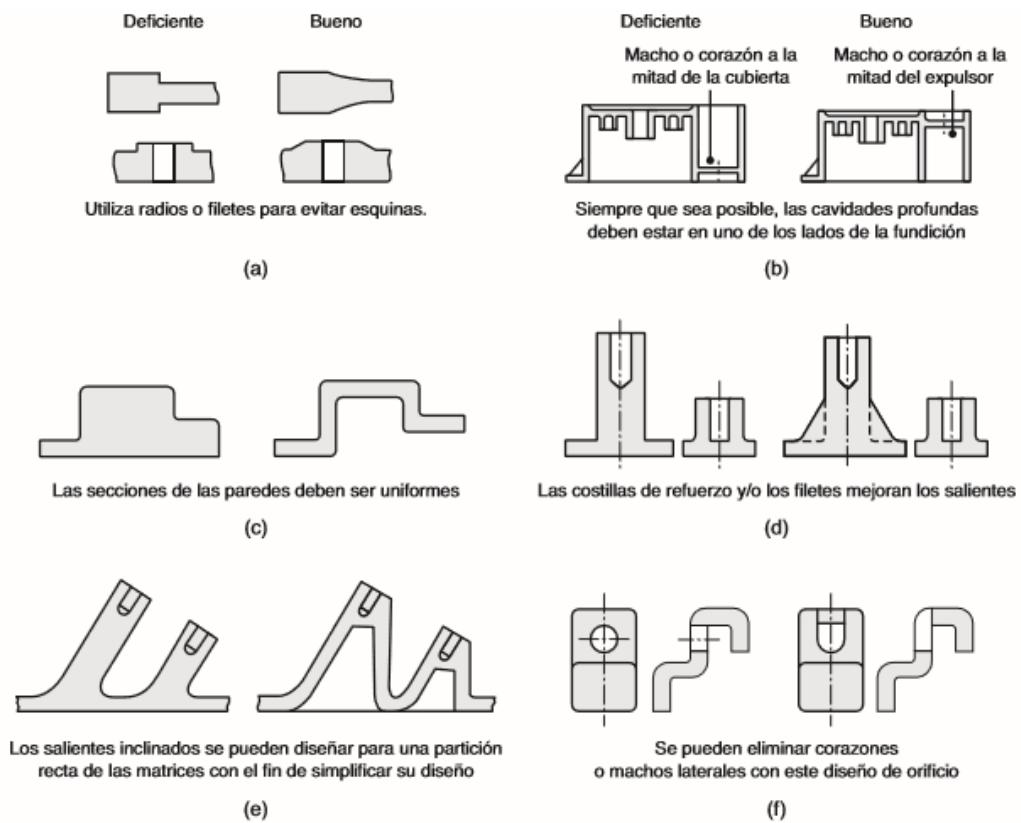


Fuente: Autor

Por otra lado, de acuerdo a la bibliografía sobre piezas fundidas, es necesario a la hora de diseñar el elemento tener en cuenta diversas recomendaciones para evitar los posibles defectos que se pueden presentar durante la solidificación, tal como se observa en la Figura 2.

Una de las sugerencias más importantes para el diseño del álabe de la turbina hidrocínética (Figura 1) es evitar esquinas o filos vivos empleando filetes, esto se realiza para disminuir los concentradores de esfuerzos y así mismo para evitar que durante la solidificación se presenten agrietamientos o desgarres. Por lo tanto, según la bibliografía es recomendable emplear radios que pueden ir desde 3 mm hasta 25 mm. Sin embargo, se debe tener en cuenta que a medida que este radio incrementa, la velocidad de enfriamiento disminuye [2].

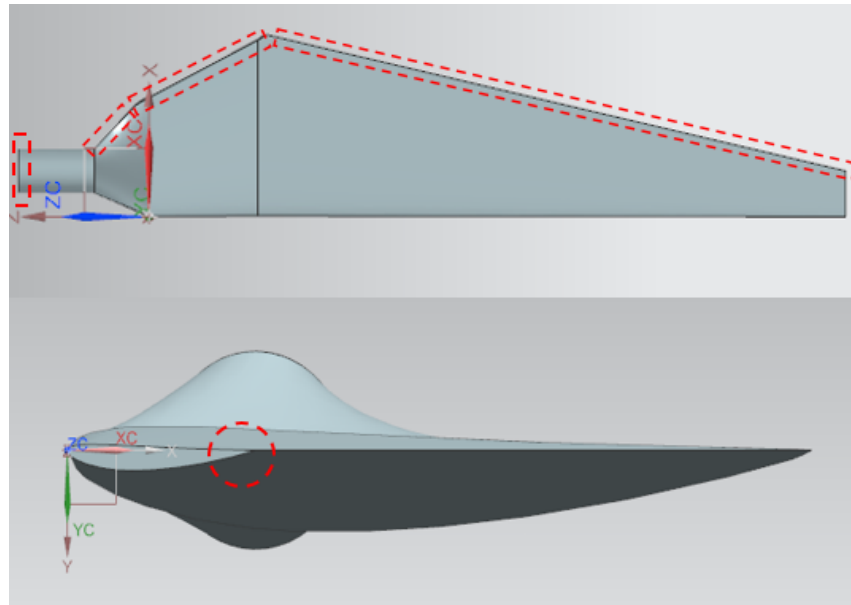
Figura 2. Sugerencias de diseño para evitar defectos en las piezas.



Fuente:[2].

Teniendo en cuenta lo mencionado previamente, se puede observar en la Figura 3 que debido a la geometría del perfil Naca seleccionado a lo largo de una parte del álabe se encuentran filos vivos (líneas punteadas) es por tal motivo, que se procede a realizar el redondeo de los mismos para evitar los problemas al momento de la solidificación.

Figura 3. Vista superior y frontal del álabe con la identificación de los filos vivos.



Fuente: Autor.

Para realizar la corrección en la geometría del álabe, se utilizó el software de diseño NX en el cual mediante el comando “*Edge Blend*” se hizo el redondeo de los filos vivos (previamente identificados) para obtener finalmente la geometría adecuada de trabajo para el diseño del molde.

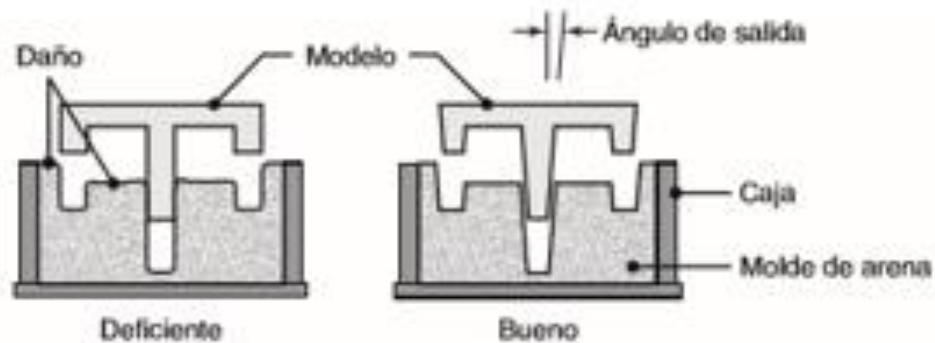
Figura 4. Vista en isométrico del álabe con sus filos vivos redondeados.



Fuente: Autor.

Por otro lado, al analizar la geometría del álabe, se puede determinar cómo será la línea de partición, una de las características que debe tener es que la localización de esta debe contemplar que la pieza tenga cierto ángulo de salida (Figura 5). De acuerdo a la teoría dicho ángulo debe estar entre $0,5^\circ$ y 2° para las superficies externas mientras que para las superficies internas debe ser de dos veces el ángulo exterior, debido a que la fundición se contrae hacia dentro [2].

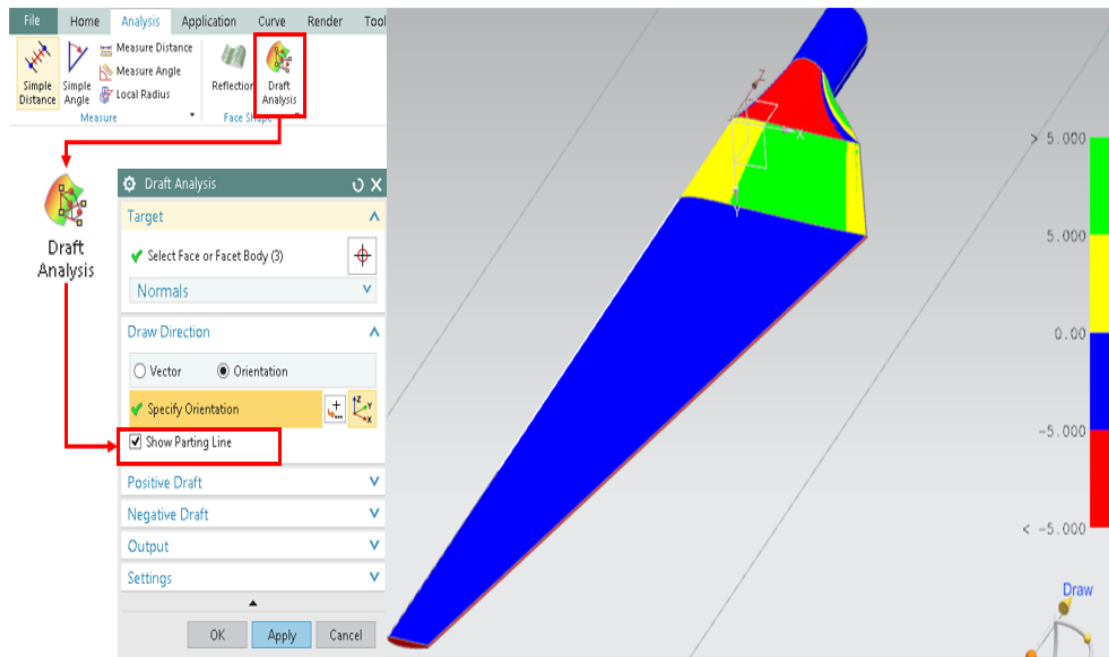
Figura 5. Representación ángulo de salida en molde de arena



Fuente: [2].

Para determinar la línea de partición para el álabe se realizó un análisis mediante el software previamente mencionado y usando la herramienta “*Draft Analysis*” se obtiene tanto los ángulos que posee la pieza como la línea de partición de la misma. Esto se puede observar con mayor claridad en la Figura 6, en la cual se observa la ubicación de cada uno de los comandos utilizados para la obtención de la línea de partición.

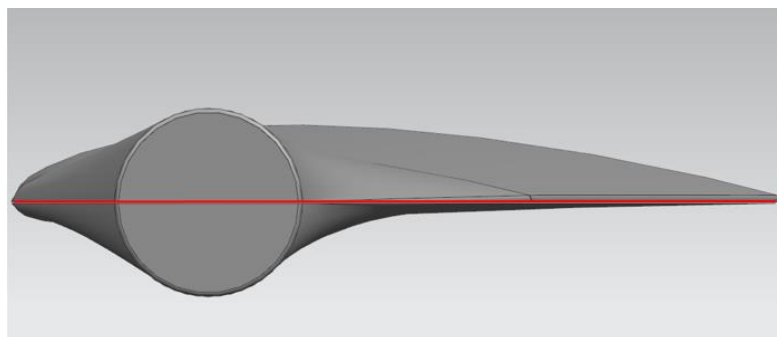
Figura 6. Comandos empleados para la obtención de la línea de partición.



Fuente: Autor.

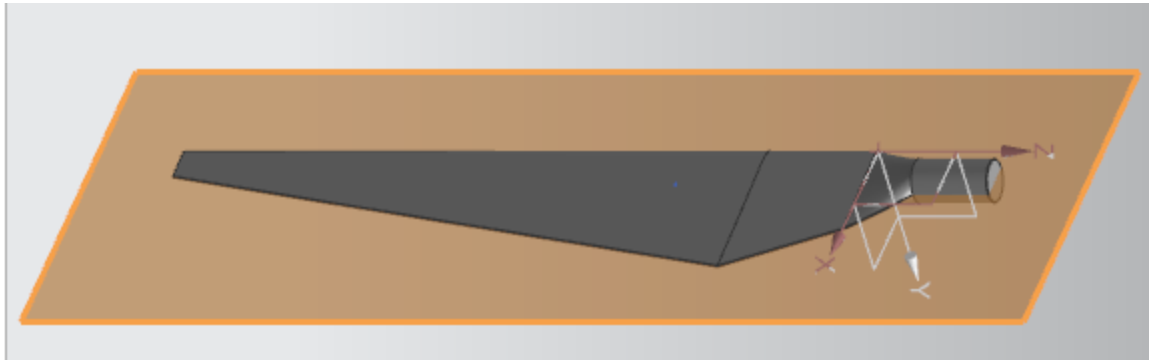
Luego de haber encontrado la línea de partición (Figura 7) se procede a extenderla con el objetivo de obtener un plano de partición (Figura 8) el cual será utilizado más adelante para generar tanto la placa móvil como la placa estacionaria del molde.

Figura 7. Vista frontal del álabe con su respectiva línea de partición.



Fuente: Autor.

Figura 8. Plano de partición para el álabe.



Fuente: Autor.

1.2. CONTRACCIONES

El proceso de contracción se presenta en el momento del enfriamiento y la solidificación. Para que esta suceda se presentan 3 etapas, las cuales son: la contracción líquida durante el enfriamiento antes de que se alcance la solidificación, la contracción por solidificación la cual es aquella que se produce durante el cambio de fase del estado líquido a sólido, y por último la contracción térmica de la pieza solidificada durante el enfriamiento a temperatura ambiente [2], [3].

Figura 9. Porcentajes de contracción por solidificación.

Material	Solidification Shrinkage
Aluminum	6,6 (1); 6,5 (2)
Magnesium	4,2 (1); 4,1 (2)
Zinc	6,5 (1); 4,7 (2)

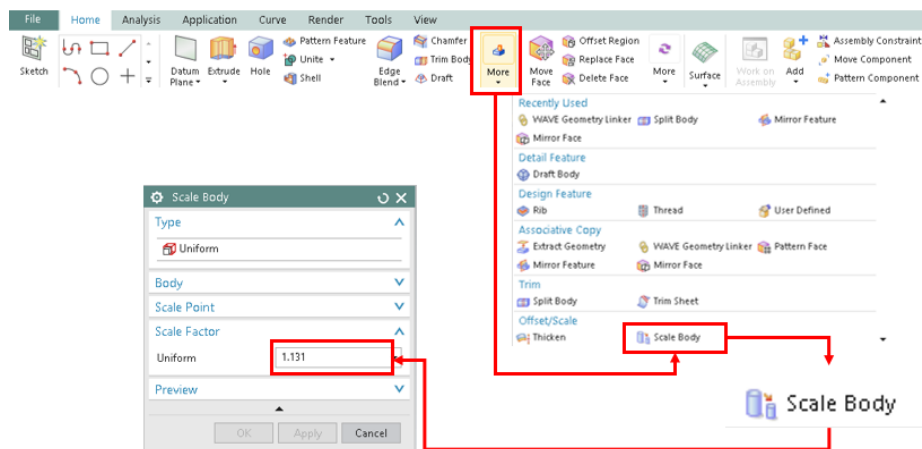
Fuente:[3].

Los defectos internos que se producen en la fundición, suelen estar relacionados

por las dos primeras etapas (contracción líquida y la contracción sólida), mientras que la tercera etapa o último régimen afecta las tolerancias dimensionales del objeto fundido. Por lo tanto, los valores correspondientes que tiene en cuenta la contracción en las dos primeras etapas se puede observar en la Figura 9, Mientras, que los factores de contracción recomendados para la tercera etapa son de 0,006 mm/mm para aluminio y Zamak [3].

Teniendo en cuenta lo previamente mencionado, se escaló el álabe 13,1% (Figura 10) debido a que el material en el que será fabricado será aluminio. Luego de determinar el factor de escala se procede a replicar este factor en el software NX utilizando el comando “*Scale Body*”, cabe recalcar que existen otras formas de incrementar el tamaño de la pieza, una de ellas es empleando el modulo “*Mold Wizard*”, sin embargo, para nuestro caso de estudio será realizado de la primera forma. Por otra parte, en cuanto al factor por contracción térmica (0,006mm/mm), será utilizado al momento de realizar los planos ya que es en este punto donde se tienen en cuenta las tolerancias dimensionales del álabe.

Figura 10. Obtención del álabe escalado.



Fuente: Autor.

1.3. TIEMPO DE LLENADO

Es aquel tiempo que inicia cuando el metal empieza a fluir dentro del molde hasta que la cavidad se encuentra totalmente llena. Este tiempo es de vital importancia ya que de este depende que la cavidad pueda llenarse antes de que la temperatura disminuya y el metal comience su solidificación produciendo problemas de llenado y porosidad, es por tal motivo que es mejor estar siempre cerca de los tiempos de llenado rápido. Para calcularlo se debe emplear la siguiente ecuación [4].

$$t = K \left\{ \frac{T_i - T_f + SZ}{T_f - T_d} \right\} T \quad (1)$$

En donde:

t = Tiempo de llenado máximo, s

K = Constante empírica relacionada al material del molde, s/mm

T_i = Temperatura del metal en la compuerta de entrada, °C

T_f = Temperatura mínima del flujo de metal, °C

S = Porcentaje de solidos al final del llenado (entre mayor sea S , peor será el acabado superficial)

Z = factor de conversión de unidades

T_d = temperatura del molde justo antes de que el metal sea vertido, °C

T = Espesor de pared promedio, mm

Los valores correspondientes para cada una de las variables desconocidas de la Ecuación 1, se puede observar en la Tabla 1.

Para determinar el tiempo llenado para el álabe. Inicialmente se realiza la determinación del espesor promedio, para lo cual se hace uso del comando “*Check Wall Thickness*” con el cual se determina que el espesor promedio de la pieza a fabricar es de 4,51 mm (Figura 11).

Tabla 1. Valores requeridos para el cálculo del tiempo de llenado.

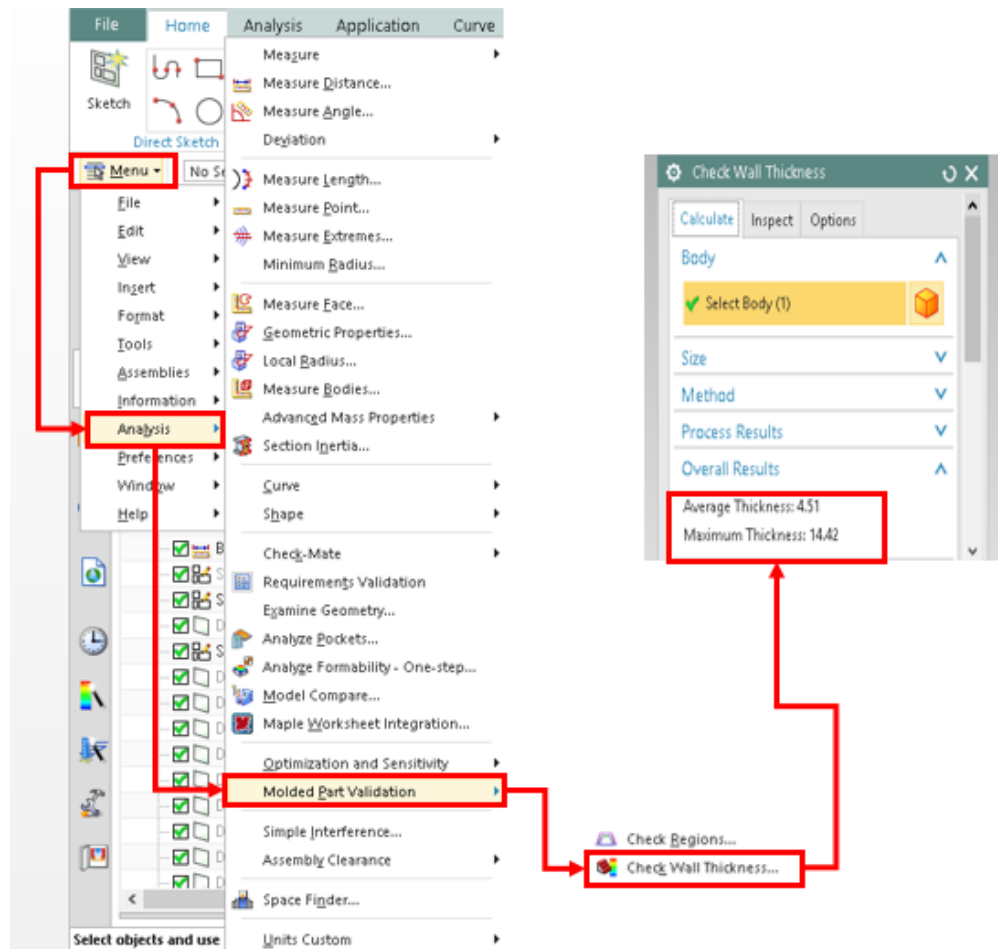
Temperatura del metal en la compuerta	Ti	650	°C
Temperatura mínima de flujo de la aleación	Tf	570	°C
Temperatura de la superficie	Td	340	°C
Espesor de la fundición	T	4,5	mm
Constante empírica	K	0,0346	s/mm
porcentaje de solidos al final	S	20	%
factor de conversión de unidades solidas	Z	4,8	°C/%
Tiempo de llenado	t	0,119	s

Fuente: [4].

Por lo tanto, reemplazando los valores de la Tabla 1 y el espesor promedio de pared en la Ecuación 1, se obtiene que le tiempo de llenado es igual a:

$$t = 0,0346 \frac{s}{mm} * \left\{ \frac{650^{\circ}C - 570^{\circ}C + 20\% * 4,8 \frac{^{\circ}C}{\%}}{570^{\circ}C - 340^{\circ}C} \right\} * 4,5mm = 0,119 s$$

Figura 11. Obtención del espesor promedio.



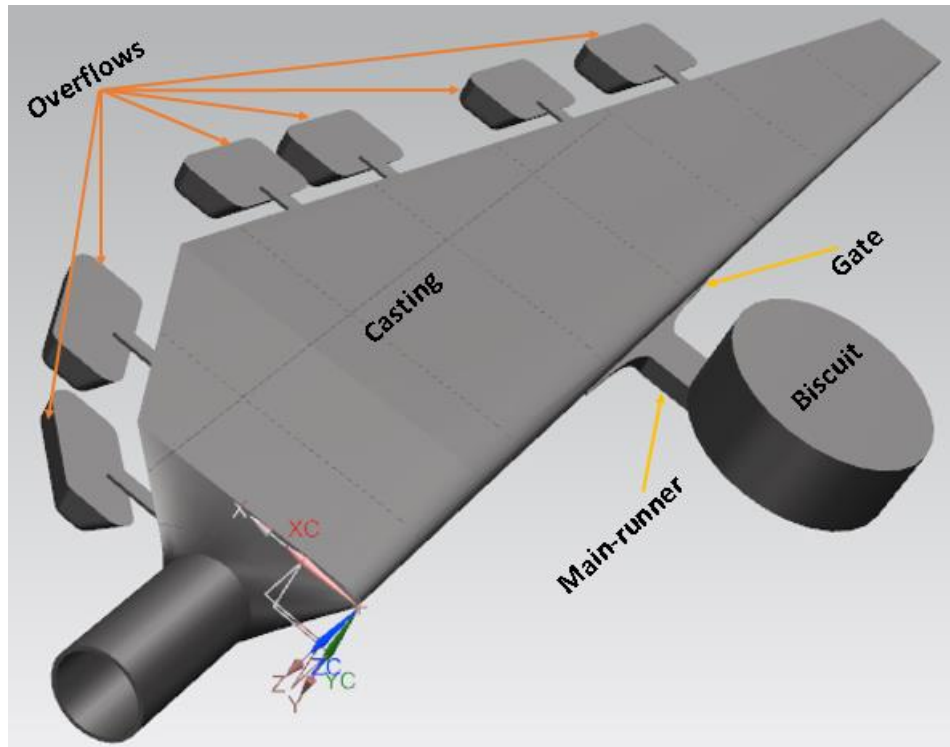
Fuente: Autor

1.4. SISTEMA DE LLENADO DEL MOLDE

El sistema de llenado es aquel que está conformado por diversos canales y los cuales se encuentran en la superficie de partición de las dos secciones del molde, estos canales permiten que el metal fluya dentro y a través de la cavidad. El sistema de llenado de los moldes de inyección a alta presión (*high pressure die casting - HPDC*) está conformado por el mazarota (*biscuit*), el corredor principal (*Main*

runner), la compuerta (*gate*) y los rebosaderos (*overflows*) [4], tal como se observan en la Figura 12.

Figura 12. Sistema de alimentación del molde.

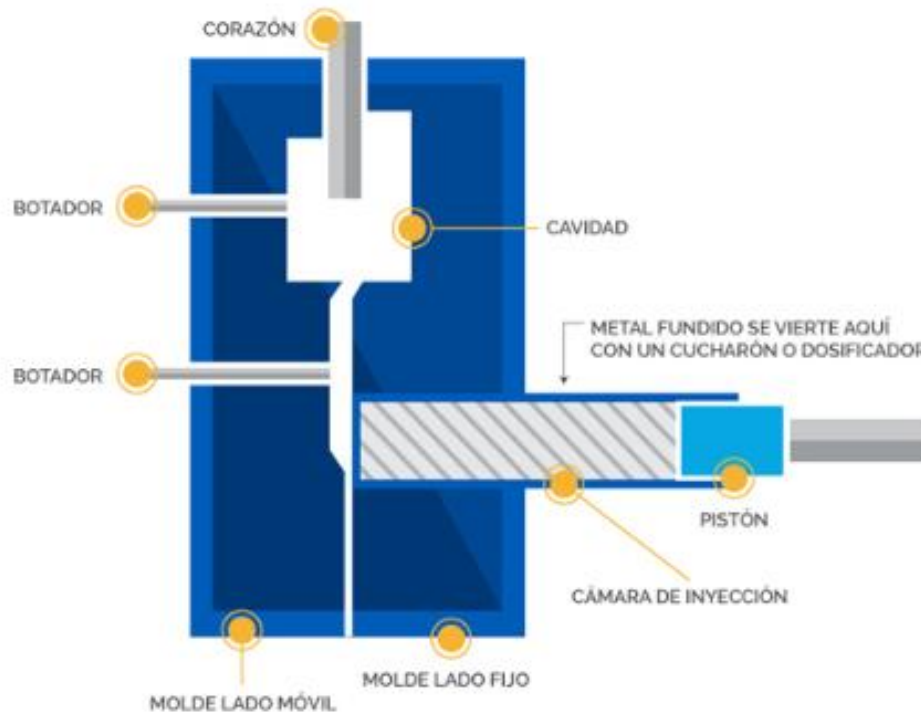


Fuente: Autor.

El primer elemento que se encuentra en el sistema de llenado es la mazarota, la cual se produce por el exceso de metal fundido que no alcanza a ingresar al molde y por ende solidifica en la cámara de inyección (Figura 13). El siguiente elemento del sistema de llenado por el que fluye el metal es por el corredor el cual tienen como objetivo unir la mazarota y la compuerta. Esta última es el último elemento por el que pasa el metal antes de ingresar a la cavidad, la compuerta es diseñada con el objetivo de que al momento que el metal vaya a ingresar a la cavidad pueda alcanzar la velocidad requerida por el diseñador esto se logra mediante la pequeña sección transversal que suele tener. El último elemento del sistema de llenado son

los rebosaderos los cuales tienen como objetivo almacenar el metal oxidado debido al contacto con el aire que se encuentra inicialmente en el molde. No obstante, estos también permiten liberar calor en zonas críticas [5].

Figura 13. Esquema máquina de cámara fría.



Fuente: [6].

1.5. COMPONENTES MECÁNICOS DE UN MOLDE

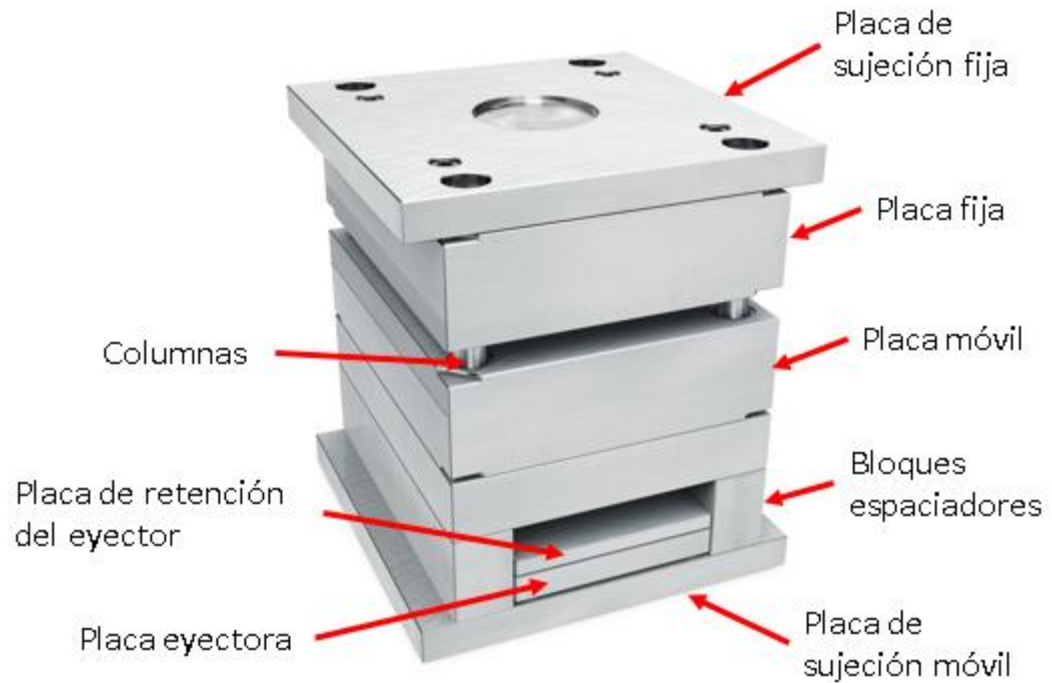
Los moldes permanentes para máquinas de cámara fría horizontal están conformado por diferentes grupos de componentes (Figura 14) que desempeñan ciertas funciones en específico durante el proceso de inyección. Entre ellos se destacan el sistema de refrigeración, el sistema de sujeción y el sistema de eyección.

Sistema de eyección: Se encuentra conformado por pasadores eyectores los cuales permiten que la fundición pueda ser expulsada mediante la fuerza de empuje que estos hacen. Estos suelen utilizarse en el momento en que la fundición está totalmente solidificada.

Sistema de refrigeración: Este sistema está conformado por una serie de canales los cuales se encuentran a lo largo o ancho del molde, estos tienen la característica de extraer el calor del metal fundido para que se produzca una rápida solidificación y preparar térmicamente la cavidad para la siguiente inyección de metal.

Sistema de apertura y cierre: Se encuentra conformado por diversos componentes cada uno con una función diferente. Entre estos están las barras guía, la placa móvil y la placa fija. Las barras guías se encuentran ubicadas en las 4 esquinas del molde y tal como su nombre lo indica ayudan a guiar el movimiento del mismo, no obstante, estas tienen la característica de soportar tanto a la placa fija como a la placa móvil. Por otro lado, se encuentra la placa estacionaria () la cual se asegura a la máquina y conecta directamente con la unidad de inyección de la misma, esta platina recibe a la placa móvil en el momento que se produce el cierre del molde para dar inicio al proceso de llenado. Por último, se encuentra la placa móvil, la cual se desplaza a través de las barras guías en el momento de la apertura y cierre de la máquina para unirse o separarse de la placa fija, según sea el caso correspondiente.

Figura 14. Identificación de los componentes de un molde permanente



Fuente:[7]

1.6. CONCLUSIONES

Inicialmente se observó que la geometría del álabe entregada por el área de termofluidos no se podía fabricar mediante el proceso de fundición ya que presentaba filos vivos, los cuales producirían agrietamientos al momento de la solidificación de la pieza. Por lo tanto, se realizó un redondeo de 3mm en donde se encontraban los filos con el objetivo de mitigar este problema a futuro. Posteriormente, se identificó que era necesario escalar el álabe un 13,1% puesto que era necesario contemplar las contracciones que se producirían en la pieza debido al cambio de fase, así

mismo se determinó que para la contracción térmica era necesario tener en cuenta una tolerancia dimensional de 0,006. Por otro lado, se calculó el tiempo de llenado máximo de la cavidad, obteniendo como resultado un valor de 0.11s, siendo este un tiempo elevado debido al espesor de pared promedio considerable (4,5 mm) que tiene el álabe. Por último, se identificó que el sistema de llenado está conformado por 4 elementos, tal como lo son; la mazarota, el corredor, la compuerta y los rebosaderos. En cuanto a los componentes mecánicos, se apreció que existen tres grandes grupos, tales como lo son; el sistema de apertura y cierra, el sistema de eyección y el sistema de refrigeración

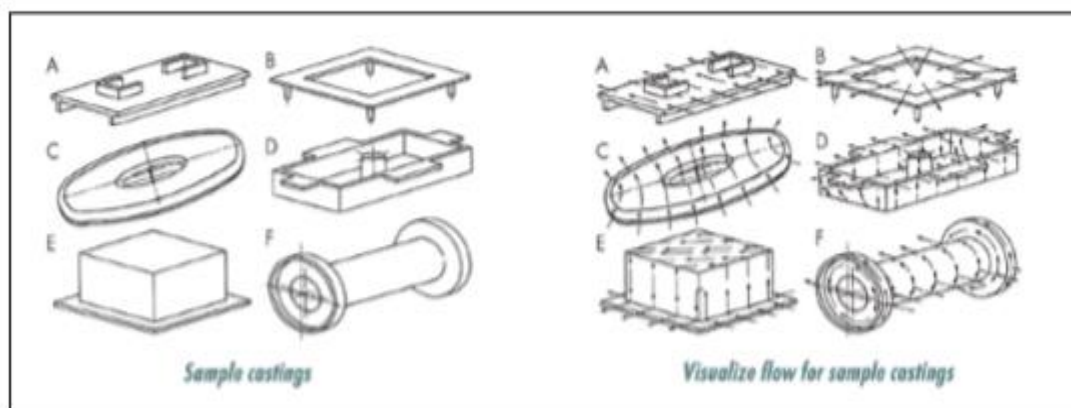
CAPITULO 2. ALTERNATIVAS DE DISEÑO MOLDE PERMANENTE

En este capítulo se propuso diversas alternativas para el diseño del molde, iniciando por la selección del patrón de flujo para la cavidad, pasando luego al tipo de segmentación que presentara la pieza y por último se abordó sobre los tipos de corredores y sistemas de llenado que podría llegar a tenerse en un molde para cámara fría.

2.1. PATRONES DE FLUJO

Determinar el patrón de flujo (Figura 15) es de vital importancia ya que con este se puede identificar la ubicación de la compuerta y los rebosaderos, para la correcta selección de los patrones se debe revisar que el camino elegido sea el que tiene la distancia más corta para atravesar la cavidad y que no se presente corrientes de flujos convergentes y divergentes [4].

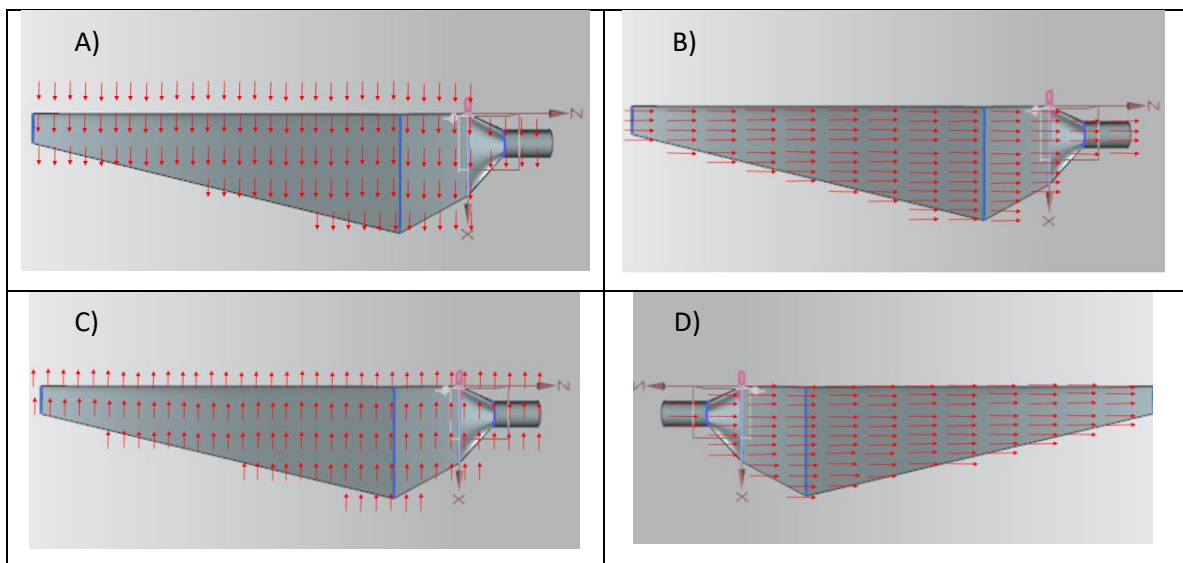
Figura 15. Patrones de flujo de las piezas correspondientes



Fuente: [8].

Para el caso de estudio se puede observar que existen 4 posibles tipos de patrones de flujo tal como se ve en la Figura 16, sin embargo, podemos determinar que no es tan bueno implementar el patrón B o D, ya que tal como se mencionó previamente, una característica de los patrones de flujo es que recorren cortas distancias en la cavidad. Es por esta razón que es preferible hacer uso del patrón de flujo propuesto en la figura A o C ya que presentan el menor recorrido posible.

Figura 16. Patrones de flujo para el álabe.



Fuente: Autor.

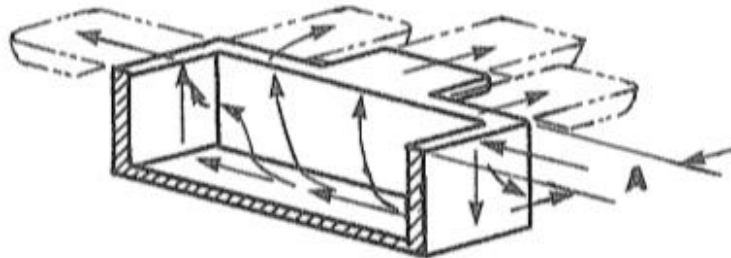
Por otro lado, una de las etapas finales en el proceso de fundición es remover los canales de alimentación de la pieza fundida, por ende, es necesario que el corredor principal y la compuerta no estén ubicadas en la zona con menor espesor de pared del álabe, ya que al momento de retirarlas de la pieza fundida se podría presentar agrietamiento o en el peor de los casos fractura. Es por esta razón que se descarta el patrón de flujo C, puesto que en el borde por donde ingresaría el metal es en donde se tiene el menor espesor de pared del álabe. Teniendo en cuenta lo previamente mencionado, se determina que el patrón de flujo A es el óptimo para el análisis, debido a que tiene mayor espesor en la parte donde se ubicaría la

compuerta y el corredor principal y debido a la uniformidad que presenta dicho borde, disminuye la dificultad al momento de modelarlo en el software de diseño NX.

2.2. SEGMENTACIÓN

La segmentación se realiza con el objetivo de determinar la cantidad de compuertas que va a tener la cavidad del molde. De acuerdo a la teoría se recomienda tener entre 2 y 4 segmentos independientemente de la complejidad de la pieza. Por otro lado, los segmentos se deben poner cada vez que se presenten cambios importantes en el espesor de pared o en el momento que una parte de la pieza requiera un acabado superficial diferente que el resto de la fundición a fabricar [8].

Figura 17. Segmentación de la Figura 15(D).

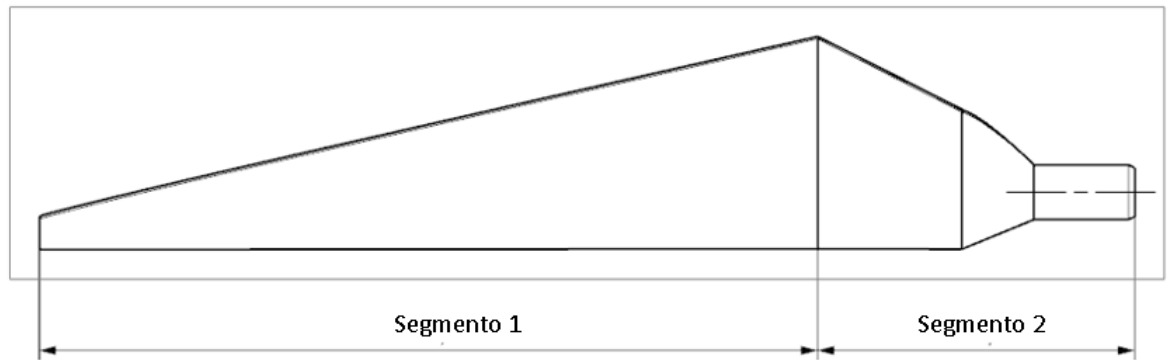


Fuente: [8].

Para el caso del álabe, se propone la segmentación mostrada en la Figura 18 ya que si se retoma lo previamente mencionado, se observa que la segmentación se realiza cuando en el espesor de pared se presenta un cambio importante. Por lo tanto, teniendo en cuenta la Figura 19 se observa que el cambio de espesor de pared se produce en la parte superior del álabe, es por tal motivo, que se concluye

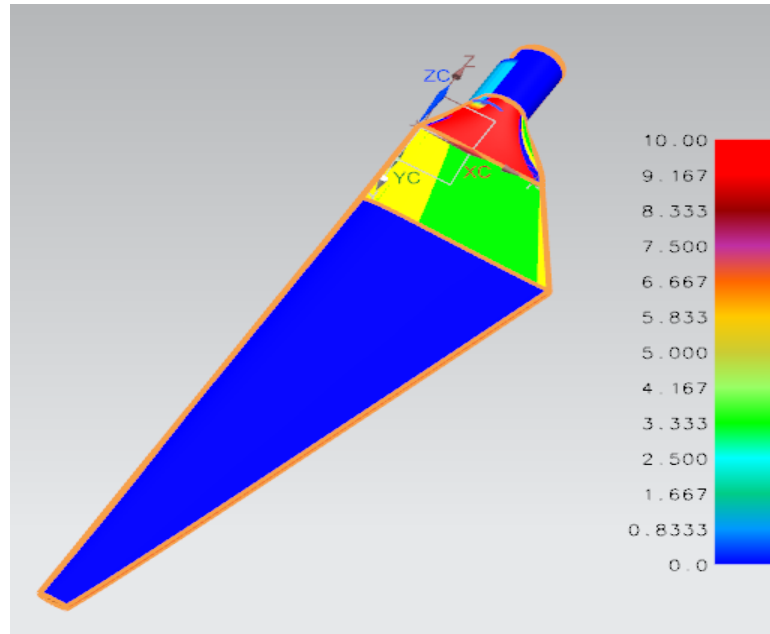
que debe existir una segmentación en ese punto.

Figura 18. Segmentación del álabe.



Fuente: Autor

Figura 19. Espesor de pared a lo largo del álabe.

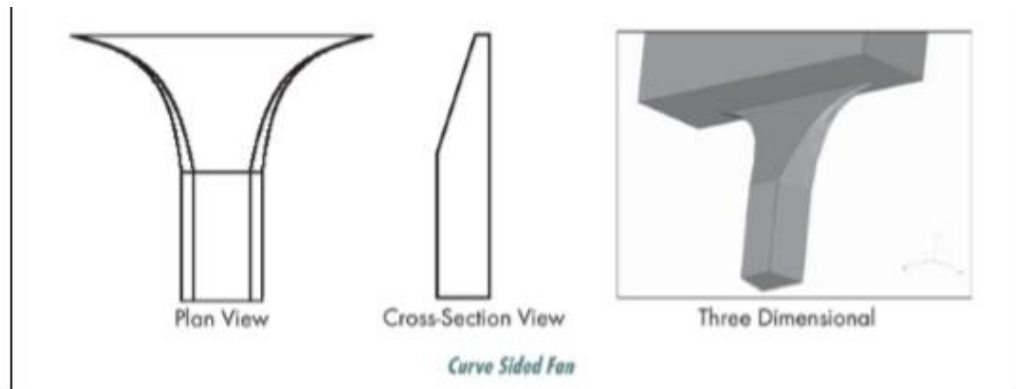


Fuente: Autor.

2.3. CORREDORES

Como se explicó en el capítulo anterior, el corredor es aquel elemento del sistema de llenado por el cual fluye metal fundido para ser trasladado hasta la compuerta de entrada. Por otra parte, los corredores se pueden clasificar en dos; el corredor en forma de abanico (*fan runner* -Figura 20, y el corredor tangencial (*tangential runner* -Figura 21). Una de las características del diseño de los corredores es que la sección transversal a medida que se aleja de la compuerta y se acerca al corredor principal suele ir incrementando empleando una relación entre el corredor principal y la compuerta desde 1:1 hasta 1,4:1. Esto se realiza con el objetivo de prevenir que se formen burbujas de aire en el metal fundido, lo que produciría porosidad en la pieza. No obstante, dicho cambio en la sección transversal permite que se obtenga la velocidad deseada en la compuerta de entrada [4].

Figura 20. Fan runner.



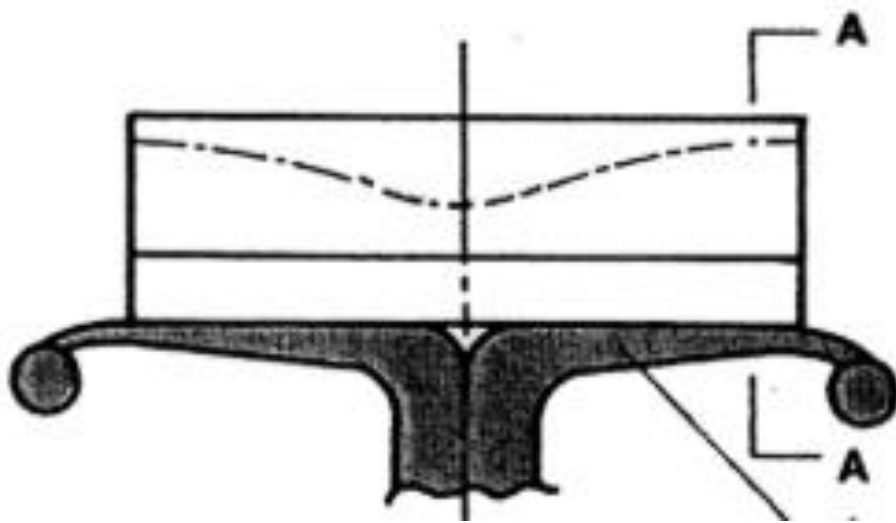
Fuente:[4].

La principal cualidad de los “*fan runner*” es que presentan un fuerte llenado en el centro de la cavidad y tal como se mencionó antes su reducción en la sección

transversal permite que no se presenten bolsas de aire en el metal fundido. Otra ventaja que presenta este tipo de corredor es su facilidad para realizar el maquinado en la matriz [4].

Por otra parte, con respecto al corredor tangencial la principal característica es que puede distribuir el metal sobre una distancia relativamente larga adaptándose a la geometría de la pieza, sin embargo, uno de los problemas que se presenta es que el corredor será demasiado grande si se desea tener ángulos de flujo pequeños. Además, debido a su complejo diseño este suele ser más complicado a la hora de diseñar y maquinar [4].

Figura 21. Representación corredora tangencial.



Fuente: [9].

Para seleccionar el tipo de corredor es necesario evaluar la geometría de la pieza a fundir. En la Tabla 2, se observa que para las piezas cuadradas o trapezoidales es recomendable emplear el corredor en forma de abanico, mientras que para aquellas fundiciones con forma rectangular o paralelogramo se selecciona uno tangencial. No obstante, cuando se tiene una forma con geometría compleja se puede fabricar

un corredor híbrido el cual es una combinación de ambos [10].

Tabla 2. Criterio de selección de acuerdo a la forma de la pieza a fundir.

Part Shape	Gate-runner Type
Trapezoid, square	Fan gate-runner
Parallelogram, Rectangle	Tangential gate-runner
Complex Shape	Hybrid gate-runner

Fuente: [10].

$$R: \frac{L}{W} \quad (2)$$

Donde:

R = Relación largo – ancho

L = Longitud del elemento a fundir, mm

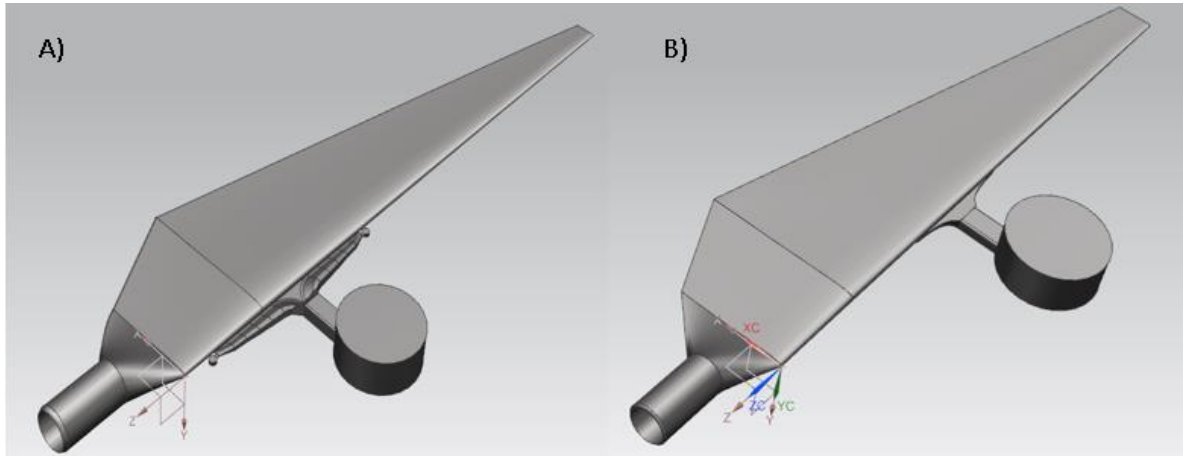
W = Ancho del elemento a fundir, mm

Otra forma para determinar que corredor es más adecuado para la geometría de la pieza que se desea fundir, es mediante la relación largo - ancho. La cual propone que para los valores cercanos a 1 es necesario implementar el “*fan runner*”, mientras que para el corredor tangencial esta relación debe ser igual o mayor a 1,5 [10].

En el caso del álabe se puede proponer los dos tipos de corredores (Figura 20 y Figura 21), sin embargo, teniendo en cuenta lo previamente mencionado se determinó la relación largo ancho obteniendo un valor 5.2 (Ecuación 2), lo cual determina que el corredor tangencial es el que más se adapta a la geometría del álabe, no obstante, si se hiciera uso de lo propuesto en la Tabla 2 y se realizara una geometrización del álabe se podría determinar que la forma a la que más se asemeja es a la de un rectángulo, por lo tanto, se observaría de nuevo que el

corredor más adecuado es el tangencial.

Figura 22. Tipos de corredores. Corredor tangencial (A), *fan runner* (B).



Fuente: Autor.

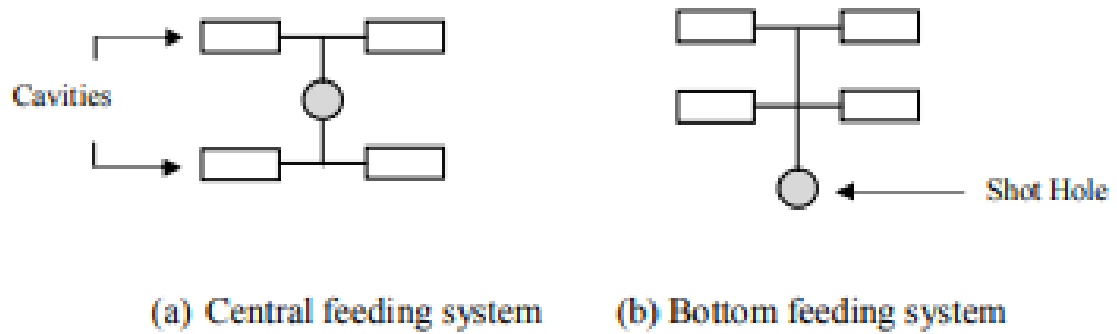
2.4. DISEÑO DE CAVIDADES

Los moldes suelen tener una o más cavidades para la inyección del metal fundido. Aquellos que tienen una sola cavidad suelen ser empleados cuando se tiene una pieza de gran tamaño. Por otro lado, los moldes que presentan más de una cavidad se conocen como matriz de cavidades múltiples, estos son utilizados cuando se tienen piezas pequeñas y se hace con el objetivo de usar todo el espacio disponible en la matriz. En términos de producción es mejor utilizar un molde de cavidades múltiples, ya que se puede obtener más cantidad de piezas en menor tiempo, contrario a lo que sucedería con el molde de una sola cavidad [10].

Cuando se requiere hacer uso de un molde de cavidades múltiples es necesario evaluar el sistema de alimentación (Figura 23) más adecuado para el molde, ya que existen dos tipos, el primero es el sistema de alimentación central y el segundo es el sistema de alimentación inferior. Para seleccionar el sistema de alimentación

es necesario considerar tanto la aleación como el tipo de máquina a usar (cámara fría o cámara caliente), la cámara caliente se emplea cuando se desean usar materiales con bajo punto de fusión, caso contrario con lo que sucede en la cámara fría. Generalmente el sistema de alimentación central es utilizado en el proceso de fundición en cámara caliente, mientras que para la cámara fría se utiliza el sistema de alimentación inferior [10].

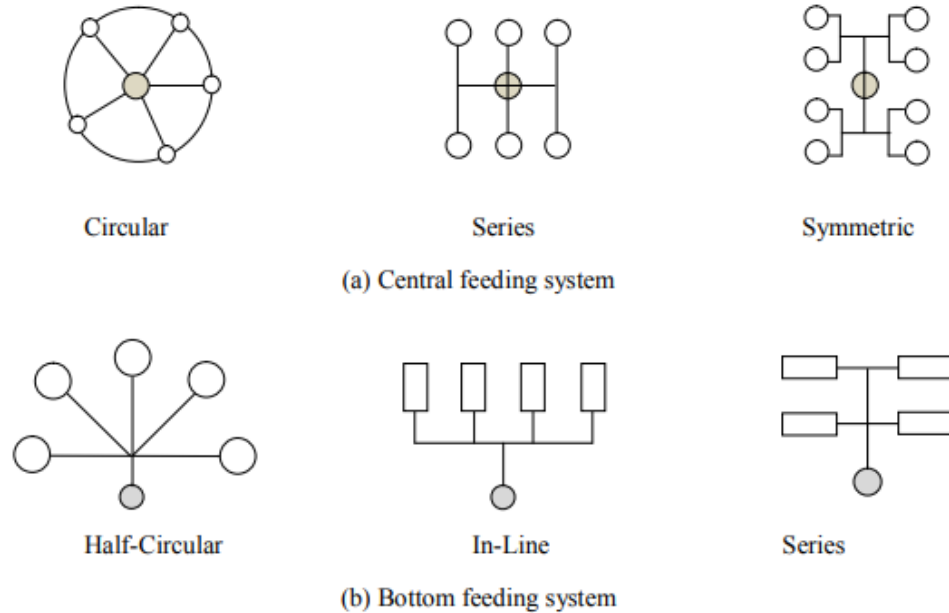
Figura 23. Tipos de sistema de alimentación para matriz de multi-cavidades.



Fuente: [10]

Cuando se desea hacer el diseño del sistema de alimentación para múltiples cavidades debe tenerse en cuenta que este geométricamente balanceado, ya que esto brinda que el metal fundido fluya igual a todas las cavidades, garantizando un correcto llenado [10]. En la Figura 24 se puede observar con mayor claridad la disposición de las cavidades en el molde para obtener un balanceado correcto.

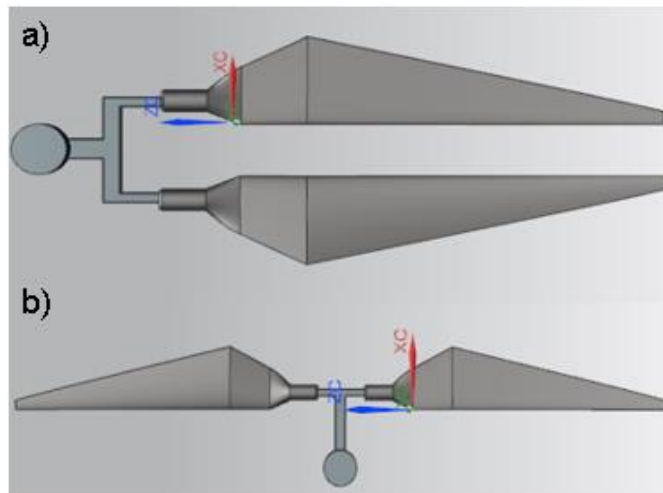
Figura 24. Tipos de diseño de balanceado para matriz multi-cavidad, (a) sistema de alimentación central, (b) sistema de alimentación inferior.



Fuente:[10].

Debido a que el material para el álabe es aluminio, se determina que la máquina que será utilizada es una de cámara fría, es por ende que teniendo en cuenta lo previamente mencionado se propone utilizar un sistema de alimentación inferior, considerando los diseños para balancear las cavidades. A partir de esto, se proponen algunas alternativas para el sistema de llenado del molde, tal como se observa en la Figura 25.

Figura 25. Tipos de diseño sistema de alimentación matriz multi-cavidad. (a) Sistema de alimentación inferior en línea, (b) sistema de alimentación inferior en serie



Fuente: Autor.

Considerando que los moldes con cavidades múltiples son utilizados para grandes producciones con el objetivo de disminuir costos y mejorar la productividad, así como cuando se tienen pequeñas piezas a fundir. En el caso del álabe para la turbina hidrocínética las alternativas de sistema multi-cavidades (Figura 25) no son tan viables de implementar, ya que la producción de álabes que se debe alcanzar es muy baja. Es por tal motivo que se decide utilizar el sistema de llenado de una sola cavidad (Figura 22).

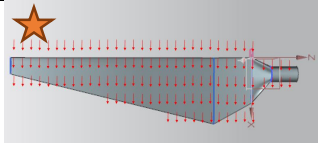
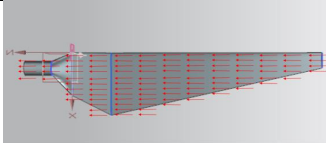
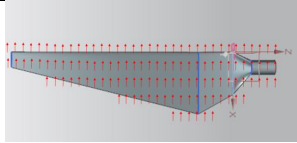
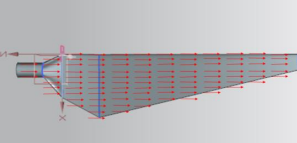
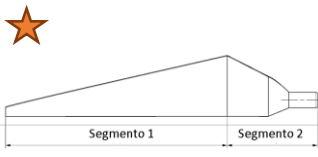
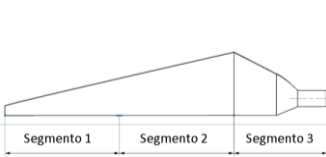
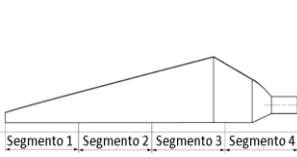
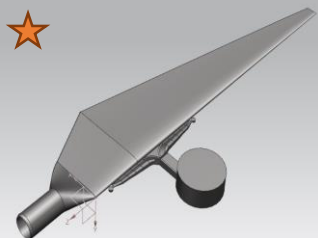
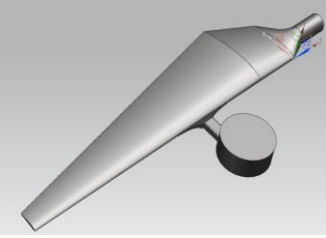
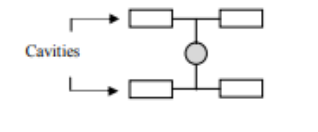
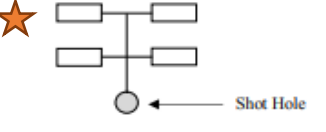
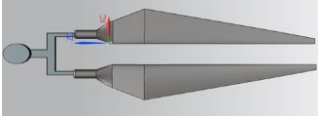
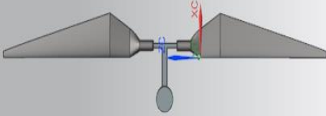
2.5. ANALISIS DE LAS ALTERNATIVAS

En la Tabla 3 se puede observar los tipos de opciones que se propusieron para cada uno de los criterios de diseño del molde. El primer criterio a analizar fue los patrones de flujo, para estos se propusieron 4 posibles opciones, sin embargo, se seleccionó la opción 1 ya que el recorrido que presenta el metal en el álabe es el menor posible, adicionalmente tiene la cualidad de que al suministrar metal en esta dirección es más fácil diseñar el sistema de llenado debido a la uniformidad que presenta el álabe en dicha parte.

El segundo criterio de diseño analizado fue la segmentación, para la cual se obtuvieron 3 posibles alternativas, sin embargo, al realizar un análisis de espesor a lo largo del álabe se determinó que la segmentación más adecuada era aquella que presentaba solo dos segmentos debido a que solamente se tenía un cambio de espesor considerable en una parte del álabe. Por otro lado, el siguiente criterio analizado fue la forma de los corredores, en este caso se determinó que el corredor más adecuado era el tangencial ya que este es usado cuando se tienen geometrías muy largas, adicionalmente este corredor tiene la característica de que permite una mayor distribución de metal a lo largo de la cavidad, contrario a lo que sucede con el corredor en forma de abanico el cual es utilizado cuando se tienen piezas pequeñas y es necesario que el llenado se enfoque en el centro de la cavidad.

El cuarto criterio analizado fue el tipo de alimentación de la cavidad, en este caso se eligió el llenado por la parte inferior ya que el material a fundir era aluminio por lo tanto era necesario implementar una máquina de cámara fría y en estas es común que el llenado se realice de esta manera. Por último, se plantearon tres alternativas para el tipo de cavidad, en esta se escogió la opción 3 debido a que se tiene una baja producción de álabes es por esta razón que no se justifica implementar un molde multi-cavidades ya que estos son utilizados cuando se tienen producciones muy elevadas con el objetivo de mejorar la productividad. De esta forma se concluye que la alternativa final es aquella que relaciona todos los criterios mediante una estrella de color anaranjado, tal como se observa en la Tabla 3.

Tabla 3. Planteamientos de alternativas.

Criterio de diseño	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Opción 4
Patrones de flujo				
Segmentación				No aplica
Corredores			No aplica	No aplica
Tipo de alimentación de la cavidad			No aplica	No aplica
Tipo de cavidades				No aplica

Fuente: Autor.

★ Alternativa seleccionada

2.6. CONCLUSIONES

Luego de realizar la comparación de cada una de las opciones para cada criterio de diseño, se determinó que la alternativa más adecuada es aquella que está relacionada mediante una estrella de color naranja. Inicialmente, se identificó que el patrón de flujo más adecuado era aquel que recorría la menor distancia en la cavidad y a su vez presentaba la mayor uniformidad en el lado que se iba a inyectar el metal. Luego, se realizó un análisis de espesores con el cual se determinó que, a lo largo de una parte del álabe, el espesor permanecía constante en 0,83 mm y de una forma repentina ocurría un cambio de espesor a 5 mm, por tal motivo se determinó que en dicho punto donde se presentaba la variación considerable era necesario realizar una segmentación, siendo esta la única de toda la pieza. Posteriormente, se calculó la relación largo-ancho para el álabe y se obtuvo como resultado un valor de 5.2, por tal motivo se determinó que el corredor más adecuado era el tangencial. Por último, se evaluó los tipos de cavidades, llegando a la conclusión de que el más adecuado era aquel que tenía una sola cavidad, puesto que la producción de álabes solicitada por el área de termo fluidos era muy baja (3 álabes).

CAPITULO 3. DISEÑO EN DETALLE MOLDE PERMANENTE

A continuación, se determinó las dimensiones para los elementos del sistema de llenado, tales como compuertas, mazarota, corredor tangencial y corredor principal. Por otro lado, se realizó el análisis de calor para calcular el tamaño de los canales de enfriamiento.

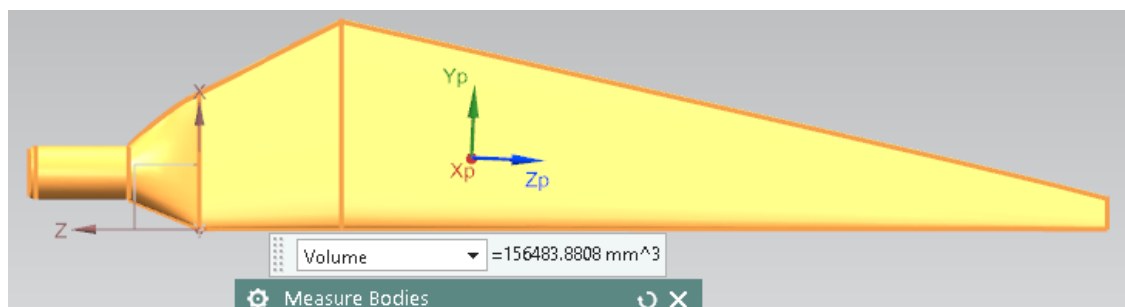
3.1. COMPUERTAS

Tal como se definió en capítulos anteriores las compuertas son aquellas que permiten el ingreso de metal a la cavidad, además que las dimensiones de estas permiten que el metal alcance la velocidad deseada. En esta sección se observa el procedimiento que se realizó para determinar las dimensiones de la compuerta.

3.1.1. VOLUMENES DE LOS SEGMENTOS

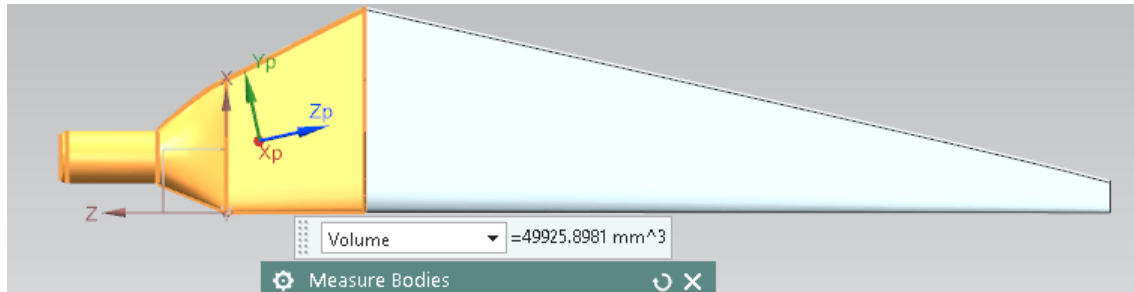
Para determinar los valores de los volúmenes de cada segmento se empleó el software NX, con el cual se hizo uso de la herramienta “*Measurement Body*”, obteniendo así los volúmenes para el segmento 1, 2 y el volumen total (Tabla 5).

Figura 26. Volumen de toda la pieza.



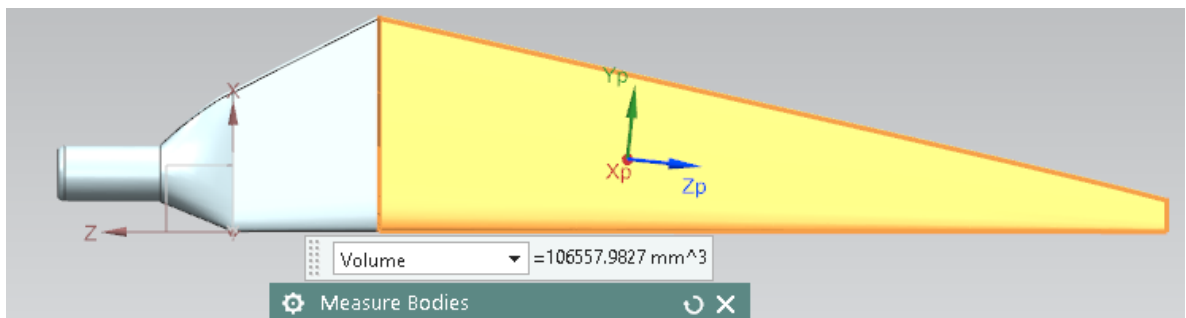
Fuente: Autor.

Figura 27. Volumen del segmento 1.



Fuente: Autor.

Figura 28. Volumen del segmento 2.



Fuente: Autor.

3.1.2. CAUDAL

El caudal es la cantidad de metal que fluye por cada segmento, este puede ser calculado mediante la Ecuación 3, la cual tiene en cuenta el volumen y el tiempo de llenado máximo (calculado en el capítulo 1) [4].

$$Q_i = \frac{V_i}{t} \quad (3)$$

Donde:

Q_i = Caudal de cada segmento (mm³/s)

V_i = Volumen de cada segmento (mm³)

t = Tiempo de llenado máximo de la cavidad (s)

Haciendo uso de la Ecuación 3, se determina los valores para cada segmento, tal como se observa en la Tabla 5.

3.1.3. AREA DE LA COMPUERTA

El área de cada segmento se obtiene usando la Ecuación 4, en la cual se debe conocer el caudal de cada segmento y la velocidad de entrada de la compuerta. Esta velocidad se puede seleccionar de la Tabla 4, la cual tiene un rango de trabajo específico para cada material, sin embargo, el diseñador debe tener en cuenta que las altas velocidades suelen ser elegidas para fundiciones con espesor de pared delgado y que requieren un buen acabado superficial, pero esto requiere de mayor capacidad de la máquina y trae problemas de porosidad en la fundición [4].

Tabla 4. Velocidades en la compuerta de entrada.

Alloy	Normal ingate velocity (in/sec)
Aluminum	700 a 1600
Zinc	900 a 2000
Magnesium	1000 a 2000

Fuente:[4].

Para el caso del álabe se usó una velocidad de entrada de 35 m/s, ya que no es muy alta como para que presente problemas de porosidad.

$$A_{app} = \frac{Q_i}{V_g} \quad (4)$$

Donde;

A_{pp} = área aparente de cada segmento, (mm²)

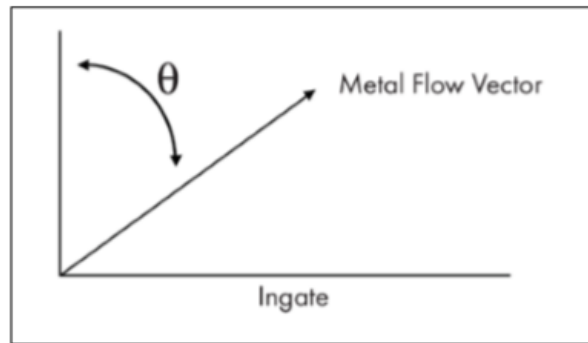
Q_i = Caudal de cada segmento, (mm³/s)

V_g = Velocidad de entrada en la compuerta (mm/s)

3.1.4. AREA ACTUAL

El área actual es aquella que considera el ángulo de flujo (Figura 29) el cual es medido desde un eje perpendicular a la línea de partición, este puede variar entre 0 y 45°. Para calcular el área actual se hace uso de la Ecuación 5 [4].

Figura 29. Ángulo de flujo.



Fuente:[4].

$$A_g = \frac{A_{app}}{\cos(\theta)} \quad (5)$$

Donde:

A_g = Área actual de la compuerta, (mm²)

A_{app} = Área aparente, (mm²)

θ = Angulo de flujo, (Deg)

Para el caso de estudio se utilizó un ángulo de 45° para así obtener los resultados mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5. Cálculos diseño de compuerta.

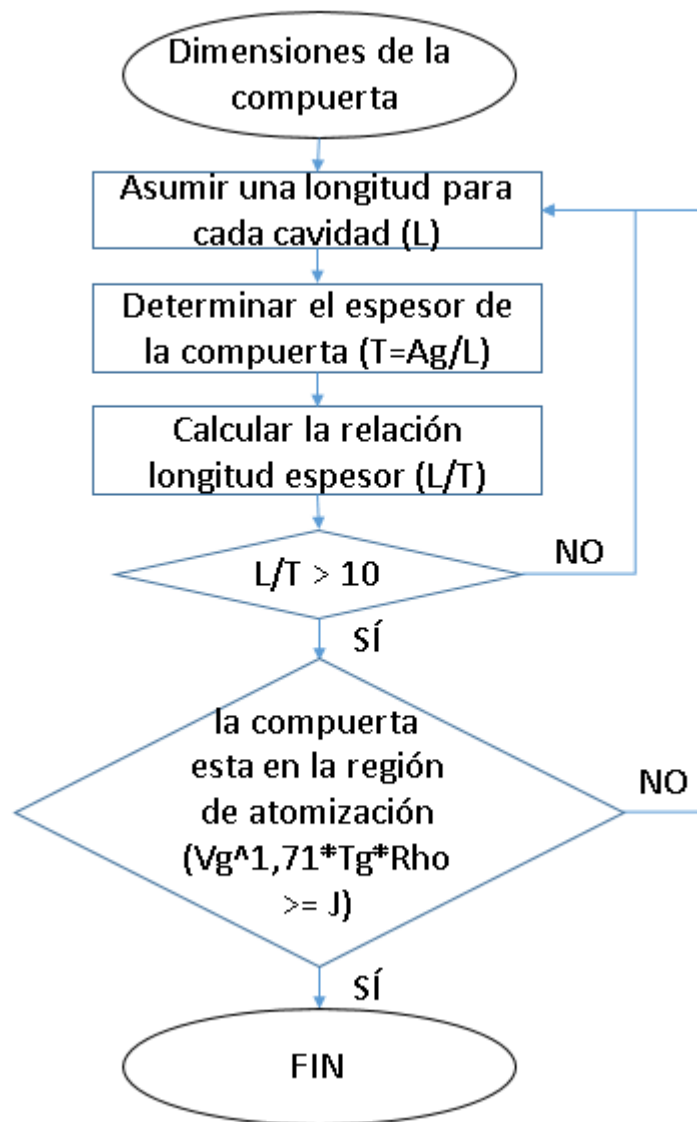
Segmento	volumen de la cavidad [mm ³]	Caudal [mm ³ /s]	Área aparente [mm ²]	Área actual [mm ²]
1	49889,37	418730,48	11,96	16,92
2	106778,59	896211,96	25,61	36,21
Total	156667,97	1314942,53	37,57	53,13

Fuente: Autor.

3.1.5. LONGITUD Y ESPESOR

Para determinar las dimensiones de la compuerta (espesor y longitud) es necesario seguir el procedimiento propuesto en la Figura 30.

Figura 30. Procedimiento para determinar las dimensiones de la compuerta.



Fuente: Autor

Tal como se propone en el diagrama de flujo lo primero que se realizó para determinar las dimensiones de la compuerta para el álabe, fue asumir una longitud para cada segmento tal como se observa en la Tabla 7. Posteriormente se determinó el espesor haciendo uso de la Ecuación 6 [4].

$$T_g = \frac{A_g}{L_g} \quad (6)$$

Donde;

T_g = Espesor de la compuerta, (mm)

A_g = Área actual de la compuerta, (mm²)

L_g = Longitud de la compuerta, (mm)

Luego de encontrar el respectivo espesor para cada segmento, se calcula la relación longitud – espesor, la cual debe ser mayor a 10 (Ecuación 7), en dado caso de que esto se cumpla, se procede a determinar si las dimensiones de la compuerta permiten que el metal entre a la región de atomización, (Ecuación 8).

$$\frac{L_g}{T_g} \geq 10 \quad (7)$$

Donde;

L_g = Longitud de la compuerta, (mm)

T_g = Espesor de la compuerta, (mm)

$$V_g^{1,71} * T_g * \rho \geq J \quad (8)$$

Donde;

V_g = Velocidad en la compuerta de entrada, (in/s)

T_g = Espesor de la compuerta (in)

ρ = Densidad del metal (lb/in²)

J = Factor de atomización (Tabla 6)

El factor de atomización, es basado en trabajos experimentales realizados por E. A Herman, el cual encontró el valor de “J” para cada aleación, tal como se observa a continuación [4].

Tabla 6. Factores de atomización para cada aleación.

Alloy	J Factor
Magnesium	275
Aluminum	400
Zinc	475

Fuente:[4].

Para el caso del álabe se selecciona un factor de atomización J igual a 400. Con el cual se corrobora que si se cumple la Ecuación 8 para los valores propuestos en la Tabla 7, para así finalizar el proceso de iteración y obtener los valores adecuados para la longitud y espesor de las compuertas para cada segmento.

De la Tabla 7 se puede concluir que las dimensiones para cada segmento están bien diseñadas puesto que cumplen la relación espesor – longitud, y se obtiene en cada segmento un valor de J superior a 400 garantizando que el metal si será atomizado.

Tabla 7. Obtención del espesor y la longitud de la compuerta.

Segmento	Longitud (L_g) [mm]	Espesor (T_g) [mm]	Relación $\frac{L_g}{T_g}$	$V_g^{1,71} * T_g * \rho \geq J$
1	38,00	0,45	85,35	409,12
2	81,00	0,45	181,18	410,80
Total	119,00	0,45	266,53	403,48

Fuente: Autor.

3.1.6. ANALISIS PQ2

El análisis PQ2 es aquel que tiene en cuenta tanto las características de la máquina como la geometría de la pieza a fundir para determinar las condiciones de trabajo más adecuadas. Este análisis se puede representar mejor mediante una gráfica tal como se observar en la Figura 31 en la cual se puede encontrar el desempeño de la máquina, la presión requerida para que el fluido atomice, así como el caudal requerido para el tiempo máximo de llenado. Estas líneas conforman la ventana de operación de la máquina, en la cual se debe encontrar tanto la presión como el caudal para su correcto funcionamiento.

Para encontrar la presión del metal se hace uso de la ecuación de Bernoulli (Ecuación 9), esta tiene en cuenta las propiedades del material a fundir, así como la velocidad que se requiere en la compuerta. Al encontrar este valor de presión nos permite obtener la línea de “presión requerida para atomizar el flujo” del diagrama PQ2.

$$Pm = \frac{\rho}{2g} \left(\frac{V_g}{C_d} \right)^2 * \left(\frac{1m}{1000mm} \right)^2 \quad (9)$$

Donde:

P_m = Presión del metal (kg/m²)

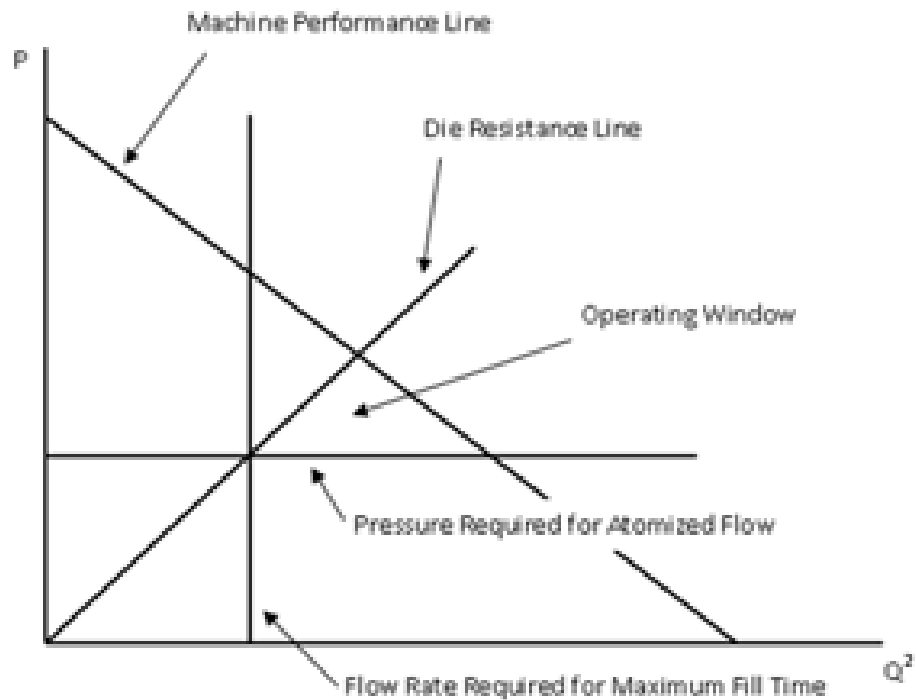
ρ = Densidad del aluminio (kg/m³)

g = constante gravitacional (m/s²)

V_g = Velocidad en la compuerta de entrada (m/s)

C_d = Coeficiente de descarga (0,45 – 0,5)

Figura 31. Grafica PQ2.



Fuente: [11].

Teniendo en cuenta la ecuación anterior, se procede a determinar la presión para el caso del álabe, considerando los valores mostrados en la Tabla 8.

Tabla 8. Valores para la ecuación de Bernoulli.

Velocidad en la compuerta	V_g	35	m/s
Densidad	ρ	2700	kg/m ³
Coeficiente de descarga	C_d	0,45	-
gravedad	g	9,81	m/s ²

Fuente: Autor.

$$Pm = \frac{2700 \frac{kg}{m^3}}{2 (9,81 \frac{m}{s^2})} \left(\frac{35 \frac{m}{s}}{0,45} \right)^2 * \left(\frac{1m^2}{1000^2 mm^2} \right) = 0,83 \frac{kg}{mm^2}$$

Por otro lado, luego de haber encontrado la presión del metal necesaria para que el fluido pueda ser atomizado, se debe determinar la fuerza de sujeción de la máquina (Ecuación 10).

$$F = Pm * \frac{A_P}{1000} \quad (10)$$

Donde:

Pm = Presión del metal (kg/mm²)

A_p = Área proyectada de la pieza (mm²)

F = Fuerza de la máquina (Ton)

Debido a que la fuerza de cierre o sujeción de la máquina debe tener en cuenta tanto la cavidad de la pieza como el sistema de alimentación (mazarota, corredor, compuerta y rebosaderos) es necesario corregir la Ecuación 9, ya que de acuerdo a la teoría debe incrementarse 1,75 el área proyectada para contemplar dichos elementos del sistema de alimentación. Por lo tanto, la ecuación de la fuerza de cierre corregida es la mostrada en la Ecuación 11 [12].

$$F = P_m * \frac{1,75 A_p}{1000} \quad (11)$$

Donde:

P_m = Presión del metal (kg/mm²)

A_p = Área proyectada de la pieza (mm²)

F = Fuerza de la máquina (Ton)

Considerando lo anterior, se usa la Ecuación 11 para calcular la fuerza de cierre para la geometría del álabe, usando un valor para el área proyectada de 18390,73 mm², obteniendo de esta forma:

$$F = 0,83 \frac{kg}{mm^2} * \frac{1,75 (18390,73 mm^2)}{1000} = 26,79 Ton$$

Luego de haber encontrado la fuerza de cierre se puede determinar la presión

máxima (Ecuación 12) obteniendo el punto superior de “línea de desempeño de la máquina” del diagrama pq2.

$$Pm = \frac{Ph * Ah - Pr * Ar}{Ap} \quad (12)$$

Donde:

Pmi = Presión máxima del metal (kg/mm²)

Ph = Presión en el lado de empuje del pistón (kg/mm²)

Ah = Área en el lado de empuje del pistón (mm²)

Pr = Presión en el lado de retroceso del pistón (kg/mm²)

Ar = Área en el lado de retroceso del pistón (mm²)

Ap = Área del pistón (mm²)

Considerando, los valores propuestos y reemplazándolos en la ecuación anterior, se obtiene:

$$Pm = \frac{2,04 \frac{kg}{mm^2} * 1963,5mm^2 - 1,29 \frac{kg}{mm^2} * 829,38mm^2}{1963,5mm^2} = 1,49 \frac{kg}{mm^2}$$

Posteriormente de haber encontrado la presión máxima del metal, se debe calcular el caudal máximo (Ecuación 13), ya que este nos permite obtener el valor inferior de la “línea de desempeño de la máquina” en la gráfica pq2.

$$Q_{max} = Vp * Ah \quad (13)$$

Donde:

Q_{max} = Caudal máximo (mm³/s)

A_h = Área del pistón (mm²)

V_p = Velocidad de disparo en seco (*dry shot speed*), (mm/s)

En el caso de la máquina, de acuerdo al catálogo el valor de “ V_p ” es de 4500mm/s, por lo tanto al reemplazar en la Ecuación 11 dicho valor se obtiene el siguiente resultado de caudal:

$$Q_{max} = 4500 \frac{mm}{s} * 1963,5 mm^2 = 8835729,34 \frac{mm^3}{s}$$

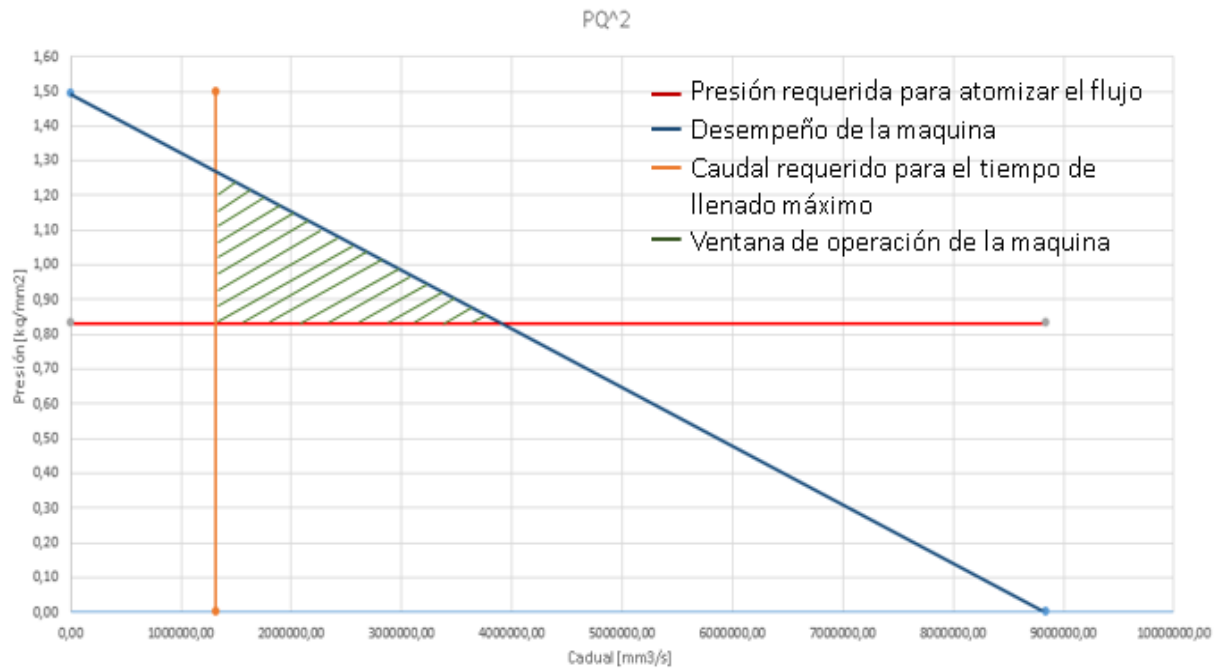
Para terminar con las líneas del diagrama pq2 se debe graficar el caudal requerido para el tiempo de llenado máximo el cual fue calculado en la sección 4.1.2. Luego de haber culminado con los cálculos de cada punto (Tabla 9) para la gráfica se obtiene como resultado el diagrama pq2 de la Figura 32.

Tabla 9. Coordenadas para los puntos de la gráfica pq2.

TIPO	Q [mm ³ /s]	P [kg/mm ²]
Desempeño de la máquina	8835729,34	0,00
	0,00	1,49
Caudal requerido para el tiempo de llenado máximo	1314942,53	1,49
	1314942,53	0,00
Presión requerida para atomizar el flujo	0,00	0,83
	8835729,34	0,83

Fuente: Autor.

Figura 32. pQ^2 para el caso de estudio.

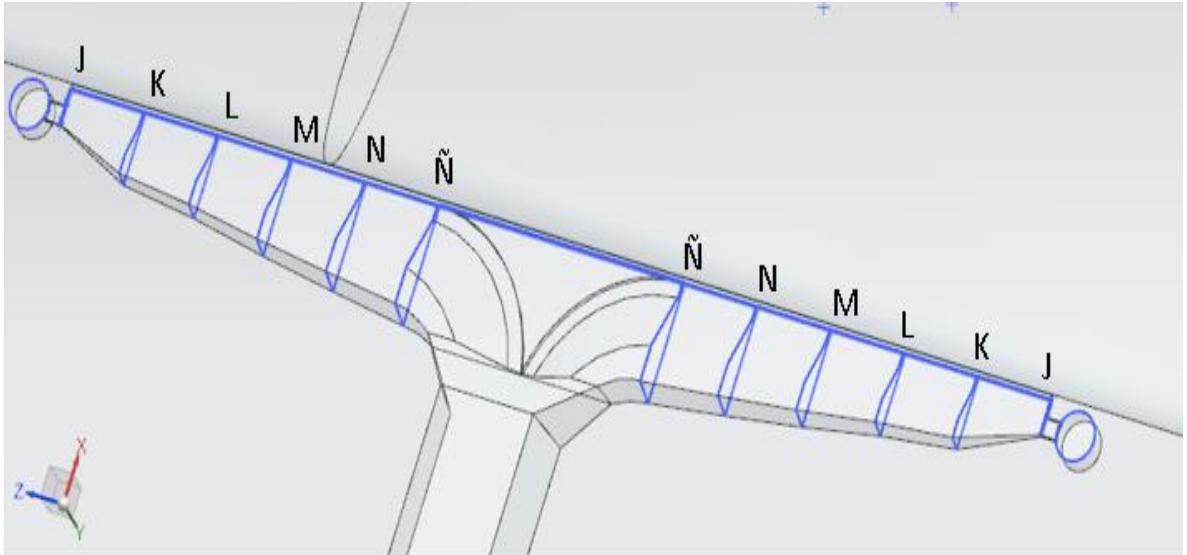


Fuente: Autor

3.2. CORREDOR TANGENCIAL

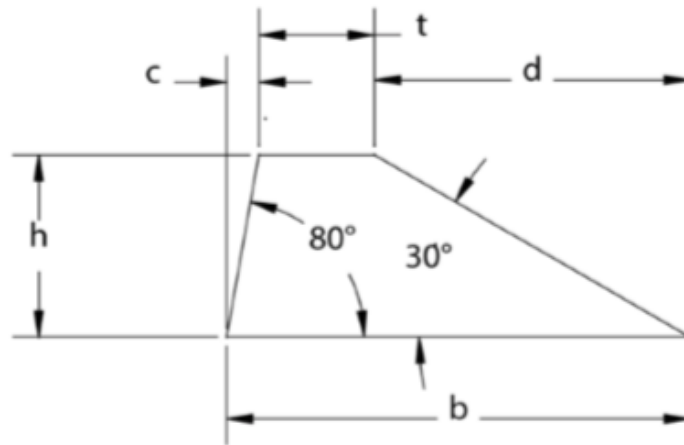
En la etapa de diseño del corredor lo primero que se debe definir son las secciones (Figura 33) y posteriormente determinar el área de cada una, luego se determinan las dimensiones para cada sección (Figura 34) [4].

Figura 33. Secciones del corredor.



Fuente: Autor.

Figura 34. Dimensiones del corredor



Fuente:[4].

Para calcular el área de cada compuerta se debe hacer uso de la Ecuación 14, la cual relaciona la distancia entre planos (L_i), el espesor de la compuerta (T_g) y el ángulo de flujo (θ).

$$A_i = \frac{T_g * L_i}{\cos(\theta)} \quad (14)$$

Donde:

A_i = Área de cada sección (mm²)

T_g = Espesor de la compuerta (mm)

L_i = Longitud de cada sección respecto a la sección J (mm)

θ = Angulo de flujo

Posteriormente de determinar el área se usa las ecuaciones propuestas a continuación para dimensionar la sección transversal del corredor.

$$h = \left(\frac{A_i}{2} \right)^{1/2} \quad (15)$$

$$b = 2,952 * h \quad (16)$$

$$d = 0,176 * h \quad (17)$$

$$t = 1,046 * h \quad (18)$$

$$c = 1,730 * h \quad (19)$$

Donde:

h = Altura del corredor (mm).

b = Ancho inferior (mm).

d = Ancho superior derecho (mm).

t = Ancho superior (mm).

c = Ancho superior izquierdo (mm).

Para el caso del álabe se obtienen los resultados de la tabla que se muestra a continuación.

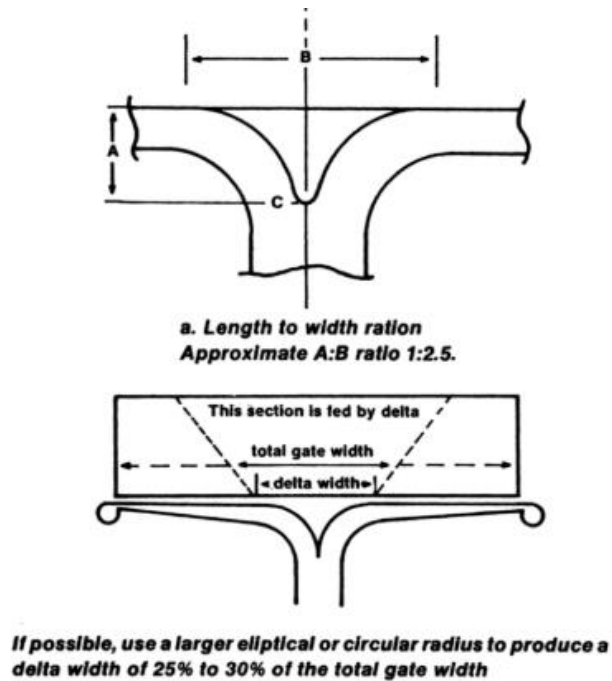
Tabla 10. Dimensiones del corredor.

Sección	Distancia [mm]	Área [mm ²]	h [mm]	b [mm]	t [mm]	c [mm]	d [mm]
J	0,00	0,67	0,580	1,71	0,61	1,00	0,10
K	8,93	5,64	1,68	4,96	1,76	2,90	0,30
L	17,85	11,27	2,37	7,01	2,48	4,11	0,42
M	26,78	16,91	2,91	8,58	3,04	5,03	0,51
N	35,70	22,54	3,36	9,91	3,51	5,81	0,59
Ñ	44,63	28,18	3,75	11,08	3,93	6,49	0,66

Fuente: Autor.

No obstante, se debe determinar las dimensiones de la región delta (Figura 35) para finalizar el dimensionamiento del corredor. De acuerdo a la teoría, esta región tiene un ancho del 25% de la longitud total del corredor y conserva una relación de longitud ancho del 1:2,5 [9], por lo tanto en el caso del álabe, se obtiene un ancho de 29,75 mm y una longitud de 11,9 mm.

Figura 35. Región delta.



Fuente: [9].

3.3. CORREDOR PRINCIPAL

En el diseño del corredor principal es necesario tener en cuenta que este es 1,1 a 1,3 veces más grande que el área de la compuerta, no obstante, este valor incrementa cuando existen uniones en “Y” pues suele incrementar desde un 3% hasta un 10% de acuerdo al criterio del diseñador. En el caso del álabe, se usó un incremento del área de la compuerta de 1,4, teniendo en cuenta el valor de incremento de 1,3 veces más el incremento por la unión en Y. Para determinar las dimensiones del corredor principal (Figura 36) se utilizó las siguientes ecuaciones [4].

$$h = \left(\frac{A_t}{2} \right)^{1/2} \quad (20)$$

$$b = 2,176 * h \quad (21)$$

$$d = 0,176 * h \quad (22)$$

$$t = 1,824 * h \quad (23)$$

$$c = 0,176 * h \quad (24)$$

Donde:

h = Altura del corredor (mm).

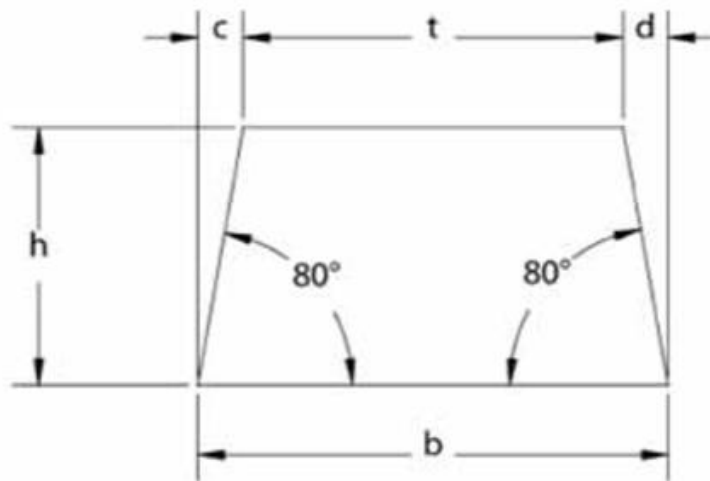
b = Ancho inferior (mm).

d = Ancho superior derecho (mm).

t = Ancho superior (mm).

c = Ancho superior izquierdo (mm).

Figura 36. Dimensiones del corredor principal.



Fuente:[4].

Considerando las anteriores ecuaciones se obtienen los resultados mostrados en

la Tabla 11.

Tabla 11. Dimensiones para el corredor principal.

Corredor principal			
Relación de aspecto 2:1 (Espesor promedio y profundidad)			
Área del corredor	A	74,38	mm ²
Espesor	h	6,10	mm
Ancho mayor	b	13,27	mm
distancia izquierda	d	1,07	mm
ancho menor	t	11,22	mm
distancia derecha	c	1,07	mm

Fuente: Autor

3.4. REBOSADEROS

Para calcular las dimensiones del rebosadero es necesario determinar su volumen, por lo que se hace uso de los porcentajes propuestos en la Tabla 12, los cuales dependen del espesor de pared de la pieza a fundir. En el caso del álabe se usó un porcentaje del 10% debido a que el espesor de la pieza está cercano a los 3,2 mm [4].

Por otro lado, el área de la compuerta de salida (*gate land* –Figura 37Figura 37) suele ser el 50 % de la compuerta de entrada, mientras que las otras medidas de este componente suelen estar en cierto rango dependiendo del material utilizado. En el caso del aluminio, el parámetro B (longitud de la compuerta) se encuentra entre 5 y 8 mm, mientras que C (espesor de la compuerta) está entre 0,6 y 1,2. Para

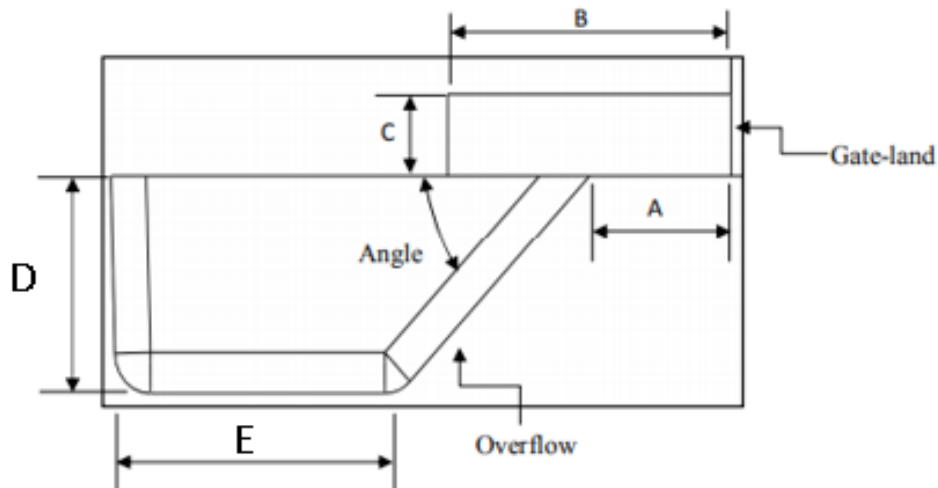
el caso del rebosadero, algunos de los parámetros estándar son, el ángulo de inclinación el cual varía desde 30° hasta 45° y la distancia A la cual se encuentra desde 2 a 5 mm [10]. Considerando lo anterior, para el álabe se obtuvieron los valores mostrados en la Figura 38.

Tabla 12. Relación del volumen del rebosadero respecto del espesor de pared.

Wall thickness of the die-cast part, mm	Overflow volume, percentage of cavity volume	
	Excellent surface quality	Some cold defects allowed
0,9	150%	75%
1,3	100%	50%
1,8	50%	25%
2,5	25%	25%
3,2	10%	10%

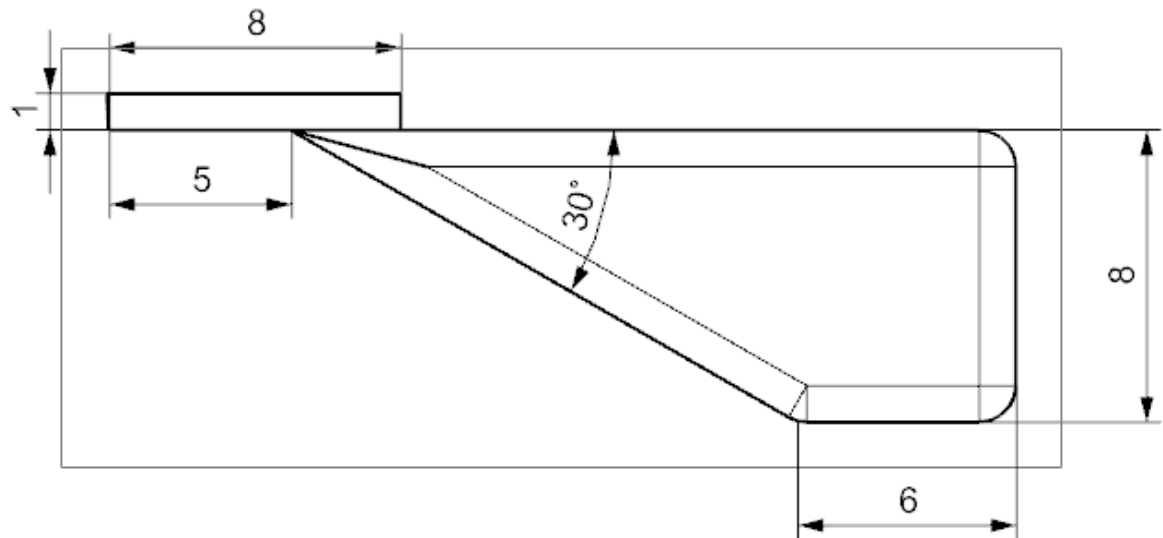
Fuente: [10].

Figura 37. Dimensiones del rebosadero y compuerta de salida.



Fuente:[10].

Figura 38. Dimensiones del rebosadero y compuerta de salida para el caso de estudio.



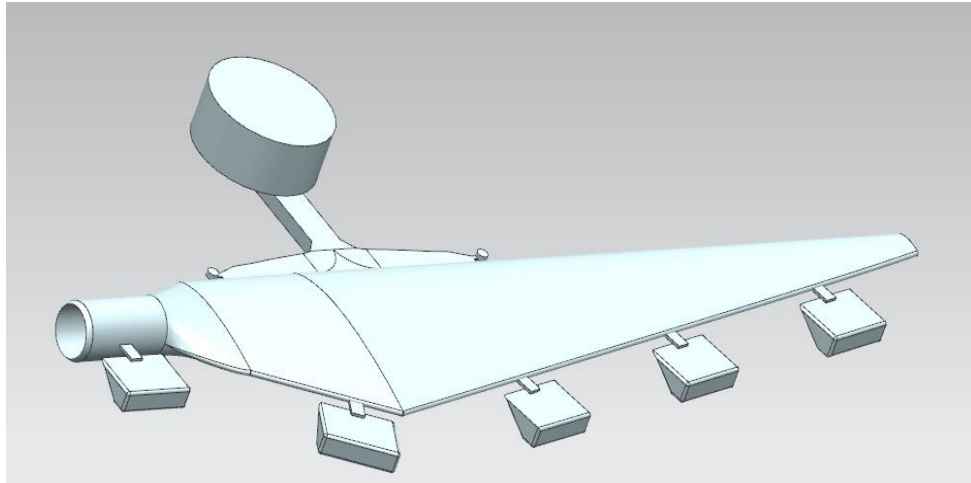
Fuente: Autor.

3.5. MAZAROTA

El dimensionamiento de la mazarota está conformado por dos parámetros; el diámetro y la altura. Las dimensiones del primero se obtienen a partir del diámetro del pistón, mientras que el espesor suele tener un valor recomendado de 20 mm [10]. En el caso del álabe se usó un diámetro de 50 mm de acuerdo al análisis PQ2.

De esta forma se concluye el cálculo de los componentes del sistema de llenado, obtenido como resultado el sistema mostrado en la siguiente Figura 39.

Figura 39. Sistema de llenado para el álabe.



Fuente: Autor.

3.6. CONCLUSIONES

Se observó que para que el metal pueda ser atomizado es necesario emplear una compuerta de 119 mm x 49 mm.

A pesar de que la fuerza de sujeción que se obtuvo fue de 27 toneladas, se debe seleccionar una máquina de inyección para cámara fría de 80 toneladas, puesto que este es el valor mínimo que tienen las máquinas actuales.

Luego de realizar los cálculos correspondientes para el dimensionamiento de los rebosaderos, se concluyó que era necesario distribuir a lo largo del álabe 5 de estos, con el objetivo de remover todo el metal contaminado producto del contacto entre el aire y el metal fundido dentro de la cavidad.

CAPITULO 4. ANALISIS TERMICO

El análisis térmico se realiza con el objetivo de determinar que tanto calor debe ser retirado de cada sección para que se produzca una buena solidificación, evitando de esta forma que se formen imperfecciones tales como rechupes o problemas de porosidad. Para realizar el análisis térmico inicialmente se debe determinar las secciones térmicas para posteriormente entrar al análisis de calor de cada sección.

4.1. SECCIONES TERMICAS

El primer paso para determinar el calor que debe ser removido del molde es determinar las secciones térmicas, las cuales se obtienen al dividir en pequeñas secciones el corredor, la cavidad y los rebosaderos, esas secciones deben estar entre los segmentos previamente determinados. Se recomienda que los segmentos sean divididos en dos o más secciones térmicas a no ser que este sea menor de 50 mm [8]. Por lo tanto, teniendo en cuenta lo previamente mencionado se procede a determinar las secciones para el caso de estudio (Figura 40).

De la figura, se puede observar que tanto el corredor como la mazarota están conformados por una sola sección debido a que sus dimensiones no son lo suficientemente grandes, mientras que en los segmentos 1 y 2 realizaron las secciones cada 50mm x 50mm. Por otro lado, los rebosaderos se dejaron cada uno como una sección térmica aparte.

Posteriormente se procede a determinar el área superficial de cada sección asignándola a la placa estacionaria (*die cover*), la placa móvil (*ejector die*), el macho (*core*) y el pistón (*Plunger*), según corresponda en cada caso [8]. Esto se puede observar con mayor claridad en la Tabla 13.

Diagrama de un avión con secciones térmicas numeradas y una leyenda explicativa:

- Secciones térmicas:
 - Segmento 1 (línea roja): 1A, 1B, 1C, 1D, 1E, 1F, 2A, 2B, 3A, 3B, 4A, 5A, 6A, 7A, 8A, 9A.
 - Segmento 2 (línea amarilla): 2A, 2B, 3A, 3B, 4A, 5A, 6A, 7A, 8A, 9A.
 - Corredor (línea azul): 1E, 1F, 2A, 2B, 3A, 3B, 4A, 5A, 6A, 7A, 8A, 9A.
 - Mazarota (línea verde): 2A, 2B, 3A, 3B, 4A, 5A, 6A, 7A, 8A, 9A.

En la tabla anterior se observa que todas las secciones tienen área superficial tanto en la placa estacionaria (P.E) como en la placa móvil (P.M) debido al diseño de la línea de partición. Por otro lado, el área en el macho solo aplica para la sección 1A, debido a que solo este punto requiere de uno para obtener dicha geometría. Así mismo, solo la mazarota tiene en cuenta el área superficial del pistón, pues es en esta donde se inyecta el metal.

Tabla 13. Áreas superficiales y volúmenes de cada sección.

Sección térmica	Área P.E [mm ²]	Área P.M [mm ²]	Área Macho [mm ²]	Área pistón [mm ²]	Área total [mm ²]	Volumen total [mm ³]
Mazarota	1963,50	1963,50	N,A	1963,50	5890,49	39269,91
Corredor	1865,24	1498,84	N,A	N,A	3364,08	5714,11
1A	931,98	910,89	753,46	N,A	2596,33	2544,56
1B	1522,64	1498,76	N,A	N,A	3021,4	5529,62
1C	2092,44	2066,94	N,A	N,A	4159,38	9517,32
1D	2657,76	2633,37	N,A	N,A	5291,13	14455,51
1E	2485,01	2477,09	N,A	N,A	4962,1	17715,79
1F	1882,43	1874,87	N,A	N,A	3757,3	15641,5
3A	737,64	713,39	N,A	N,A	1451,03	2700,07
3B	737,64	915,95	N,A	N,A	1653,59	4383,15
5A	828,98	619,1	N,A	N,A	1448,08	3117,9
6A	618,4	618,4	N,A	N,A	1236,8	3113,44
7A	617,89	617,89	N,A	N,A	1235,78	3116,19
2A	3053,46	3046,45	N,A	N,A	6099,91	21720,53
2B	1330,67	1330,01	N,A	N,A	2660,68	8773,46
4A	828,98	797,9	N,A	N,A	1626,88	3330,37
8A	618,39	618,39	N,A	N,A	1236,78	3112,77
9A	620,64	620,64	N,A	N,A	1241,28	3112,77

Fuente: Autor

4.2. CALOR BASICO DE CADA SECCIÓN

La cantidad de calor contenido en cada sección de la fundición es proporcional a su volumen. Cada vez que se realiza una nueva pieza se debe garantizar que el calor

liberado de la solidificación y el enfriamiento del metal debe ser absorbido por la matriz y debe ser transferido lejos de la superficie de la cavidad para prepararla térmicamente para la siguiente inyección de metal [8].

El cálculo del calor básico en cada sección es un paso intermedio para determinar cuánto se debe extraer totalmente. Este es calculado mediante la Ecuación 25.

$$Q'_j = RV_j[(T_i - T_e)(C_p) + \lambda] \quad (25)$$

Donde:

Q'_j = Tasa a la cual el calor básico de la sección térmica J es transferido en la matriz, Btu/hr (Watts)

V_j = Volumen de la sección térmica J, in³ (mm³)

R = Tasa de fundido, Ciclos/hr (Ciclos por segundo)

T_i = Temperatura de inyección de la fundición, °F (°C)

T_e = Temperatura de eyección de la fundición, °F (°C)

C_p = Calor específico de la aleación siendo fundida, Btu/in³°F (J/mm³°C)

λ = Calor latente de fusión de la aleación siendo fundida, Btu/in³° (J/mm³°C)

Por otro lado, para determinar los valores de la ecuación anterior se hizo uso de NADCA, esta propone que para el aluminio se deben emplear los valores de temperaturas (inyección y eyección) y calores (específico y latente) propuestos en la Tabla 14.

Tabla 14. Calores y temperaturas para el aluminio.

Temperatura de inyección del metal, °F (°C)	1250 (676,6)
Temperatura de eyección, °F (°C)	675 (357,2)
Temperatura solida del metal, °F (°C)	1050 (565,5)
Temperatura liquida del metal, °F (°C)	1095 (590,5)
Calor especifico, Btu/in ³ °F (Watts/mm ³ °C)	0,025 (2,9)
Calor latente, Btu/in ³ (Watts/mm ³)	17 (1,096)
ciclos por hora , ciclo/hr (ciclos/s)	3 (3x10 ⁻³)

Fuente: [8].

Teniendo en cuenta los volúmenes de la Tabla 13 y los valores de la Tabla 14 se procede a calcular los valores de calor básico para cada sección, obteniendo de esta forma los valores de la Tabla 15.

Tabla 15. Calor básico de cada sección.

Sección térmico	Transferencia de calor [Watts]
Mazarota	66,11
Corredor	9,62
1A	4,28
1B	9,31
1C	16,02
1D	24,33
1E	29,82
1F	26,33
3A	4,55
3B	7,38
5A	5,25
6A	5,24
7A	5,25
2A	36,56
2B	14,77
4A	5,61
8A	5,24
9A	5,24

Fuente: Autor.

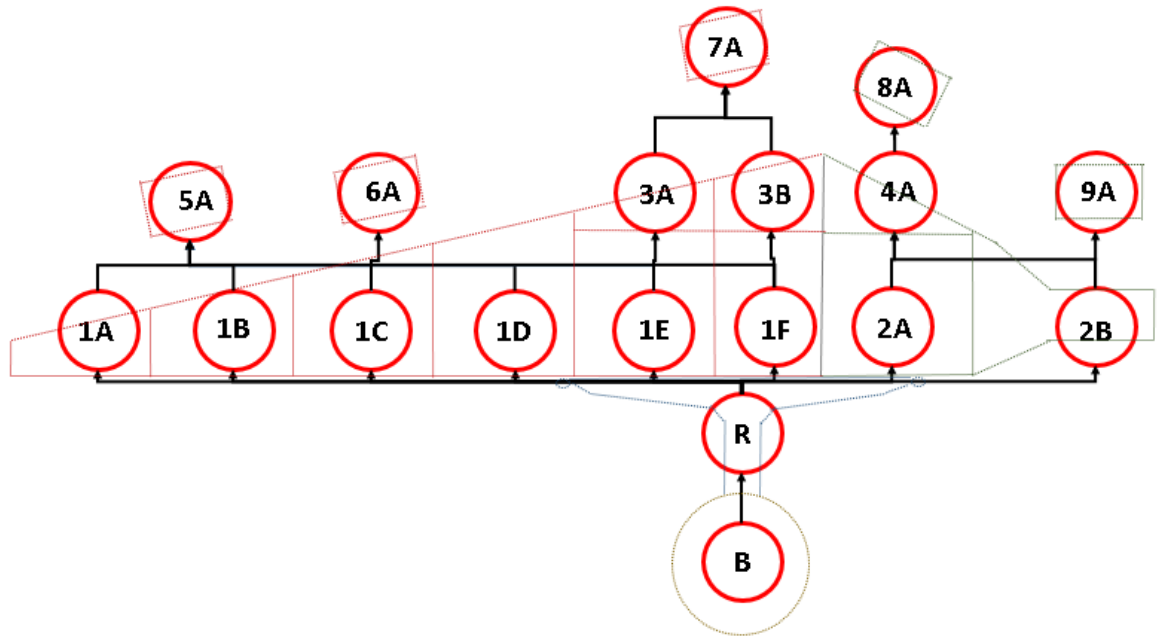
4.3. CALOR CEDIDO EN TRANSITO

Debido a que el molde no se llena instantáneamente no es posible usar el calor anterior, ya que incluso si el molde se llenara en unos milisegundos, el metal fundido

fluye por una superficie con temperatura menor, por lo que habría una pérdida de calor considerable antes de que el metal alcance su posición final. Es por tal motivo que es necesario determinar la forma en que fluye el metal a través de cada segmento y así observar en que partes se va perdiendo calor [8].

La Figura 41, muestra cómo sería la representación del flujo de metal a través de cada sección térmica, por ejemplo para la sección 5A (rebosadero) se observa que para que llegue el metal allí debe fluir el desde el bebedero, luego pasa por el corredor y por ultimo por toda la fila 1. Por lo tanto, se debe considerar cada de una de esas secciones para calcular el calor cedido en tránsito (Ecuación 26)

Figura 41. Flujo del metal a través de cada sección térmica durante el llenado



Fuente: Autor.

$$Q_j = \left(\frac{x_j}{N_j}\right) RV_j \left[\left(T_i - \left(T_l - \frac{(T_l - T_s)}{4} \right) \right) C_p + \frac{\lambda}{4} \right] \quad (26)$$

Donde:

Q_j = Calor transferido a otras partes de la matriz durante el llenado de la cavidad, Btu/hr (Watts)

X_j = Posición de la sección j en el flujo de corriente (por ejemplo, sección 1A es la tercera de 5 secciones en posición vertical que tiene el segmento 1)

N_j = Número total de secciones en el flujo de corriente (por ejemplo, el segmento 1 contiene unas cadenas de 6 secciones, por lo tanto, $N = 5$)

V_j = Volumen de la sección térmica J, in³ (mm³)

R = Tasa de fundido, Ciclos/hr (Ciclos por segundo)

T_i = Temperatura de inyección de la fundición, °F (°C)

T_s = Temperatura de solidificación del metal siendo fundido, °F (°C)

C_p = Calor específico de la aleación siendo fundida, Btu/in³°F (J/mm³°C)

λ = Calor latente de fusión de la aleación siendo fundida, Btu/in³ (Joules/mm³)

T_l = Temperatura líquida del metal siendo fundido, °F (°C)

Teniendo en cuenta la ecuación anterior, se procede a calcular para cada segmento el calor perdido durante el llenado de la cavidad (Tabla 16).

Posteriormente de haber encontrado cuanto calor pierde cada sección térmica durante el llenado de la cavidad se procede a determinar en qué secciones del flujo del metal fue que hubo la transferencia de calor. Por ejemplo, para la sección 5A se observa que hay pérdidas en el corredor, la mazarota y en la fila 1. Por ende, se usa la Ecuación 27 para cuantificar el valor que le corresponde a cada uno.

Tabla 16. Calor perdido durante el llenado de la cavidad.

sección térmico	Transferencia de calor [Watts]	X/N	Calor perdido durante el llenado de la cavidad [Watts]
Mazarota	66,11	0	0,00
Corredor	9,62	2/5	1,03
1A	4,28	3/5	0,69
1B	9,31	3/5	1,50
1C	16,02	3/5	2,58
1D	24,33	3/5	3,91
1E	29,82	3/5	4,79
1F	26,33	3/5	4,23
3A	4,55	4/5	0,97
3B	7,38	4/5	1,58
5A	5,25	4/5	1,12
6A	5,24	4/5	1,12
7A	5,25	1	1,41
2A	36,56	3/5	5,88
2B	14,77	3/5	2,37
4A	5,61	4/5	1,20
8A	5,24	1	1,40
9A	5,24	4/5	1,12

Fuente: Autor

$$q'_j = \frac{q_j}{(X_j - 1)} \quad (27)$$

Donde:

q_j' = Calor liberado del metal a las cavidades durante el llenado de la cavidad, Btu/hr (Watts)

X_j = Posición de la sección j en el flujo de corriente (por ejemplo, sección1A es la tercera de 5 secciones en posición vertical que tiene el segmento 1)

No obstante, se observa que la fila 1 está conformada por seis secciones térmicas, por lo que se debe dividir el valor obtenido para la fila 1 entre seis y de esta forma obtener el valor de calor que cada una de las secciones adquiere en el momento que fluye el metal. Esto se realiza con el objetivo de determinar cuánto es el calor neto que contiene cada sección, tal como se observa en la Tabla 17.

4.4. TRANSFERENCIA DE CALOR NETA

Luego de calcular la cantidad de calor liberado se procede a cuantificar la transferencia de calor neta (Tabla 17). Este valor es importante en cada sección ya que establece la cantidad que debe extraer el molde para que no se produzcan imperfecciones (rechupes o pandeo). Por otro lado, es necesario determinar el calor que extrae los componentes del molde (placa móvil, placa estacionaria, pistón y el núcleo) [8].

Para encontrar el calor neto de cada sección (Tabla 19) en todos los componentes del molde, se debe multiplicar el calor neto (Tabla 17) y el porcentaje del área superficial de cada componente (Tabla 18).

Tabla 17. Análisis térmico para cada sección.

sección térmico	Calor básico [Watts]	Calor perdido durante el llenado de la cavidad (Watts)	Calor liberado del metal fluyendo a las secciones térmicas (Watts)																	Calor neto (Watts)
			Corredor	1A	1B	1C	1D	1E	1F	3A	3B	5A	6A	7A	2A	2B	4A	8A	9A	
Mazarota	66,11	0,00	1,03	0,34	0,75	1,29	1,96	2,40	2,12	0,32	0,53	0,37	0,37	0,35	2,94	1,19	0,40	0,35	0,37	83,19
Corredor	9,62	1,03		0,34	0,75	1,29	1,96	2,40	2,12	0,32	0,53	0,37	0,37	0,35	2,94	1,19	0,40	0,35	0,37	24,64
1A	4,28	0,69																		3,92
1B	9,31	1,50																		8,14
1C	16,02	2,58																		13,77
1D	24,33	3,91																		20,75
1E	29,82	4,79																		25,35
1F	26,33	4,23																		22,42
3A	4,55	0,97																		3,75
3B	7,38	1,58																		5,97
5A	5,25	1,12																		4,12
6A	5,24	1,12																		4,12
7A	5,25	1,41																		3,84
2A	36,56	5,88															0,20	0,18	0,37	31,06
2B	14,77	2,37															0,20	0,18		13,14
4A	5,61	1,20																0,35		4,76
8A	5,24	1,40																		3,84
9A	5,24	1,12																		4,12

Fuente: Autor

Tabla 18. Porcentaje del área superficial para cada componente.

Secciones térmicas	porcentaje para cada segmento			
	Placa estacionaria	Placa móvil	Núcleo	Pistón
Mazarota	33%	33%	N,A	33%
Corredor	55%	45%	N,A	N,A
1A	36%	35%	29%	N,A
1B	50%	50%	N,A	N,A
1C	50%	50%	N,A	N,A
1D	50%	50%	N,A	N,A
1E	50%	50%	N,A	N,A
1F	50%	50%	N,A	N,A
3A	51%	49%	N,A	N,A
3B	45%	55%	N,A	N,A
5A	57%	43%	N,A	N,A
6A	50%	50%	N,A	N,A
7A	50%	50%	N,A	N,A
2A	50%	50%	N,A	N,A
2B	50%	50%	N,A	N,A
4A	51%	49%	N,A	N,A
8A	50%	50%	N,A	N,A
9A	50%	50%	N,A	N,A

Fuente: Autor.

Tabla 19. Calor neto para cada componente.

Secciones térmicas	Calor contenido de las secciones térmicas (Watts)	Calor neto para cada componente (Watts)			
		Placa estacionaria	Placa móvil	Núcleo	Pistón
Mazarota	83,19	27,73	27,73	N,A	27,73
Corredor	24,64	13,66	10,98	N,A	N,A
1A	3,92	1,41	1,38	1,14	N,A
1B	8,14	4,10	4,04	N,A	N,A
1C	13,77	6,93	6,84	N,A	N,A
1D	20,75	10,42	10,33	N,A	N,A
1E	25,35	12,70	12,66	N,A	N,A
1F	22,42	11,23	11,19	N,A	N,A
3A	3,75	1,90	1,84	N,A	N,A
3B	5,97	2,66	3,31	N,A	N,A
5A	4,12	2,36	1,76	N,A	N,A
6A	4,12	2,06	2,06	N,A	N,A
7A	3,84	1,92	1,92	N,A	N,A
2A	31,06	15,55	15,51	N,A	N,A
2B	13,14	6,57	6,57	N,A	N,A
4A	4,76	2,42	2,33	N,A	N,A
8A	3,84	1,92	1,92	N,A	N,A
9A	4,12	2,06	2,06	N,A	N,A
Total	280,90	0,00	0,00	0,00	0,00

Fuente: Autor

4.5. CALOR PERDIDO EN LA SUPERFICIE

Habitualmente en la cavidad del molde se suele aplicar un material de separación el cual suele estar mezclado con agua. Debido al calor en la matriz, el agua se evapora dejando en la superficie solamente el material de separación. Enfriar la cavidad con la evaporación del agua puede provocar que al momento de inyectar el metal se produzca un choque térmico muy grande, es por tal motivo que la temperatura en la superficie de la cavidad debe estar controlada [8].

Para calcular el calor perdido en la superficie debido a la evaporación del agua es necesario determinar la cantidad de agua que será rociada en la superficie. De acuerdo a la teoría el diseñador puede asumir que cuando el material fundido es aluminio la cantidad el agua rociada es de 4.9 J/mm² por disparo empleando unas boquillas ubicadas en el molde [8]. Teniendo en cuenta dicho dato se debe restar el calor perdido debido al agua rociada del valor del calor neto para cada componente, para de esta forma obtener que debe procesar el molde (Ecuación 28).

$$Q_j = Q_j^* - RA(q_w) \quad (28)$$

Donde:

Q_j = Calor procesado por la matriz debido al calor perdido por cada sección j,
Btu/Hr (watt)

Q_j^* = Calor neto de cada sección j, Btu/Hr (watt)

R = Tasa de fundido, Ciclos/hr (Ciclos por segundo)

A = Área superficial de cada sección j, in² (mm²)

q_w = Calor removido por el rociado del agua, Btu/shot in² (J/ Shot mm²)

Teniendo en cuenta la ecuación anterior se procede a determinar el calor transferido a través de la matriz (Tabla 20).

Tabla 20. Transferencia de calor final.

Secciones térmicas	Calor Qj a ser transferido en todo el molde (Watts)	Calor Qj a ser transferido a través de cada componente del molde (Watts)			
		Placa estacionaria	Placa móvil	Núcleo	Pistón
Mazarota	59,14	19,71	19,71	N,A	19,71
Corredor	10,91	6,05	4,86	N,A	N,A
1A	-6,68	-2,40	-2,34	-1,94	N,A
1B	-4,20	-2,12	-2,08	N,A	N,A
1C	-3,21	-1,62	-1,60	N,A	N,A
1D	-0,86	-0,43	-0,43	N,A	N,A
1E	5,09	2,55	2,54	N,A	N,A
1F	7,08	3,55	3,53	N,A	N,A
3A	-2,18	-1,11	-1,07	N,A	N,A
3B	-0,78	-0,35	-0,43	N,A	N,A
5A	-1,79	-1,02	-0,77	N,A	N,A
6A	-0,93	-0,47	-0,47	N,A	N,A
7A	-1,21	-0,60	-0,60	N,A	N,A
2A	6,15	3,08	3,07	N,A	N,A
2B	2,28	1,14	1,14	N,A	N,A
4A	-1,89	-0,96	-0,93	N,A	N,A
8A	-1,21	-0,61	-0,61	N,A	N,A
9A	-0,95	-0,48	-0,48	N,A	N,A
Total	64,76	23,92	23,06	-1,94	19,71

Fuente: Autor.

De la tabla anterior, se puede observar que algunas secciones pierden más calor debido al agua rociada que lo que reciben de la fundición, lo cual se evidencia con los valores negativos de la tabla. Esto no es deseado para la fundición puesto que producirá problemas en la superficie de la fundición (estrías), sin embargo esto se puede prevenir cambiando la cantidad de agua rociada, es por tal motivo que se propone usar 0,82 J/Shot mm² para mitigar los daños en la superficie de la fundición, obteniendo los resultados de la Tabla 21.

Debido a que los valores obtenidos en la tabla anterior son muy bajos no es necesario el uso de canales de refrigeración, esto se puede corroborar usando el nomograma (anexo 1) propuesto en “*DIE CASTING DIES: DESIGNING*” [8].

Tabla 21. Transferencia de calor corregida.

Secciones térmicas	Calor Qj a ser transferido en todo el molde (Watts)	Calor Qj a ser transferido a través de cada componente del molde (Watts)			
		Placa estacionaria	Placa móvil	Núcleo	Pistón
Mazarota	79,17	26,39	26,39	N,A	26,39
Corredor	22,34	12,39	9,95	N,A	N,A
1A	2,15	0,77	0,75	0,62	N,A
1B	6,07	3,06	3,01	N,A	N,A
1C	10,93	5,50	5,43	N,A	N,A
1D	17,13	8,61	8,53	N,A	N,A
1E	21,96	11,00	10,96	N,A	N,A
1F	19,86	9,95	9,91	N,A	N,A
3A	2,76	1,40	1,35	N,A	N,A
3B	4,84	2,16	2,68	N,A	N,A
5A	3,13	1,79	1,34	N,A	N,A
6A	3,27	1,64	1,64	N,A	N,A
7A	3,00	1,50	1,50	N,A	N,A
2A	26,89	13,46	13,43	N,A	N,A
2B	11,33	5,66	5,66	N,A	N,A
4A	3,64	1,86	1,79	N,A	N,A
8A	2,99	1,50	1,50	N,A	N,A
9A	3,27	1,63	1,63	N,A	N,A
Total	64,76	23,92	23,06	-1,94	19,71

Fuente: Autor.

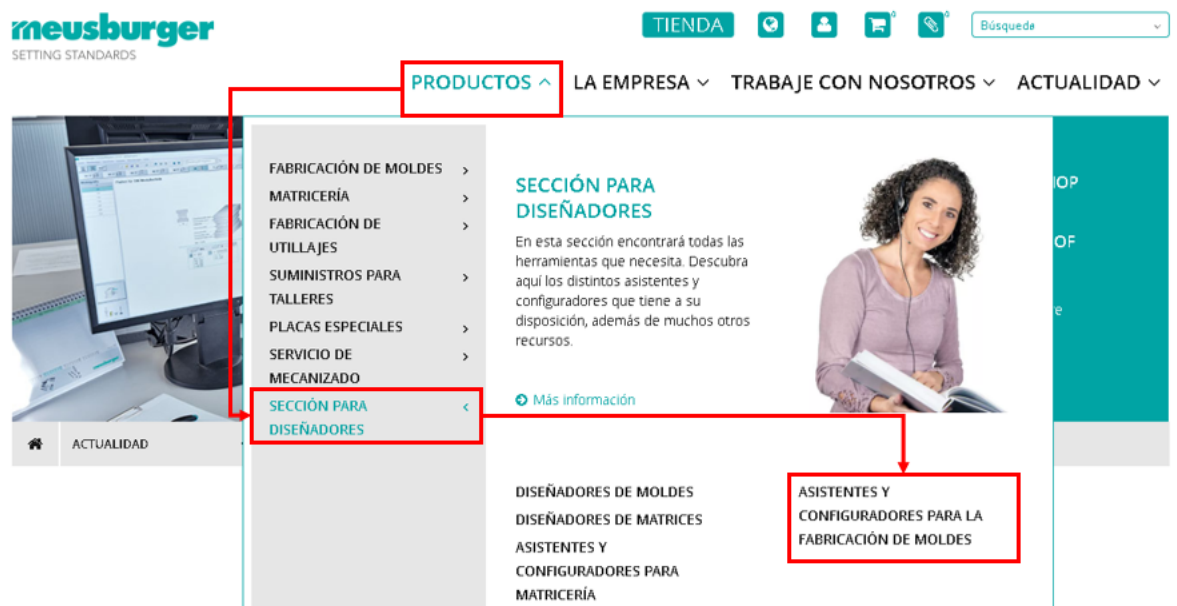
4.6. CONCLUSIONES

Luego de realizar el análisis térmico para el álabe y los elementos del sistema de llenado, se encontró que el calor que debe ser extraído por los canales de refrigeración es proporcional a la cantidad de piezas a fundir. Por lo tanto, debido a la baja producción de álabes en el molde, se determinó que no era necesario diseñar canales de refrigeración ya que se extraía suficiente calor al rociar el líquido para desmoldar la pieza sobre la cavidad, brindando así que la superficie siempre esté preparada térmicamente para cada nuevo llenado. Esto se corrobora al revisar el nomograma, el cual establecía que, si se obtenía un valor de $\text{Btu/in}^2 \text{ hr}$, no era necesario implementar canales de alimentación.

CAPITULO 5. DISEÑO DEL MOLDE EN SOFTWARE CAD

Para obtener los componentes del molde se hará uso del asistente de diseño que ofrece la empresa Meusbürger, ya que posee un amplio catálogo de productos que pueden ser transferidos a un software CAD. Lo primero que se debe hacer es ingresar a la página de la compañía (Figura 42), allí se debe pulsar sobre productos para luego dirigirse a la sección para diseñadores, allí aparecerá la opción para abrir el asistente para la fabricación de moldes.

Figura 42. Procedimiento para abrir el asistente para la fabricación de moldes.



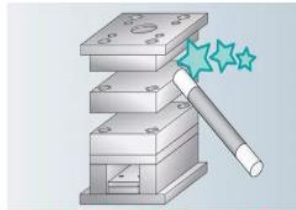
Fuente:[7].

Luego se procede a seleccionar el tipo de molde más adecuado de acuerdo a la pieza que se desea fundir, para el caso del álabe se usara un molde longitudinal

(Figura 43) debido a las dimensiones de dicha pieza.

Figura 43. Tipos de moldes.

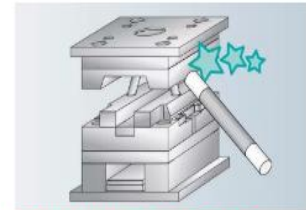
ASISTENTES



MOLDES LONGITUDINALES



MOLDES TRANSVERSALES



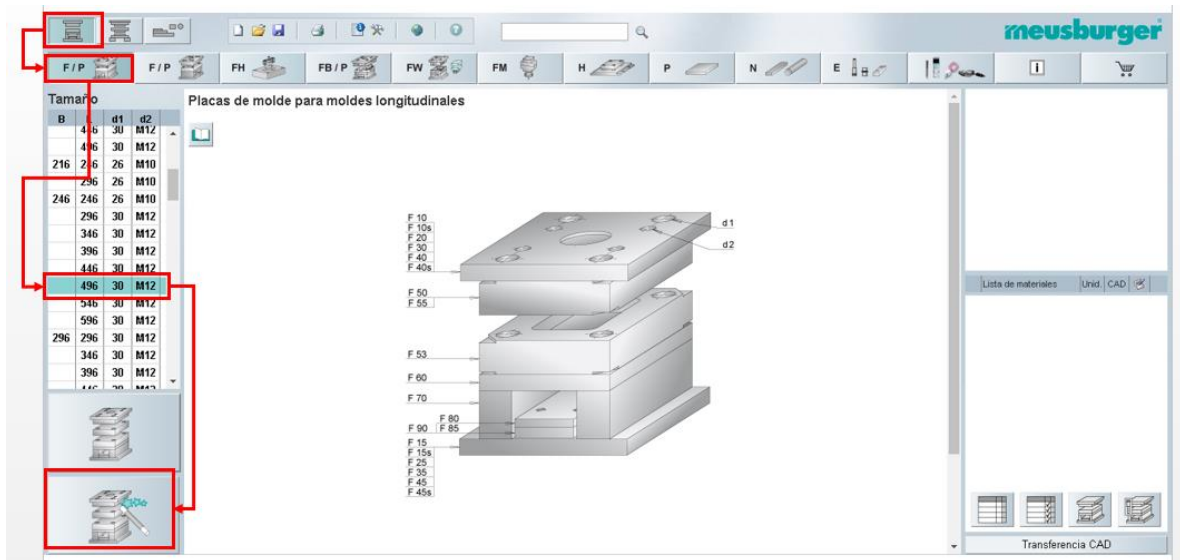
MOLDES DE CORREDERAS

Fuente: [7]

Posteriormente se abre la ventana mostrada en la Figura 44, en la cual se pueden seleccionar las dimensiones que se desea para el molde que se va a diseñar. Debido a que el álabe tiene unas dimensiones de 460 mm de largo y 88 mm de ancho, se selección al costado izquierdo un molde de 246 mm x 496mm.

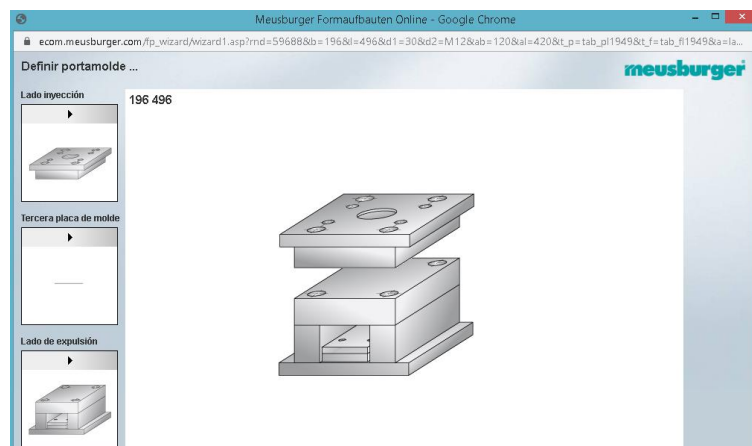
Luego de que se selecciona el ancho y largo del molde se procede a definir la disposición de las placas (Figura 45), en esta se tiene en cuenta la cantidad de placas que tendrá así como la ubicación de la mazarota. Posteriormente se debe seleccionar los espesores para cada una de las placas (Figura 46).

Figura 44. Ventana de selección de tamaños.



Fuente: [7].

Figura 45. Distribución de las placas del molde.



Fuente: [7].

Figura 46. Selección de espesores de las placas del molde.

Seleccionar elementos de molde ...

F 15 / 196 496 EUR/1

Haga clic sobre el precio para hacer el pedido 1 unidades

S	1730	2083	2085	2162	2311	2312	2343	2343ESU	2714HH	2738	2767	3.4365
27	205					276						
36	238											

Ex stock
Fabricación sobre pedido

Fuente: [7].

Por último, se procede a descargar las piezas seleccionadas en formato “. STEP” para abrirlas en NX. Para esto se debe seleccionar todas las piezas del molde y presionar “transferencia CAD”, donde se elige el tipo de formato en el que se desea descargar (Figura 47).

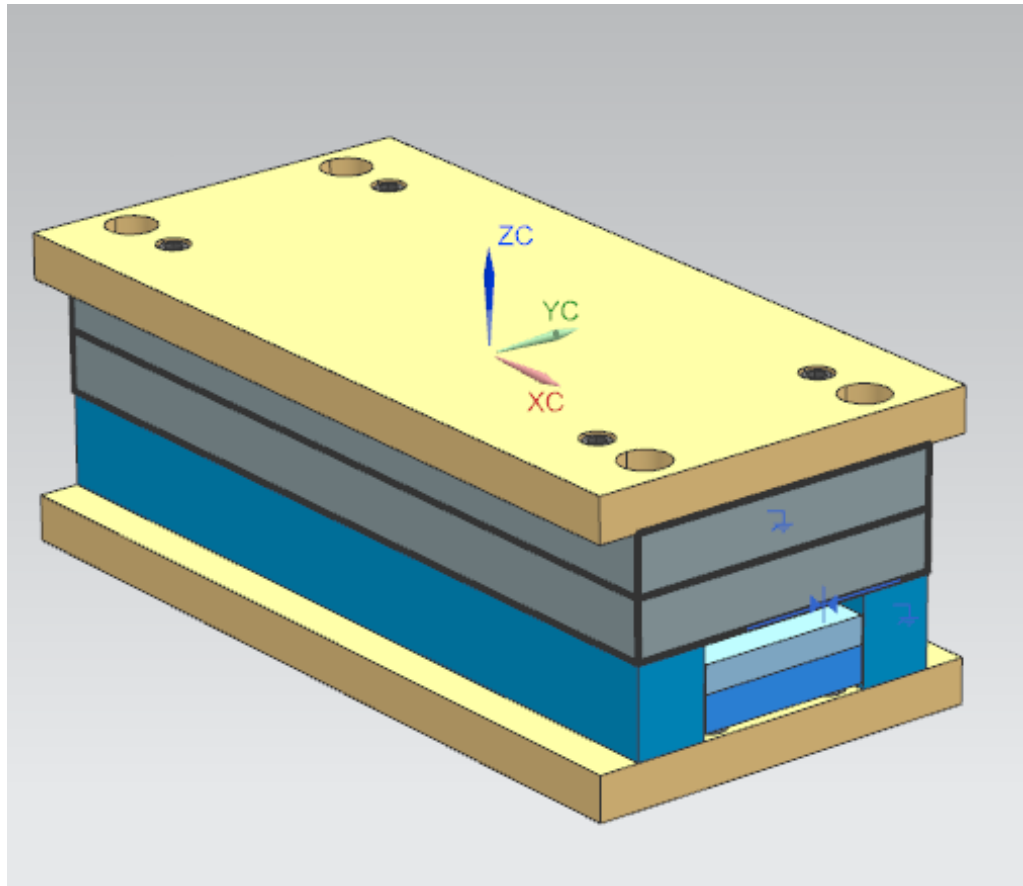
Figura 47. Transferencia CAD de las piezas.



Fuente: [7].

Al abrir el archivo descargado en NX, se obtiene el molde mostrado en la Figura 48, sin embargo, un problema que presenta es que tanto la placa fija como la placa móvil no tienen aún el sistema de llenado y la cavidad. Es por tal motivo que procede a hacer las dos placas de nuevo con el objetivo de posteriormente reemplazarlas en el ensamble general.

Figura 48. Molde obtenido mediante el asistente de Meusburguer.

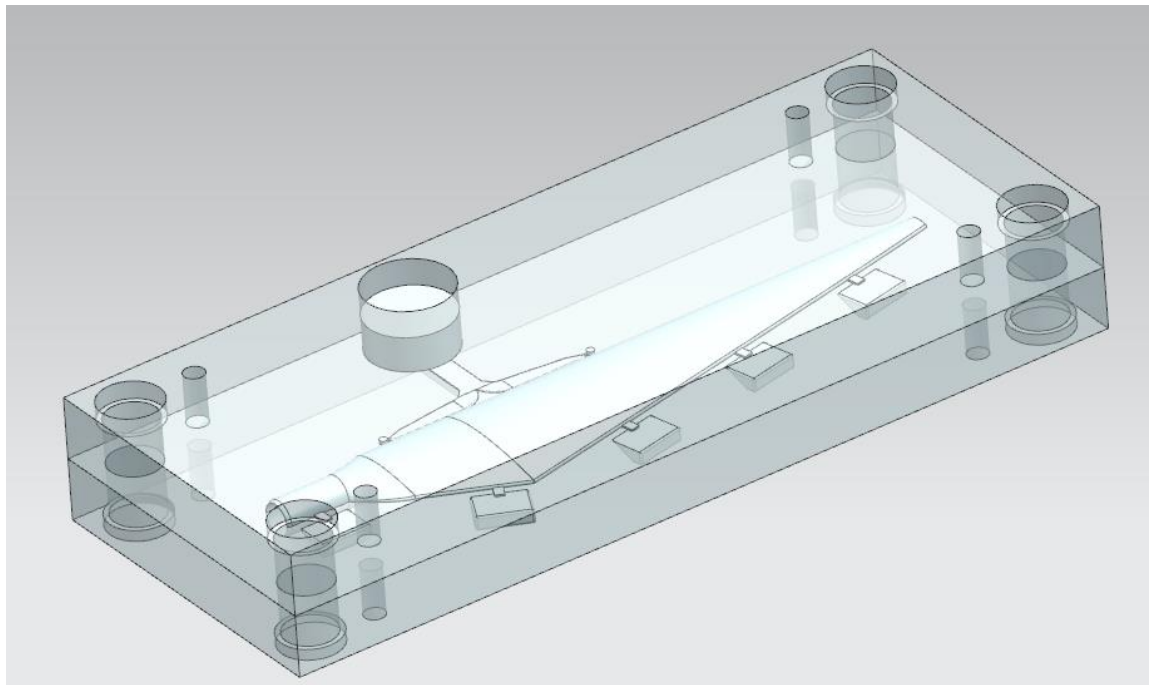


Fuente: Autor.

Las dos placas se realizan tomando como referencia las dimensiones que previamente se determinaron para el molde (largo y ancho) y el plano de partición del capítulo 2 (Figura 8). A partir de esto y mediante operaciones tales como extrusiones y perforaciones se obtienen las placas mostradas en la *Figura 49*. El último paso que se realiza es el ensamble de las placas, tal como se observa en *Figura 50*, logrando obtener el molde final para el álabe.

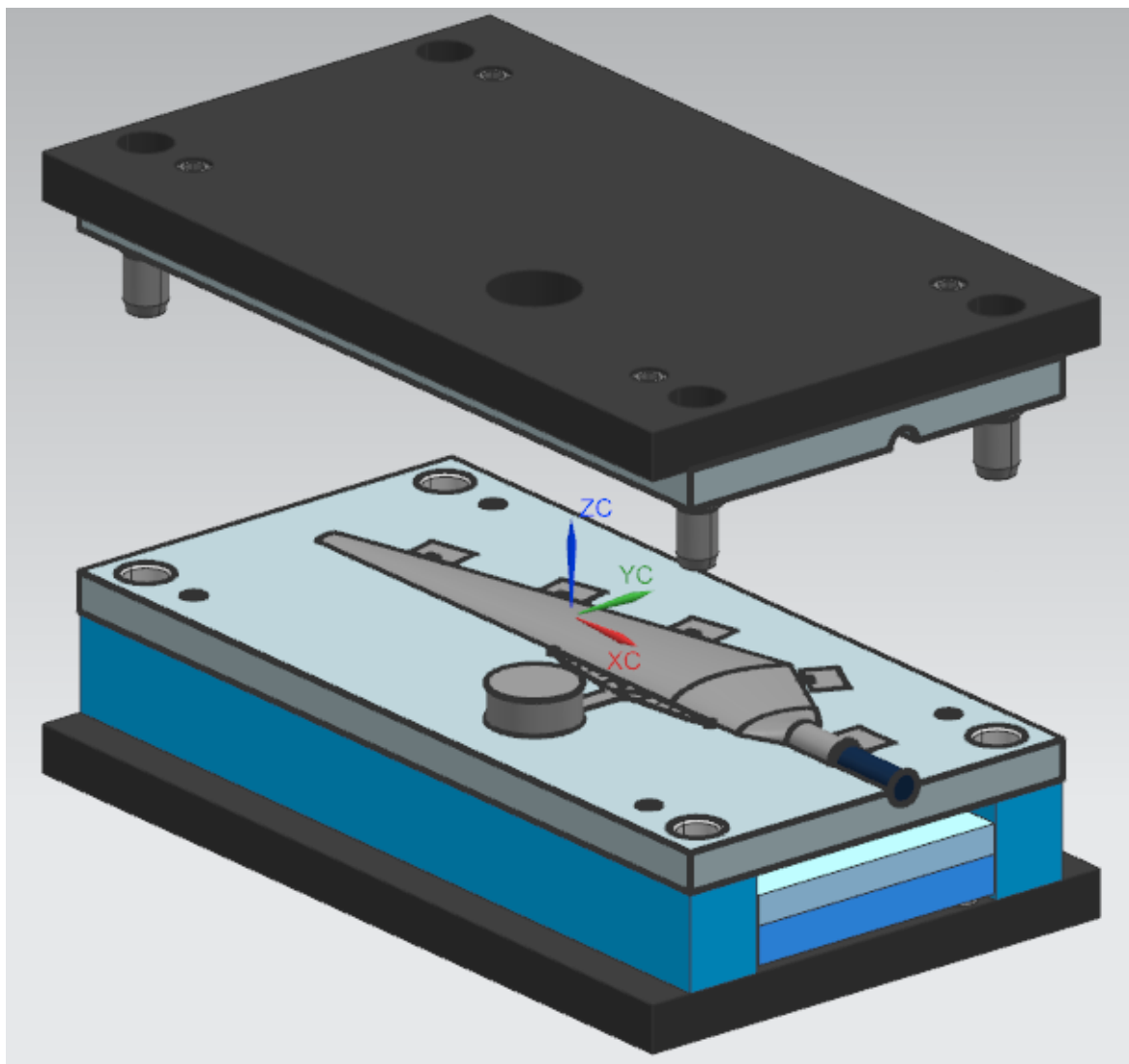
Debido a que los componentes del molde fueron obtenidos mediante el asistente de diseño de Meusburguer, se utilizó los materiales propuestos por dicha empresa. Por lo tanto, para la fabricación de las placas se recomienda usar acero AISI 1045, con los siguientes tratamientos térmicos; recocido, endurecimiento y temple. En cuanto a los bujes, casquillos y columnas, el material utilizado fue acero AISI 5115.

Figura 49. Placa móvil y fija del molde permanente.



Fuente: Autor.

Figura 50. Molde terminado para el álabe.



Fuente: Autor.

CONCLUSIONES

Al realizar el diseño del molde para fundición de aluminio por inyección, con la geometría del álabe, se puede concluir que el procedimiento realizado a lo largo del trabajo de grado puede ser implementado para la obtención de moldes para cualquier geometría solicitada, siendo este un documento de apoyo para los diseñadores o estudiantes interesados en el tema.

Al evaluar la geometría del álabe entregada por el área de termo-fluidos de la Universidad Santo Tomás para el diseño del molde, se determinó que era necesario realizar un rediseño de la pieza ya que se encontraron filos vivos los cuales podrían presentar agrietamientos al momento de la solidificación. Este rediseño se enfocó en el redondeando de los filos empleando un radio de 3mm.

A partir del planteamiento de alternativas se observó que el sistema de llenado más adecuado para el álabe es aquel que emplea un corredor tangencial, debido a que la principal característica de este es que permite distribuir el metal fundido a lo largo de la cavidad.

Se seleccionó como alternativa el sistema con una sola cavidad ya que la baja producción de álabes (3 álabes) no justifica la implementación de un sistema multi-cavidades, puesto que estos se emplean cuando se requieren grandes producciones con el objetivo de mejorar la productividad.

Debido a la baja producción de álabes en el molde, se determinó que no era necesario diseñar canales de refrigeración ya que se extraía suficiente calor al rociar con el líquido desmoldante la cavidad antes de cada nuevo llenado, preparando así la superficie para que no se produzca un choque térmico al momento de la inyección del metal.

Luego de realizar el diseño del molde, se observó que tanto la placa fija como la placa móvil tenían 496 mm x 246 mm, siendo estas lo suficientemente grandes para que el álabe pueda ser fundido en la cavidad mecanizada dentro de estas. Adicionalmente, debido al proceso de manufactura empleado, se garantiza que la pieza va a tener una buena calidad dimensional, buen acabado superficial y la resistencia mecánica deseada.

REFERENCIAS

- [1] E. D. Ortiz Roberto, “Diseño de una turbina hidrocínética de eje horizontal para microgeneración de energía eléctrica,” 2017.
- [2] M. P. GROOVER., *Fundamentos de manufactura moderna*, 3rd ed. 12-jan-07, 2007.
- [3] NADCA, “North American Die Casting Association: NADCA,” *Understanding Alloy Shrink Types of Shrink*. [Online]. Available: <https://www.diecasting.org/iParts/Common/ContentBlock/PostDefault.aspx?iUniformKey=c2a9fedf-ffc6-4116-86ad-555113f19f11&ReplyOptions=a2354a56-c5c3-4f68-8955-0b1e3f497e3c&TagKeys=695c971c-7ab8-43f7-b6c5-7bf7a7717c0b&DefaultHtmlSessionKey=bcb08659-23d9-4ecf>. [Accessed: 02-Aug-2019].
- [4] NADCA North American Die Casting Association, “Gating manual,” p. 83, 2006.
- [5] M. Gutiérrez Cabanes, “Diseño y fabricación de un molde para el estudio de la influencia de la geometría de los sistemas de distribución en el atrapamiento de aire en procesos de fundición por inyección a alta presión,” Universidad Politécnica de Cartagena, 2013.
- [6] M. R. Aboel-fotouh and A. Shash, “semi-automated gating system design with optimum gate and semi-automated gating system design with optimum gate and overflow positions for hpdc,” Cairo University, 2018.
- [7] “Meusburger: Standard components.” [Online]. Available: <https://www.meusburger.com/>.
- [8] E. A. Herman, *Die casting dies: Designing*. 1996.
- [9] G. E. Totten, K. Funatani, and L. Xie, *Handbook of Metallurgical Process*

Design. 2004.

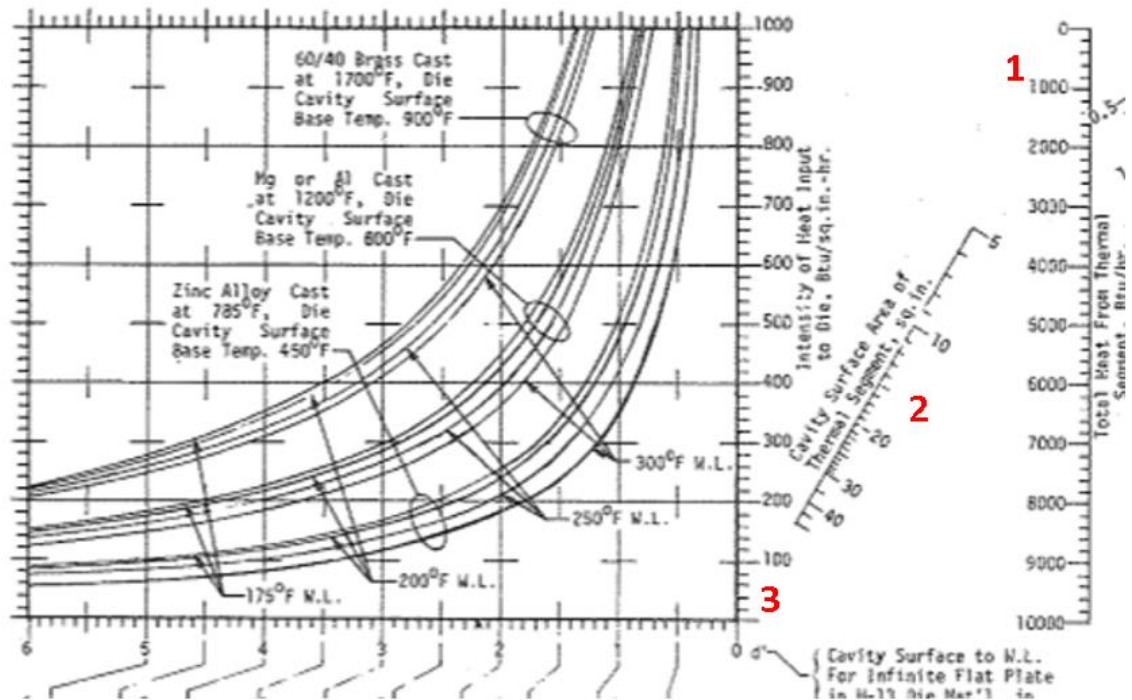
- [10] V. Kumar, "Computer aided design of multi cavity die casting dies from part product model," Sant Longowal Institute of Engineering and Technology, 2014.
- [11] "FLOW 3D," *p-q squared analysis*. [Online]. Available: <https://www.flow3d.com/p-q-squared-analysis/>.
- [12] W. A. K. Geoffrey Boothroyd, Peter Dewhurst, *Product Design for Manufacture and Assembly*, vol. 98. 2010.

ANEXOS

ANEXO A

Para determinar si el molde requiere de canales de refrigeración se usó el nomograma propuesto en la Figura 51.

Figura 51. Nomograma para determinar los canales de refrigeración.



Fuente:[8].

Lo primero que se realizó fue convertir los valores de la Tabla 21 a Btu/hr, sin embargo, esto solo se realizó para los valores totales del Calor Q_j a ser transferido a través de cada componente del molde, esto se hace con el objetivo de ubicar el primer punto del nomograma el cual se encuentra en la Figura 51 con el número 1.

Tabla 22. Valor de transferencia de calor corregida en Btu/Hr.

Secciones térmicas	Calor Qj a ser transferido en todo el molde (Btu/Hr)	Calor Qj a ser transferido a través de cada componente del molde (Btu/Hr)			
		Placa estacionaria	Placa móvil	Núcleo	Pistón
Total	18,98	7,01	6,76	-0,57	5,78

Fuente: Autor.

Posteriormente, se determinó el área superficial de cada uno de los componentes (Tabla 13), para así convertir estos valores a pulgadas cuadradas y obtener los resultados de la Tabla 23, de esta manera se logra encontrar el segundo punto del nomograma (numero 2).

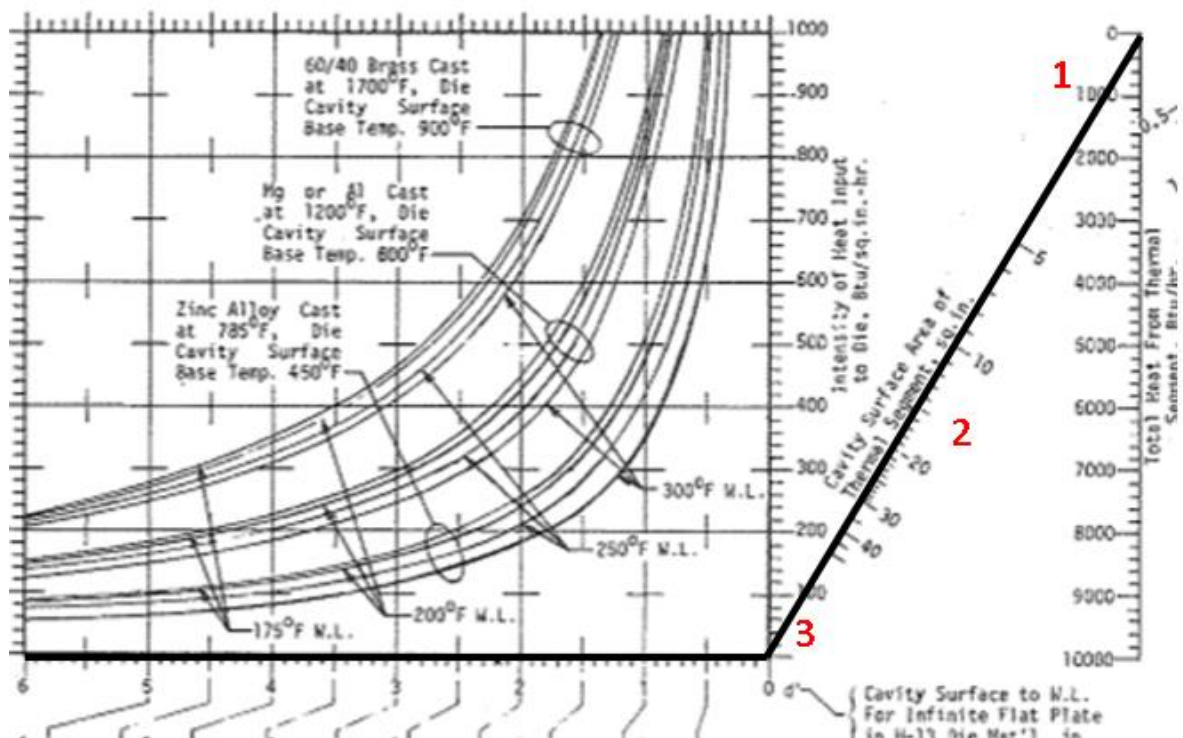
Tabla 23. Valores de área superficial en in².

Secciones térmicas	Área superficial total (in ²)	Área de cada componente del molde (in ²)			
		Placa estacionaria	Placa móvil	Núcleo	Pistón
Total	82,05	39,36	38,47	1,17	3,04

Fuente: Autor.

Luego de haber realizado esto, se determinó cuánto calor debe ser retirado por los canales de refrigeración para la placa estacionaria, para lo que fue necesario unir con una línea el calor Qj transferido (7,01 Btu/Hr) y el área superficial total (39,36 in²) para proyectar dicha línea en el nomograma y obtener como resultado la Figura 52.

Figura 52. Nomograma para el álabe.



Fuente: Autor.

De la figura anterior se puede observar que luego de haber proyectado la línea hasta que cruzara con el eje vertical que corresponde a la intensidad de calor ingresado en la cavidad (punto 3) se determina que este valor es prácticamente 0, por lo tanto se concluye que no es necesario realizar enfriamiento con agua [8].