



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“DISEÑO DE UN SISTEMA DE ALIMENTACIÓN PARA UNA
PIEZA DE ACERO EMPLEANDO UN SOFTWARE CFD.”**

T E S I S

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

P R E S E N T A: JOSÉ HIRAM GÓMEZ GARCÍA



MÉXICO, D.F.

2014.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: IQM. Eusebio Cándido Atlatenco Tlapanco.

VOCAL: Dr. Carlos González Rivera.

SECRETARIO: Dr. Marco Aurelio Ramírez Argaez.

1er. SUPLENTE: M en I. Adrián Manuel Amaro Villeda.

2° SUPLENTE: M en I. Agustín Gerardo Ruíz Tamayo.

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: LABORATORIO DE SOLIDIFICACIÓN Y SIMULACIÓN, DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA, FACULTAD DE QUÍMICA, CONJUNTO D-E.

ASESOR DEL TEMA:

DR. CARLOS GONZÁLEZ RIVERA.

SUPERVISOR TÉCNICO:

M EN I. AGUSTÍN GERARDO RUIZ TAMAYO.

SUSTENTANTE:

JOSÉ HIRAM GÓMEZ GARCÍA.

ÍNDICE DE CONTENIDO.

RESUMEN.....	6
OBJETIVOS.....	8
CAPITULO 1. SISTEMAS DE COLADA.....	9
1.1 Sistemas presurizados y no presurizados.....	10
1.2 Principios de solidificación.....	12
1.2.1 Solidificación direccional y progresiva.....	12
1.2.2 Contracción por solidificación.....	14
1.2.3 Defectos por contracción.....	15
1.2.4 Rangos de solidificación.....	16
1.3 Interacciones de la solidificación dentro de un molde.....	18
1.3.1 Clasificación de moldes para fundición.....	20
1.4 Sistemas de alimentación.....	22
1.4.1 Criterios para la implementación de un sistema de alimentación en casos específicos.....	23
1.4.2 Mecanismos de alimentación.....	24
1.4.3 Reglas básicas de la alimentación metálica.....	27
1.5 Ecuaciones de transporte durante la solidificación.....	28
1.5.1 Regla de los módulos (Regla de Chvorinov).....	32
1.5.2 Regla de las contracciones.....	42
1.5.3 Regla de los radios de acción.....	43
CAPÍTULO 2. METODOLOGIA DE CÁLCULO PARA UN SISTEMA DE COLADA.....	46
2.1 Consideraciones en el desarrollo de un sistema de colada.....	54
2.1.1 Requerimiento de la velocidad crítica.....	54
2.3 Determinación de los componentes de un sistema de colada.....	56
2.3.1 Bajada.....	56
2.3.2 Unión bajada-corredor.....	57

2.3.3 Radio de Vuelta.....	58
2.3.4 Corredor.....	58
2.3.5 Ataques.....	60
2.3.6 Ángulos recomendados.....	60
CAPITULO 3. CALCULO DEL SISTEMA DE COLADA Y ALIMENTACION DE LA PIEZA BAJO ESTUDIO.....	65
3.1 Determinación de los módulos de solidificación.....	66
3.2 Obtención del módulo del alimentador.....	69
3.3 Ubicación del alimentador.....	70
3.4 Ubicación del cuello del alimentador.....	71
3.6. Cumplimento de la regla de las contracciones.....	73
3.7 Cálculo de la altura metalostática en base a la ubicación de la pieza en el molde.....	74
3.8 Cálculo del tiempo de solidificación.....	75
3.9 Cálculo del área de estrangulamiento (parte inferior de la bajada).....	75
3.10 Diseño de la bajada empleando un ángulo de salida de 4.5 grados.....	77
3.11 Cálculo del área transversal del corredor.....	78
3.12 Cálculo del área transversal de los ataques.....	78
3.13 Diseño de la unión bajada-corredor.....	79
CAPITULO 4. DIGITALIZACIÓN DE LA PIEZA PROBLEMA EN EL SOFTWARE SOLID WORKS 2010 E INTRODUCCIÓN AL SOFTWARE PROCAST.....	80
4.1 Generación del sistema de colada y alimentación en el software CAD Solid Works.....	80
4.2 Generalidades y usos del software ProCAST.....	88
4.2.1 Generalidades del software ProCAST.....	89
4.2.2 Características de evaluación de ProCAST.....	94
4.2.2.1 Velocidad del fluido.....	95
4.2.2.2 Presión de llenado.....	96
4.2.2.3 Tiempo de llenado.....	96
4.2.2.4 Fracción sólida.....	99
4.2.2.5 Tiempo de solidificación.....	99
4.2.2.6 Detección de defectos por contracción.....	100

CAPITULO 5. CASOS DE ESTUDIO Y RESULTADOS.....	101
5.1 Casos de estudio.	101
5.2 Análisis de resultado para los casos de estudio.	105
CONCLUSIONES.....	121
BLOGRAFÍA.....	122
ANEXO I. INDICES INFORMATIVOS	123

RESUMEN.

La solidificación es una parte inherente de la fundición y de un proceso de colada. Durante la solidificación se establece la microestructura de una pieza metálica que aporta las propiedades del comportamiento del material generado. Es por eso que la solidificación es un tema importante a tratar ya que es una ciencia que permite el desarrollo de la fundición y de los procesos que esta conlleva.

Con los avances de la tecnología y la aplicación de software especializado, en la actualidad se pretende que los sistemas de colada y sistemas de alimentación para piezas metálicas producidas por fundición presenten en lo posible, un margen de error nulo; es decir, piezas sin defecto alguno, esto debido al establecimiento de criterios de control de calidad más estrictos por parte de la industria automotriz y aeroespacial principalmente.

Un objetivo directo del empleo de software para simular el llenado y la solidificación de piezas de fundición, es la producción a gran escala de componentes metálicos anulando los defectos y eliminando el sistema “prueba y error” que se ha manejado por muchos años en muchas empresas fundidoras.

Esto se logra gracias a la simulación de piezas coladas antes de realizar las pruebas físicas, proporcionando todas las variables posibles a un programa computacional que revelará las posibles respuestas o productos que se pueden generar por parte del sistema de colada y las condiciones externas que gobiernan la atmósfera beneficiando la producción y partiendo de un punto de producción con mayores probabilidades de éxito.

Sin embargo las predicciones de estas simulaciones tienen limitaciones y errores y se requiere de una interpretación por parte de ingenieros con experiencia en fundición para proponer las modificaciones pertinentes para lograr, generalmente después de varias pruebas, una pieza libre de defectos por lo que todavía depende del ingeniero de fundición el éxito o fracaso de elaboración de una pieza nueva.

El diseño de un sistema de alimentación requiere de una metodología que gira en torno al respeto de tres reglas de alimentación que son la regla de los módulos, la regla de las contracciones y la regla de las zonas de acción. El diseño adecuado del sistema de alimentación puede evitar la presencia de defectos por contracción en piezas de aleaciones con rango corto de solidificación, como los aceros de baja aleación.

Por otra parte el diseño del sistema de colada también implica la aplicación de una metodología que busca que la impresión de la pieza, provista de su sistema de alimentación, se realice en el tiempo requerido de modo tal que se promueva un llenado equilibrado la pieza se minimice la turbulencia para evitar arrastres de partículas del molde y evitando tiempos excesivos de exposición del material de moldeo a la radiación del metal líquido ascendente que puedan causar desprendimientos y defectos en la pieza

En este trabajo se diseñó y desarrolló el sistema de alimentación y el sistema de colada para una pieza prototipo de acero colada en un molde de óxido de circonio empleando el tipo de software que cada vez es más común ver que se emplea en las fundiciones sobre todo en las grandes fundiciones del mundo. Lo anterior se hizo con el propósito de corroborar si el seguimiento de las metodologías recomendadas para el cálculo de los sistemas de alimentación y de colada da lugar a la obtención de piezas sanas, de acuerdo con las predicciones de un software CFD ampliamente utilizado en fundición.

También se exploraron las consecuencias de no seguir las metodologías mencionadas sobre la presencia o ausencia de defectos en las piezas obtenidas.

Se elaboró el modelo tridimensional digitalizado del conjunto sistemas de alimentación y de colada y de la pieza con la ayuda del software de diseño asistido por computadora (CAD, Computer Aided Design) Solid Works 2010. El proceso de llenado del molde que contenía a la pieza prototipo así como su enfriamiento, solidificación y formación de defectos por contracción fue simulado introduciendo los modelos digitalizados en el programa especializado ProCAST, con el propósito de explorar las condiciones que permiten una mayor posibilidad de obtención de una pieza sana.

Los resultados obtenidos sugieren que el empleo de las metodologías mostradas en este trabajo promueven la obtención de piezas libres de defectos por contracción y que la violación de las reglas de alimentación puede traducirse en la presencia de defectos y en el rechazo de la pieza.

OBJETIVOS.

Los propósitos que tiene este trabajo para su estudio son:

1. Realizar, mediante el empleo de software CFD, la simulación del llenado, solidificación y formación de rechupes de una pieza simple de acero colado en molde de arena de zirconio y provisto de un sistema de alimentación diseñado para cumplir las reglas básicas de alimentación con el fin último de establecer si la simulación predice la obtención de una pieza sana.
2. Evaluar el impacto de la ausencia de sistema de alimentación o de un sistema mal diseñado sobre las predicciones de la presencia de defectos por contracción en los casos bajo estudio.
3. Explorar el efecto de la temperatura de colada sobre la efectividad del mismo en la prevención de la aparición de defectos por contracción.

CAPITULO 1. SISTEMAS DE COLADA

En la antigüedad se relacionaba a la metalurgia con algo mágico y místico, que después de convirtió en un arte, pasó por una tecnología y ahora resulta una ciencia. Muchos de los procesos que involucran a la fundición se encuentran en la naturaleza y los demás se encuentran implícitos en las matemáticas, caso que no resulta fácil de comprender en muchas ocasiones y sólo se describe lo que se conoce a través de modelos matemáticos.

Un sistema de colada está definido como un conjunto de ductos cuya función es permitir la introducción del metal proveniente de la olla de vaciado y conducirlo desde el exterior hasta la cavidad del molde (pieza) para llenar la impresión deseada, en donde el metal líquido debe de ir a una cierta presión, velocidad y flujo para disminuir la turbulencia, además de evitar la erosión de la arena, para facilitar el llenado de la cavidad del molde sin la pérdida de temperatura excesiva, garantizando, junto con el sistema de alimentación que sean obtenidas con las características requeridas y al menor costo.

En la mayor parte de los casos se utiliza un sistema de colada que distribuye el metal líquido proveniente de la olla de vaciado hacia las zonas seleccionadas para que el metal ingrese dentro de la impresión de la pieza. Típicamente, el metal es vaciado en una copa de colada para minimizar la turbulencia del chorro proveniente de la olla de vaciado, y de ahí el metal líquido ingresa a una cavidad vertical con forma cónica, llamado bajada que desciende a un nivel requerido, generalmente la línea de partición del molde. La entrada del metal líquido puede ser directamente a la pieza o bien a uno o más alimentadores. En adición al sistema de colada, a menudo se incorporan dispositivos para la separación de inclusiones no metálicas, llamadas trampas de escoria que en este trabajo no se mencionarán debido a la temática abordada en el escrito.

La tendencia a que se erosione el molde durante la colada es debido a la presencia de un flujo turbulento. En un flujo turbulento, aunque la masa de un líquido puede tener una dirección resultante, hay variaciones en la dirección y velocidad que alcanza valores críticos para la combinación particular de las propiedades del metal y las dimensiones del molde.

Para diseñar un sistema de colada se debe establecer la geometría de sus componentes, así como las dimensiones de estos, esto para que se pueda introducir la cantidad requerida de metal líquido en un cierto tiempo establecido. Esto con la finalidad de cumplir con ciertos propósitos:

- El tiempo de llenado debe ser suficiente para evitar la solidificación prematura del metal y como resultado de este fenómeno, conseguir un llenado incompleto del molde y otros defectos asociados a una exposición prolongada del material de moldeo a la radiación del metal.
- El atrapamiento de gases en el metal líquido es un impedimento para las condiciones de diseño, por la identificación de zonas de baja presión impidiendo la aspiración para el llenado.
- Evitar o limitar la entrada de escoria en lo mayor posible y establecer una técnica de desescorificación.
- Optimizar el rendimiento de metal en la relación pieza/sistema de colada, tratando de diseñar con la menor longitud posible a los componentes del sistema, garantizando la sanidad de la pieza.
- Optimizar los costos de remoción y acabado final de la pieza.

En general, en un sistema de colada el flujo es controlado por el área de estrangulamiento y en función su ubicación, es por eso que se puede hablar de sistemas presurizados y no presurizados.

1.1 Sistemas presurizados y no presurizados.

En un sistema de colada se le conoce al área de estrangulación como el regulador de la velocidad de flujo metálico y es el área transversal menor dentro del sistema, es decir, el área transversal al flujo más pequeño, esto se asocia con una relación de colada que se describe como *bajada: corredor: ataque*, o simplemente las áreas transversales totales de la bajada, corredores y ataques ($A_B : A_C : A_A$) donde estas se encuentran en función de la aleación a fabricar y las especificaciones que demande. De acuerdo a la relación de

colada, los sistemas de colada se clasifican en: Sistemas presurizados y Sistemas no presurizados.

1.1.1 Sistemas presurizados.

En un sistema presurizado el área transversal menor se localiza en los ataques, esto permite separar la escoria, óxidos, arena, etc., antes de llegar a los ataques. Este sistema, provoca que el flujo de metal entre a alta velocidad a la cavidad de la pieza, resultando gran turbulencia y erosión dentro de la cavidad. En este tipo de sistema se debe mantener una presión del flujo sobre los ataques mediante el control del flujo por restricción del fondo de la bajada; esto se puede lograr teniendo $A_B > A_C = A_A$ o $A_B < A_C > A_A$; en este caso, el metal líquido llena completamente el sistema, incluida la bajada.

Las relaciones típicas de un sistema presurizado son: 4:4:1 y 2:3:1, por lo que el área del ataque controla la entrada del metal líquido.

1.1.2 Sistemas no presurizados.

En un sistema no presurizado el área transversal menor se localiza en la bajada, la cual controla la velocidad del flujo, pretendiendo minimizar la turbulencia y la aspiración de gases en la cavidad del molde. En estos sistemas, los corredores y los ataques se encuentran localizados en el *drag* y la pieza en el *cope*, y la velocidad del flujo del metal decrece a partir de los corredores, ya que el área transversal crece, manteniéndose así hasta los ataques, de acuerdo a la relación de colada $A_B < A_C = A_A$.

Las relaciones de colada más comunes en un sistema no presurizado son: 1:2:4, 1:4:4 y $1:\sqrt{H}:\sqrt{H}$, donde H se refiere a la altura metalostática efectiva en decímetros. La aplicación del principio de continuidad demuestra que la velocidad puede ser reducida en los corredores y en los ataques y por consiguiente minimizar la turbulencia y la erosión del molde.

Algunos ejemplos típicos de relaciones de colada son: para el acero [1:2:1.5 o 1:3:3] para el hierro gris [1:4:4] para hierro dúctil [4:8:3] para aluminios [1:2:4].

Trabajos recientes relacionados con el diseño de sistemas de colada se enfocan principalmente en la simulación del flujo del metal líquido dentro del sistema de colada y la forma en que es llenada la pieza realizando diferentes modificaciones en el sistema de colada, estudiando la hidrodinámica del fluido. Estos trabajos concluyen que si se diseña un buen sistema de colada, se obtendrán piezas económicas y de alta calidad.

Los requisitos que debe cumplir un sistema de colada para que considere de buena calidad, son:

1. Economía del tamaño. Un sistema ligero aumenta la producción, puede ayudar también a producir más piezas en un molde de tamaño dado: 1:1:1.

2. El llenado del molde a la velocidad requerida. Al diseñar el sistema de colada con las propuestas actuales, se asegura por completo que la velocidad del metal en los ataques se mantenga abajo del valor crítico, eliminando el peligro de la formación de flujos turbulentos y evitando el llenado incompleto.

3. La entrada solamente del metal líquido en la cavidad de molde, es decir, la cavidad del molde está libre de fases tales como escoria, óxido, y arena. Sin embargo, en la mayoría de los casos no se puede eliminar la entrada de gases.

Como ya se ha mencionado anteriormente, en el diseño de sistemas de colada, se busca minimizar la turbulencia en el metal líquido al entrar al sistema de colada y a la pieza fabricada. A pesar de todos los estudios realizados, este requisito no se puede cumplir en su totalidad. Es conocido que el casi 80 % de los defectos de una pieza obtenida por colada, son provocados por los flujos turbulentos.

1.2 Principios de solidificación.

1.2.1 Solidificación direccional y progresiva.

La solidificación de una pieza comienza cuando el metal líquido es vertido dentro del molde; así el enfriamiento tendrá origen a partir de la frontera física hacia el interior de la pieza metálica recién formada. Cuando la solidificación se inicia en las secciones del molde más lejanas de la fuente del nuevo metal fundido y se mueve uniformemente en la dirección de aquella fuente se dice que se tiene una solidificación direccional. Así, en el

borde de la pieza, donde hay una mayor área superficial que permite una transferencia de calor más severa hacia el molde, la rapidez de solidificación será mayor.

En este caso se implementa un recipiente que surte metal caliente para satisfacer la contracción térmica de la pieza. A este implemento se le conoce como alimentador y tiene gran importancia en la fundición porque provee mayor calor, y donde la transferencia de calor al molde se reduce en el ángulo interno de la unión alimentador/pieza, la rapidez de formación de metal sólido en la intercara metal líquido- molde será menor. Esta combinación del efecto del borde de la pieza y el efecto del alimentador promoverá este tipo de solidificación.

Por otro lado, cuando la solidificación comienza por las paredes laterales del molde y progresa más o menos igualmente hacia el centro, se le llama solidificación progresiva. Si las paredes paralelas que solidifican progresivamente se comienzan a encontrar en el centro, el movimiento del metal líquido que es alimentado se verá interrumpido o será restringido culminando en una contracción o rechupe en el centro de la pieza debido a la obstrucción del ataque pieza-alimentador en el sistema de colada.

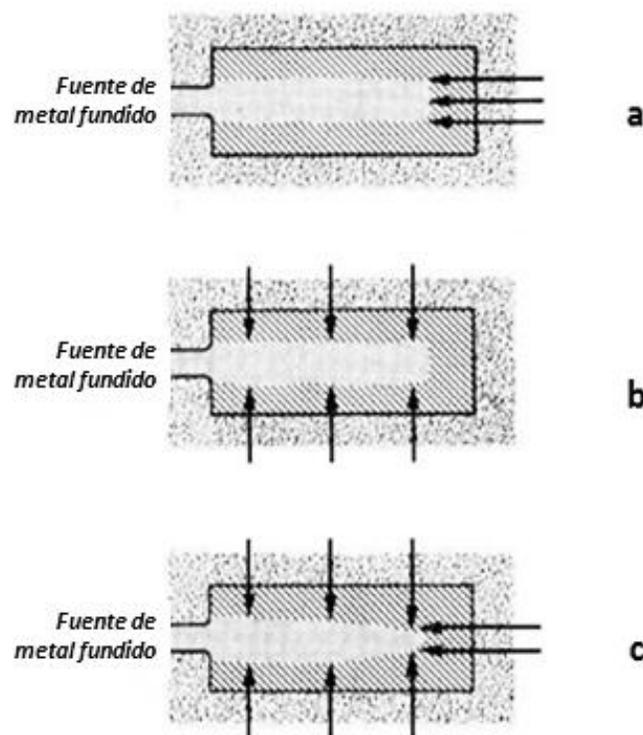


Figura 1.1. Diferentes tipos de solidificación: a) direccional, b) progresiva, y c) ambas.

1.2.2 Contracción por solidificación.

Durante el proceso de fundición la fase líquida en el horno ocupa un volumen más considerable que en la solidificación, que es eventualmente producida dando origen a un número de problemas para el fundidor. Son tres los diferentes tipos de contracciones que se originan en el momento del enfriamiento del metal desde el estado líquido hasta el estado sólido. Lo anterior se ilustra en la figura 1.2.

1.2.2.1. Contracción líquida. Al momento de que la temperatura se reduce, la primera contracción se establece en el estado líquido, esta es la contracción térmica normal observada tal como un termómetro de mercurio al momento de enfriarse: el volumen del líquido reduce casi linealmente con el descenso de temperatura, así el metal líquido sufre un aumento de densidad generando una contracción térmica dando principio a la generación de porosidad que no es problema, debido al llenado del molde por parte de un alimentador.

1.2.2.2. Contracción por solidificación. Es el problema más significativo para el caso de estudio; esta contracción ocurre en el punto de enfriamiento, donde el metal se empieza a solidificar debido a la mayor densidad del sólido comparada con la del líquido. Este tipo de contracción genera un número de problemas los cuales son: i) el requerimiento de un alimentador para permitir el paso de metal caliente a la pieza que se contraiga; y ii) porosidad por contracción, el cual es el resultado de la falla del alimentador al no operar efectivamente. Este tipo de contracciones generalmente produce errores de producción del 3.2% para los aceros y aumenta a 7.4% en los aluminios.

1.2.2.3. Contracción sólida. Este tipo de problemas es estudiado por las personas que generan los sistemas de colada al momento de calcular correctamente las dimensiones para que todo el metal sea introducido al molde antes de que solidifiquen los corredores, o los ataques se vean obstruidos. Los problemas que se encuentran en la contracción sólida se relacionan directamente con las propiedades físicas del material debido a una cantidad de esfuerzos plásticos que ocurren durante las contracciones anteriores.

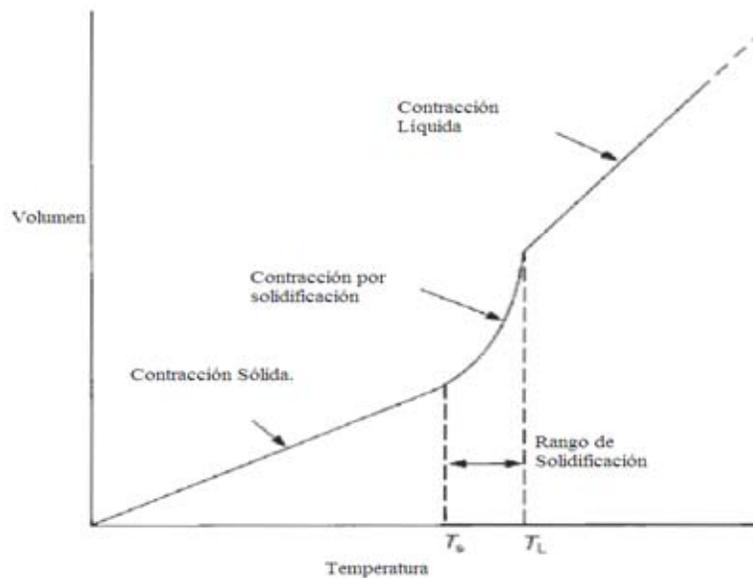


Figura 1.2. Ilustración esquemática de los tres regímenes de contracción: líquida, por solidificación y sólida.

1.2.3 Defectos por contracción.

La calidad de una pieza metálica producida por fundición está en función de la continuidad y control del flujo de metal que alimenta el déficit de masa que resulta de la contracción por solidificación. En la figura 1.3 se muestran los diferentes defectos ocasionados por la contracción en las diferentes etapas del metal al enfriarse.

Si este problema de alimentación no es resuelto se producirán defectos por contracción, estos pueden ser internos o externos. Los defectos por contracción que son externos (también conocidos como rechupes) son consecuencia de la contracción del metal al enfriarse desde el estado líquido durante la solidificación. Los defectos de contracción cerrados se correlacionan con la nucleación de poros y con la presencia de bicapas, término generado como resultado de los estudios de John Campbell en el estudio de la fundición de metales. Las bicapas de óxido son defectos provocados por el atrapamiento o encapsulamiento de la escoria formada durante la colada. En resumen, las cavidades por contracción son controladas solo por la contracción del metal mientras que la porosidad es controlada por contracción metálica, nucleación de poros y crecimiento de bicapas.

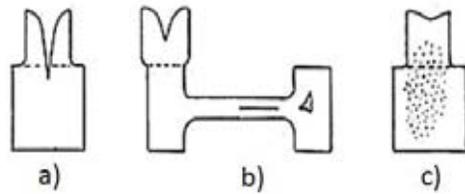


Figura 1.3. Definición de los defectos por contracción. a) Rechufe primario abierto; b) Rechufe interno o ciego; c) microporosidades o microrrechufes.

1.2.4 Rangos de solidificación.

El objetivo de conseguir una pieza sin defectos por contracción es la promoción de una solidificación direccional y no una progresiva, esto depende del tipo de solidificación que se presente en la aleación correspondiente. El ancho de la zona blanda, donde están presentes simultáneamente las fases líquida y sólida, es un factor importante durante la solidificación. Esta zona se describe en función de la diferencia de temperatura de liquidus y solidus, y es conocida como rango de solidificación, lo cual se describe como:

$$\text{Rango de solidificación} = T_L - T_S \quad (1)$$

Existen tres tipos de clasificación de las aleaciones con respecto a su rango de solidificación que se muestran en la figura 1.4, desde la temperatura donde la solidificación comienza hasta donde la última gota líquida se transforma en sólido. Cabe mencionar que este factor no es exacto, simplemente una aproximación para resolución de problemas. Los rangos que se consideran para los diferentes tipos de aleaciones son:

- De rango corto: intervalo liquidus-solidus menor a 50°C
- De rango intermedio: intervalo va desde 50°C hasta 100°C
- De rango largo: el intervalo liquidus/solidus es mayor a 110°C

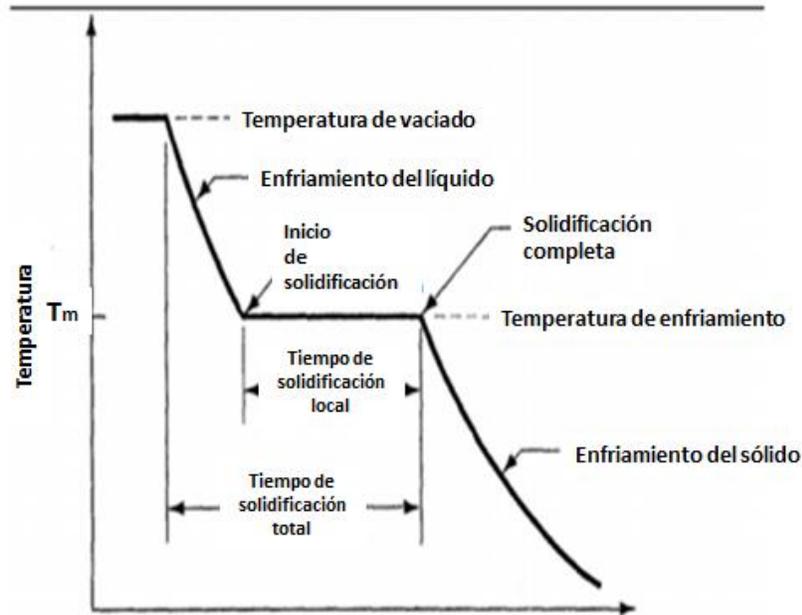


Figura 1.4. Curva de enfriamiento para un metal puro durante su enfriamiento y solidificación.

Los sistemas de alimentación están enfocados a evitar defectos por contracción en aleaciones de rango corto de solidificación. En los otros casos se aplican este u otros métodos.

Adicionalmente las aleaciones que presentan una solidificación equiaxial también pueden comenzar a solidificar a través del líquido, formando regiones pastosas que consisten en islas de sólido con microestructura equiaxial. Estas islas pueden bloquear las vías de suministro de metal líquido provocando que estas aleaciones sean difíciles de alimentar. Para contrarrestar esta tendencia las regiones que solidifiquen de manera equiaxial deben de ser diseñadas para que posean gradientes térmicos pequeños, esto es, que sean térmicamente neutras.

De esta manera la masa térmica en esta región debe de ser esparcida y distribuida uniformemente a través de la región. Esto provocará que la contracción sea distribuida como poros microscópicos en toda la pieza. Aunque la idea de tener poros microscópicos en la pieza es desconcertante, el efecto sobre las propiedades mecánicas es minimizado por el tamaño pequeño y por la distribución uniforme de los poros.

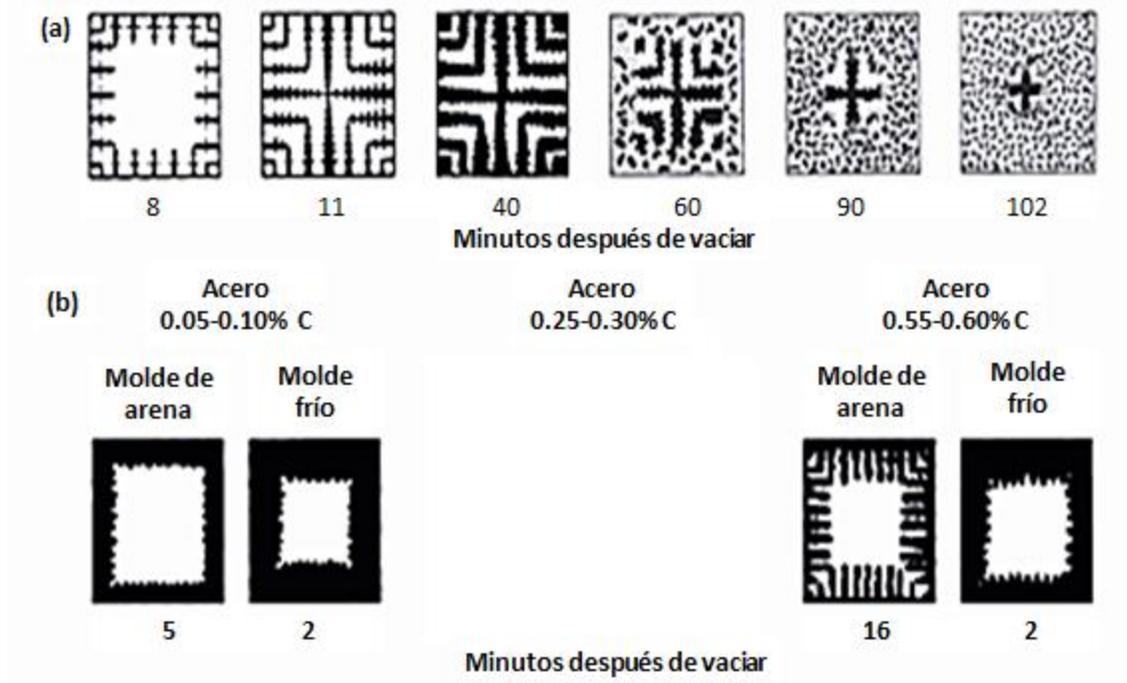


Figura 1.5. a) Patrones de solidificación para el hierro fundido gris en una pieza cuadrada de 180mm (7pulg). Nótese que después de 11 minutos de enfriamiento, las dendritas se alcanzan las unas a las otras, pero la fundición aún está blanda en su totalidad. Se necesitan aproximadamente dos horas para que esta pieza solidifique completamente. b) Solidificación de aceros al carbono en moldes de arena y metal. Nótese la diferencia en los patrones de solidificación conforme se va incrementando el contenido de carbono.

1.3 Interacciones de la solidificación dentro de un molde.

En las aleaciones la solidificación se inicia cuando la temperatura se reduce por debajo de la temperatura liquidus T_L y es completa cuando alcanza la temperatura solidus T_S . Existen diferentes tipos de solidificación dependiendo de las propiedades y aplicaciones de la aleación.

Los moldes de arena son muy comunes en la fundición ya que poseen características refractarias, ejemplos de estos materiales utilizados son el yeso, zirconio granulado, mullita, arena sílica, etc. En esta etapa el metal cambia de estado líquido a estado sólido,

y se desarrolla una estructura junto con la formación de poros y la evolución de gases, pero estos últimos dos fenómenos no se describirán en esta sección

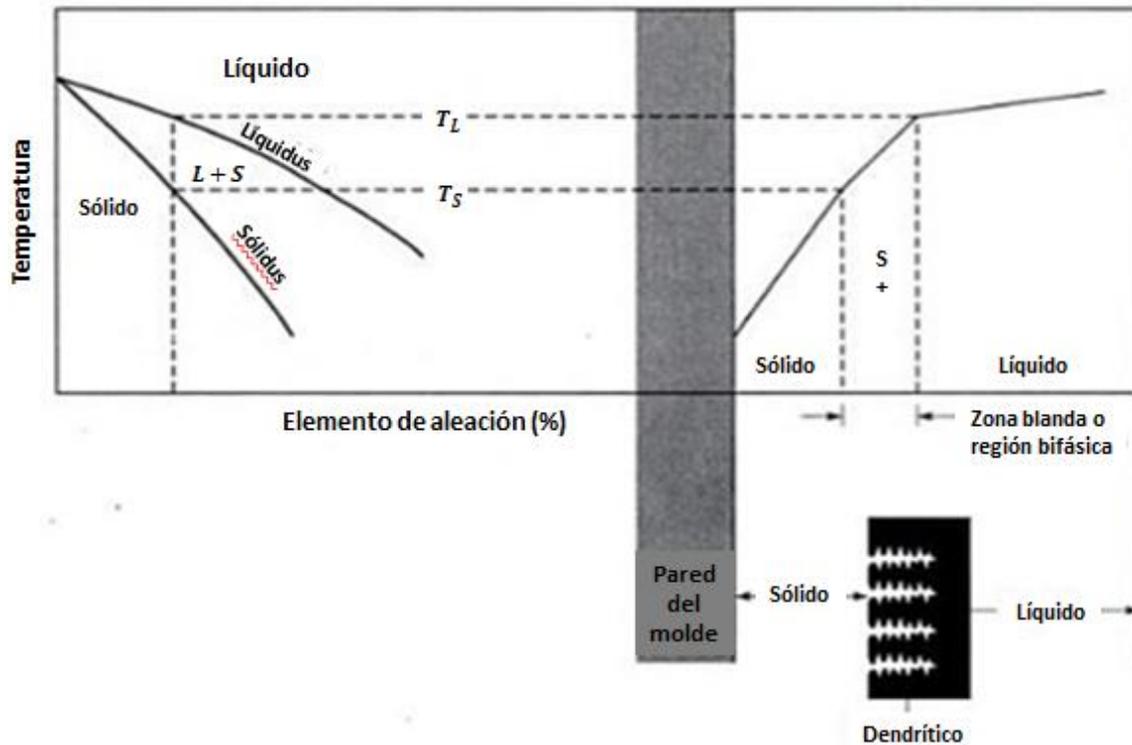


Figura 1.6. Descripción esquemática de la solidificación de una aleación y de la distribución de la temperatura en el metal en solidificación.

Cuando el metal fundido entra al molde, se puede generar gran turbulencia. Una frenética actividad se acumula en el instante de la formación de una fundición: suceden fenómenos de presurización, gasificación explosiones, desintegración del molde entre otros. Muchos esfuerzos se han realizado para garantizar que el molde acepte a la pieza problema bajo un apropiado control.

Sólo aquellos aspectos de interacción con el molde se consideran como introductores de defectos o alguna influencia de las propiedades del material en la fundición. Existen diferentes tipos de moldes para la fundición de piezas metálicas, los cuales al ser de distinta naturaleza heredan diferentes propiedades y problemas a la hora de la solidificación. Algunos de estos se trataran en los siguientes párrafos.

1.3.1 Clasificación de moldes para fundición.

Aunque todos los moldes tengan la misma función, sus características se pueden ver afectadas directamente con el tipo de material o la fabricación de este. He aquí algunos tipos o clasificación de los moldes según sus propiedades.

- Moldes inertes

Muy pocos moldes son realmente inertes al momento de que interaccionan con el metal líquido, sin embargo algunos moldes se encuentran muy cerca de serlo. Esto resulta cierto específicamente a bajas temperaturas.

Para el caso del hierro y el acero, el molde permanente usado por gravedad en la colada se baña con un óxido de aluminio para evitar que reaccionen entre sí el molde y el producto, además existe una oxidación de la superficie debido a la interacción con la atmósfera, aunque no se generan importantes interacciones químicas. Es un beneficio para los moldes metálicos, que en muchas ocasiones se encuentra sobrevalorado ya que el metal líquido sufre fatiga térmica usualmente después de muchas coladas. Este límite de vida puede ser una importante amenaza a la superficie metálica o en el tiempo de vida de la fundición, pues ocasionalmente resulta en una falla catastrófica con efectos negativos para la producción porque toma tiempo reemplazar el metal líquido para comenzar nuevamente.

Los moldes base carbón son utilizados para las aleaciones de titanio en el vacío. La oxidación del molde es así reducida, aunque la contaminación de la superficie de la fundición de titanio es severa, promoviendo la formación de una capa externa de la aleación donde una cubierta “ α ” se estabiliza. Esta capa superficial es conocida en las fundiciones de titanio como envoltura alfa. Y es removida generalmente por maquinado o ataque químico.

- Moldes agregados.

Los moldes de arena son fabricados casi siempre de arena sílica, aparte de proveniente de numerosos lugares del planeta donde la sílica fue difícil de obtener tal como Escandinavia donde se utiliza olivina. Otras fundidoras han usado cromita y zirconio por sus útiles propiedades físicas. Sin embargo recientemente los problemas con la sílica tradicional han llevado a construir moldes sintéticos o de algún otro mineral con propiedades similares.

Es por eso que se le llama “agregados” a este tipo de moldes más que moldes de arena. Así en moldes de arena o recubiertos con algún material, las interacciones entre las fases se incrementa en número y severidad al momento de un incremento en la temperatura:

- i) *Bajo punto de fusión:* Se refiere a las aleaciones de zinc las cuales alcanzan temperaturas apenas arriba de los 500°C en donde las reacciones químicas no son importantes.
- ii) *Aleaciones de Magnesio y Aluminio:* alcanzan comúnmente temperaturas de hasta 750°C. ellas reaccionan con el vapor de agua y otros orgánicos al producir óxidos sólidos e hidrogeno libre que se puede difundir en el metal líquido. Estas reacciones continúan por algún tiempo después de solidificar y durante el enfriamiento. La fuente de hidrógeno se vuelve importante para el crecimiento de poros que se localizan justo debajo de la superficie colada
- iii) *Aleaciones de Cobre:* Alcanzan los 1300°C y se llevan a cabo algunas reacciones importantes.
- iv) *Aleaciones de Hierro y Acero:* Tienen alcance de temperaturas de 1400 y 1600°C respectivamente y son especialmente reactivos de muchas formas.
- v) *Aleaciones de Titanio y Zirconio:* Son tan reactivos que resultan un problema en cualquier tipo de molde ya que como antes se mencionó forma una cubierta alfa con el carbono.

- Moldes abiertos a la atmósfera.

A la llegada del metal caliente dentro del molde se inicia una mezcla de gases de la superficie hacia el núcleo de la fundición. El aire originalmente presente en la cavidad diluye los primeros gases que entran y son expulsados hacia los alimentadores o hacia las aberturas disponibles o se puede difundir a través del cope. Subsecuentemente la composición del gas en el molde es relativamente constante.

El alto contenido de oxígeno y nitrógeno de la atmósfera en el caso de los moldes llenados con aluminio, simplemente reflejan el alto componente de aire residual (originalmente, por supuesto, en aproximadamente 20% de oxígeno y 80% de nitrógeno). La baja temperatura del metal entrante es obsoleta para generar suficiente gas y expandirlo hacia la atmósfera original. Esto se vuelve efectivo cuando se encuentran aleaciones de hierros y aceros.

1.4 Sistemas de alimentación.

Alimentación se refiere al proceso en el cual el metal líquido es suministrado a la pieza que se desea obtener libre de defectos producidos principalmente por la contracción causada por el enfriamiento de la pieza metálica, este proceso puede tomar tanto tiempo como sea necesario, pueden ser minutos hasta horas, dependiendo del tamaño de la pieza. Este es un proceso que resulta de la disminución de volumen del metal durante su enfriamiento y solidificación.

Resulta necesario distinguir entre un sistema de colada y un sistema de alimentación, ya que tienen dos funciones distintas; el primero abastece de metal líquido al molde que contiene a la pieza y sus sistemas, mientras que el segundo proporciona el metal líquido para alimentar la contracción líquida y de solidificación de la pieza para obtenerla libre de defectos por contracción.

1.4.1 Criterios para la implementación de un sistema de alimentación en casos específicos.

Al momento de producir una pieza por fundición en molde de arena surge la pregunta indispensable relacionada con la alimentación requerida al momento de la solidificación ¿Se necesita tener un sistema de alimentación? La respuesta puede ser contestada mediante diversos factores que pueden ser caracterizados a la toma de decisiones para este tipo de implementos.

Para garantizar el paso de metal extra para compensar la contracción por enfriamiento se provee un dispensador separado de una reserva metálica para compensar la contracción por solidificación y la formación de los llamados “rechupes”, defectos comunes en la solidificación metálica.

En ocasiones las razones para implementar o no un sistema de alimentación recaen directamente en el sistema de colada ya que funciona como un inhibidor de presión en el sistema durante el enfriamiento, mejorando las aleaciones no ferrosas. Una vez que se determina que el sistema de alimentación es necesario surge otra pregunta ¿Qué tan grande debe ser el alimentador requerido?

Para contestar las preguntas que surgen en la implementación de un alimentador, existe un conjunto de siete reglas para la colocación de dicho complemento:

- No se debe alimentar al menos que sea necesario. Existen diversos factores que pueden ser de ayuda para evitar un sistema de alimentación, la razón principal es el costo o la eficiencia de estos al momento de realizar una solidificación. (Láminas delgadas que no necesitan o que contienen menos material fundido que el mismo alimentador)
- El alimentador debe solidificar al mismo tiempo o después del sistema de colada. A esto se le conoce como el criterio de transferencia de calor de Chvorinov.
- El alimentador debe contener suficiente líquido para abastecer los requerimientos ocasionados por la contracción volumétrica. Conocido generalmente como el criterio de volumen.

- La unión entre el alimentador y la pieza no debe formar puntos calientes, por ejemplo tener un tiempo de enfriamiento mayor que el del alimentador o el mismo sistema de colada, ya que es una demanda para evitar los defectos por contracción.
- Debe existir una trayectoria que permita la alimentación en aquellas regiones que lo requieran.
- Debe existir suficiente diferencia de altura metalostática para que el material fluya en la dirección correcta.
- Debe existir suficiente altura metalostática en el sistema de alimentación para prevenir la formación de poros y demás defectos en la pieza metálica.

1.4.2 Mecanismos de alimentación.

Durante la solidificación de un sistema, el desenvolvimiento gradual y el crecimiento del sólido a menudo en forma de una masa de dendritas desorientadas presentan un incremento en las dificultades para el paso del líquido de alimentación. En efecto, como el líquido se enfría y se contrae en forma sólida, la presión en el líquido se ve disminuida, causando un incremento en la diferencia de presión entre el interior y el exterior de dicho sistema. La fuerza de la presión en el metal líquido que está al interior de la pieza puede caer suficiente para ser negativa.

La generación de tales diferenciales de presión provoca el transporte de fluido y también puede proveer la fuerza motriz para la iniciación y crecimiento de los defectos de volumen como porosidades y defectos superficiales provocando una baja en las propiedades debido a la capa de óxidos (bifilms).

Existen 5 mecanismos por los cuales la presión metalostática se puede reducir en un sistema de alimentación, por supuesto, no todos estos mecanismos funcionan al mismo tiempo y en todas las fundiciones. Un alimentador adecuado para uno o más de estos procesos eliminará la tensión en el líquido al momento de solidificar y así se reducir la posibilidad de la formación de defectos. Estos mecanismos fueron propuestos por John Campbell en 1969 y a la fecha resultan útiles para sistemas de colada específicos. Los

mecanismos se muestran en la figura 1.7 y se enuncian en orden de aparición al momento del enfriamiento en sistemas de alimentación abiertos y cerrados.

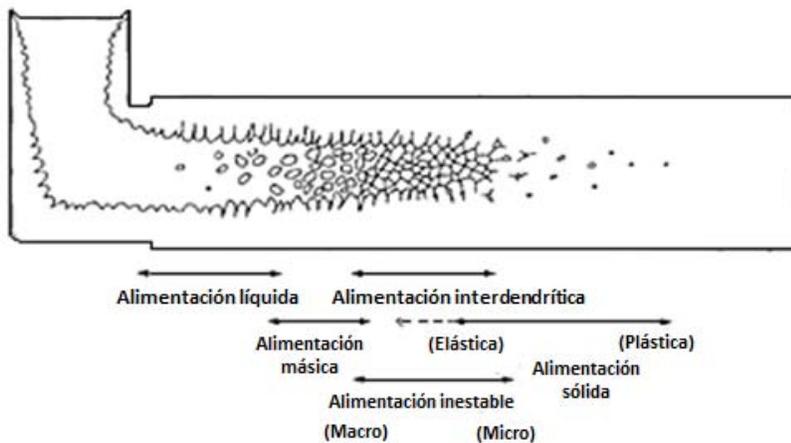


Figura 1.7. Representación esquemática de los cinco mecanismos en una solidificación metálica.

Existen diferentes tipos de alimentación durante un proceso de solidificación, en donde surgen características distintas una de la otra en cada proceso:

- Alimentación líquida.

Es el mecanismo más abierto en el proceso de alimentación y generalmente antecede a otras formas de alimentación. Esto se puede notar en materiales enfriados por capas (skin-freezing) en aleaciones con bajo rango de solidificación.

Una alimentación inadecuada puede ocurrir al momento de no calcular bien el volumen del alimentador. Así el líquido que fluye hacia el sistema se terminará antes de que la pieza solidifique y subsecuentemente solamente abastecerá aire. Dependiendo del modo de solidificación la porosidad resultante puede ser de dos formas:

- Las aleaciones enfriadas lentamente tendrán un frente de solidificación lenta que quizá resulte en una formación de poros extendidos a lo largo del alimentador hasta la pieza en toda su extensión.
- Las aleaciones con un rango largo de solidificación generarán una capa dendrítica superficial, y la alimentación líquida se transformará en este una alimentación interdendrítica. Un abastecimiento inadecuado como el presentado, por parte del alimentador el nivel líquido disminuirá evitando la

alimentación en las regiones más alejadas e incorporando aire para remplazarlo y definirá el grado de porosidad debida a la contracción en la pieza metálica.

- Alimentación másica.

Término adoptado por Baker en 1945 para resaltar el flujo de una pasta metálica que solidifica en un líquido residual. Este movimiento es detenido cuando la fracción de volumen del sólido se encuentra entre 0 y 50% dependiendo de la diferencia de presión del fluido y dependiendo de qué porcentaje dendrítico se encuentra libre de puntos de adhesión en la pared de la pieza colada. Sin embargo se puede observar que existen pequeñas cantidades de movimiento aun cuando se encuentra el 68% de sólido, el cual es un nivel en donde las dendritas inician enlaces ordenados.

- Alimentación interdendrítica.

Allen utilizó este término en 1932 para describir el flujo de líquido residual a través de la zona pastosa. Sin embargo podemos obtener un estimado del gradiente de presión involucrando simplemente la ecuación de Poiseuille que describe gradientes de presión dP/dx para que un fluido pase por efecto de capilaridad:

$$\frac{dP}{dx} = \frac{8v\eta}{\pi R^4} \quad (2)$$

Donde v es el volumen de flujo por segundo, η es la viscosidad y R es el radio de capilaridad. Es claro que sin ir más allá de la resistencia al flujo es completamente dependiente del tamaño de la capilaridad. Para un conjunto de N capilaridades tomando un modelo aproximado de la zona pastosa, el problema se reduce a:

$$\frac{dP}{dx} = \frac{8v\eta}{\pi R^4 N} \quad (3)$$

- Alimentación sólida.

En la última etapa del enfriamiento, es posible que algunas secciones generales del sistema de colada puedan ser aisladas del sistema de alimentación debido a un proceso prematuro de solidificación en una región interpuesta.

Debido a la solidificación interpuesta se desarrollará una elevada presión metalostática en el líquido atrapado, que puede generar películas encerradas y deformadas, arrastradas dentro de los flujos existentes para liberar presión interna.

Cuando la alimentación sólida se genera, la tensión del líquido se ve limitada por el avance plástico del sólido convirtiéndose en una función de la tensión residual y de la forma geométrica del sólido.

1.4.3 Reglas básicas de la alimentación metálica.

Para establecer un algoritmo de implementación de un sistema de alimentación, se formulan tres reglas básicas para todos los sistemas de alimentación.

1. Regla de los módulos de enfriamiento.

Esta regla engloba básicamente la importancia del dimensionamiento de un alimentador que permitan su solidificación únicamente después que ha terminado de solidificar la pieza de interés, para concentrar la contracción por solidificación en el alimentador obteniendo una pieza sin defectos o rechupes. Para tal efecto, esta regla establece que el módulo del alimentador deberá ser mayor al módulo de la pieza o sección de la pieza a la cual está conectado. ($M_a = 1.2M_p$)

Esta regla también se conoce como la Regla de Chvorinov y se estudiará a fondo más adelante.

2. Regla de las contracciones.

El volumen que deben poseer los alimentadores (V_a) debe ser mayor a la demanda del metal líquido requerida en la pieza obtenida del producto de un factor k' , que define si el alimentador es normal ($k'=6$) o con chaqueta exotérmica ($k'=2-4$) multiplicado por la contracción $r=R/100$ junto con el volumen de la pieza o sección de la pieza que alimenta.

3. Regla de los radios de acción.

El alimentador tendrá la función de abastecer metal líquido a toda la pieza, si se excede la distancia de alimentación la pieza contendrá porosidades en las zonas más alejadas del alimentador donde no se pudo cubrir la demanda de metal líquido.

1.5 Ecuaciones de transporte durante la solidificación.

El problema a resolver es describir matemáticamente la solidificación en un sistema de colada y asociar fenómenos tales como la macrosegregación y macrorechupe. Al construir un modelo es necesario primero entender la física asociada con la solidificación de la fundición. A macro escala la fundición es un sistema de dos fases compuestas de un sólido y un líquido. La nucleación y crecimiento de las fases son ignoradas en esta etapa.

La solidificación es considerada un proceso termodinámico constituido por:

- Difusión de especies y energía.
- Convección de masa y energía dirigida por convección natural y por la contracción en la solidificación.

En este estudio solo se llevara a cabo el balance de energía, y se aplicará a un metal cuando se encuentra solidificando en un molde de arena y la resistencia al flujo de calor la ejerce el mismo molde.

Como primera consideración se establece que el metal no sufre algún sobrecalentamiento y es vaciado sobre la superficie plana de un molde el cual posee muy poca difusividad térmica. Al metal líquido le lleva tiempo perder calor y solidificar, la velocidad de transferencia de calor está controlada por un número de resistencias descritas por Flemings (1974) y que se encuentran en el interior de la fundición, las cuales son:

- El metal líquido:
- El metal solidificado.
- La intercara metal- molde.
- El molde
- Los alrededores del molde.

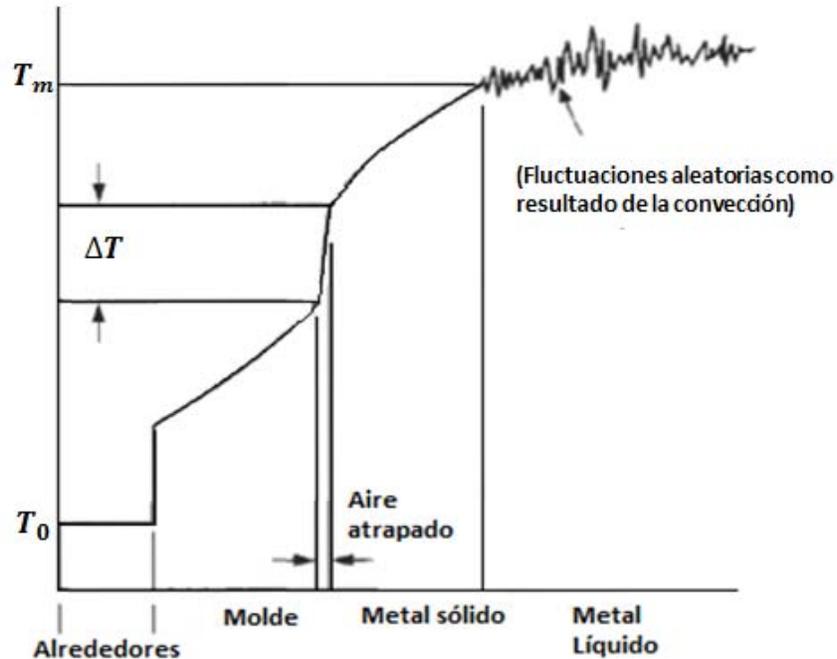


Figura 1.8. Perfil de temperatura durante el enfriamiento de una fundición en un molde. Se muestra el efecto de la resistencia térmica adicional que controla la velocidad de pérdida de calor.

Las resistencias se vuelven despreciables como un resultado de la convección forzada del seno del fluido durante el llenado del molde y la convección térmica durante el enfriamiento como se aprecia en la figura 1.8. Los gradientes de temperatura se pueden minimizar con el flujo turbulento y la mezcla de transportes de calor. Esto ocurre rápidamente desde el seno del fluido del líquido hasta que el calor es transportado fuera del centro de lingotes con gran longitud y que son controlados por difusión.

Para este caso, los moldes de arena no afectan en la solidificación, desde que el molde inicia el enfriamiento brusco hasta que la fundición ha solidificado dentro. Sin embargo existe un número de excepciones para esta regla general. Si se considera un metal líquido puro sin sobrecalentamiento y es vaciado sobre la pared de un molde donde

es nula la conducción de calor, entonces se generan demasiadas resistencias, donde se puede entender que la diferencia de temperaturas entre la superficie del metal donde ya casi se alcanza la temperatura de *solidus* T_s , es similar a la temperatura del metal en el interior del molde.

Por lo tanto durante el enfriamiento, la caída de la temperatura a través del metal solidificado es bajo y la intercara metal-molde se mantendrá a una temperatura constante, esto numéricamente se explica como sigue:

$$\frac{T-T_M}{T_0-T_M} = \text{erf} \frac{x}{2\sqrt{\alpha t}} \quad (4)$$

La cual es una solución para determinar la temperatura de un sólido semi infinito donde:

x es la distancia en el molde.

α es la difusividad térmica y se define más adelante.

T_0 es la temperatura inicial uniforme (generalmente es la temperatura ambiente).

Esta ecuación se utiliza para obtener la cantidad de calor que fluye hacia el molde y esta cantidad de calor debe igualar el calor latente que evoluciona durante la solidificación. Para usar esta ecuación se considera al molde lo suficientemente ancho para satisfacer la condición de frontera:

$$T(\infty, t) = T_0$$

Si esta condición se cumple, el resultado en la temperatura será el mismo, es decir, la temperatura del molde en el exterior no se verá afectada.

Para obtener el flux de calor, partiendo de la ecuación 4:

$$q|_{x=0} = -k \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} = \frac{k(T_M - T_0)}{\sqrt{\pi \alpha t}} \quad (5)$$

Tomando en cuenta que la difusividad térmica se expresa como $\alpha = k / \rho C_p$ la ecuación 5 queda expresada como:

$$q|_{x=0} = \frac{\sqrt{k\rho C_p}}{\sqrt{\pi t}} (T_M - T_0) \quad (6)$$

El producto $k\rho C_p$ representa a la difusividad térmica α y se le conoce como la habilidad del molde de absorber calor a una cierta razón.

La evolución del calor latente por unidad de área se describe como:

$$\rho' H_f \frac{dM}{dt} \quad (7)$$

Donde :

ρ' es la densidad del metal que solidifica

H_f es el calor latente de fusión del metal

M es el grosor de metal solidificado.

Así igualando la ecuación 6 con la ecuación 7 se encuentra la velocidad a la cual la intercara avanza hacia el líquido:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{(T_M - T_0)\sqrt{k\rho C_p}}{\rho' H_f \sqrt{\pi t}} \quad (8)$$

Si se toman los siguientes límites de integración la ecuación resultará:

$$M = 0 \quad \text{en } t = 0$$

$$M = M \quad \text{en } t = t$$

$$M = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{T_M - T_0}{\rho' H_f} \right) \sqrt{k\rho C_p} \sqrt{t} \quad (9)$$

Por lo tanto se puede ver que la cantidad de material solidificado depende de ciertas características del metal $\left(\frac{T_M - T_0}{\rho' H_f} \right)$ y de la difusividad de calor del molde ($k\rho C_p$).

Existen diferentes tipos de modelos para la predicción de defectos en la fundición, donde realizar este tipo de ecuaciones manualmente significa demasiadas horas de

trabajo. Es por eso que dependiendo de las suposiciones de la física del problema y los instrumentos utilizados para aproximar la predicción de defectos por contracción y se pueden catalogar como:

- Modelos térmicos: Resuelven ecuaciones de transporte de energía para identificar la última región solidificada o regiones donde el alimentador se ve restringido.
- Cálculo de modelos térmicos/volumétricos: Resuelven ecuaciones de transporte de energía y masa para predecir la posición de la superficie libre y la última región en solidificar.
- Modelos térmicos/ de fluidos: Resuelven ecuaciones de transporte de masa y energía para predecir la posición de la superficie libre y de las últimas regiones en solidificar.
- Modelos de transporte/ analisis de esfuerzos.
- Modelos de nucleación y crecimiento de vacancias por gas: Evaluación por computadora del crecimiento y nucleación cuando las dendritas se han formado en una línea coherente; el flujo líquido es descrito como un medio de paso para la formación de poros.

Estos modelos incluyen solamente el análisis de transporte de calor e ignoran el flujo y la importancia del gas, para esto se utiliza un modelo de diferencias finitas propuesto por Henzel y Kaverian en 1965, este representa la forma irregular de una pieza fundida y adaptada aun propósito general transitorio de un programa de transferencia de calor para encontrar el perfil de temperaturas, haciendo posible identificar la última región que solidifica (puntos calientes) en una fundición graficado por isoterma.

1.5.1 Regla de los módulos (Regla de Chvorinov).

Mejor conocida como la regla de Chvorinov la cual acepta que para una adecuada alimentación el ataque debe solidificar después de la pieza problema y consiste en comparar la temperatura final de solidificación T_M ataque y de la fundición. Esta temperatura final refiere directo al módulo de solidificación (velocidad del volumen de la superficie de enfriamiento, v/A), basado en un modelo de una sola dimensión de transporte de calor a través de la interfase molde-metal.

El enfriamiento en un molde de arena no es tan importante como la evaluación del tiempo de solidificación en formas metálicas complejas, aunque el molde influye en el enfriamiento y subsecuentemente también lo hace en el tiempo de solidificación de la pieza problema.

Como la zona calentada del molde es poco profunda, y la diferencia en el flujo de calor entre una pared plana del molde y una pared redondeada es baja, se despreciará el contorno debido que se visualizará que el área superficial del molde tiene una capacidad de absorber una cierta cantidad de calor en un tiempo determinado. Por lo que generalizaremos la ecuación 9 para todos los contornos, y para un área superficial conocida A, el molde absorberá una cierta cantidad de calor Q en un tiempo t. Numéricamente hablando:

$$Q = \int_0^t A q_{|x=0} dt = \frac{Ak(T_M - T_0)}{\sqrt{\pi\alpha}} \int_0^t \frac{dt}{\sqrt{t}} = \frac{2Ak(T_M - T_0)}{\sqrt{\pi\alpha}} \quad (10)$$

Si todo el calor latente de es extraído de la pieza, entonces se generará la solidificación de una pieza metálica. Esto se define como:

$$Q = \rho' V H_f \quad (11)$$

Las ecuaciones 10 y 11 se igualan para obtener el tiempo de solidificación para una pieza en términos de su razón volumen a superficie.

$$t = C \left(\frac{V}{A} \right)^2 \quad (12)$$

Donde:

$$C \equiv \frac{\pi}{4} \left(\frac{\rho' H_f}{T_M - T_0} \right)^2 \left(\frac{1}{k\rho C_p} \right) \quad (13)$$

La ecuación 12 es conocida como regla de Chvorinov y se denomina a C como constante de Chvorinov en la ecuación 13. La primera permite comparar los tiempos de solidificación para piezas de diferentes morfologías y tamaños. La relación funciona mejor para geometrías en las cuales el material de moldeo no se satura de calor, tales como en las

esquinas internas o en los corazones. El éxito de esta relación radica en que el material de moldeo absorba la misma cantidad de calor por unidad de área expuesta al metal.

El concepto de módulo de solidificación fue desarrollado por Wlodawer para realizar cálculos prácticos de alimentadores al eliminar la necesidad de calcular el tiempo de solidificación determinando simplemente los tiempos relativos de solidificación de la pieza y del alimentador simplificando la regla de Chvorinov a:

$$t \sim \frac{V_c}{A_c} \quad (14)$$

La razón volumen/área de la pieza se conoce como módulo de solidificación:

$$M_p = \frac{V_c}{A_c} \quad (15)$$

Donde V_c es el volumen de la pieza o sección y A_c es el área de transferencia de calor. El tiempo de solidificación del alimentador y de la pieza será proporcional a su módulo de solidificación, y si el módulo del alimentador, M_a es lo suficientemente grande, se cumplirá la regla de los módulos. Para cumplir la regla de los módulos, se debe cumplir la siguiente relación:

$$M_a = 1.2 * M_p \quad (16)$$

Para otras aleaciones, incluyendo varias aleaciones de aluminio y aleaciones base cobre, se cumplirá la regla de los módulos con la razón $M_a/M_p = 1.2:1$. Para los hierros grises y los hierros dúctiles, dependiendo del carbón equivalente, la razón M_a/M_p puede variar entre 0.8:1-1.2:1 ya que el alimentador solo proveerá de metal líquido durante algunos momentos durante la solidificación de la pieza.

Si se posee una pieza compleja se deberá seccionar en formas simples (prismas, codos. etc) y se calcula el módulo de cada pieza sección. Véase el ejemplo de la figura 1.9.

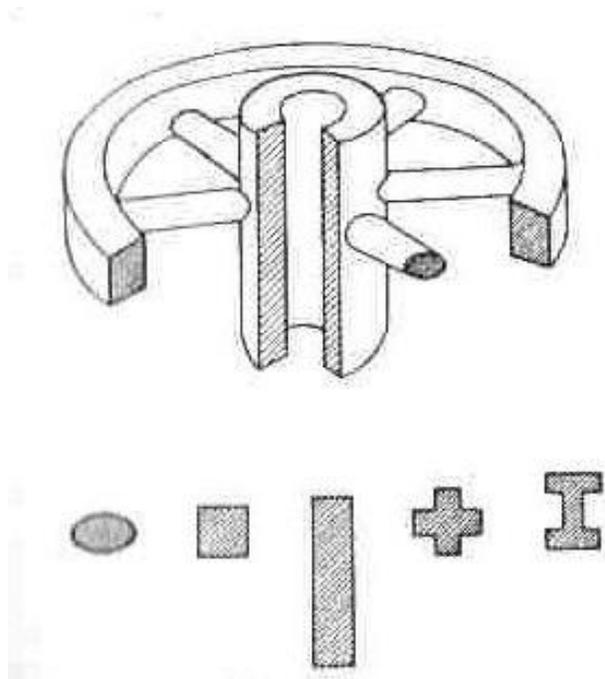


Figura 1.9. Caracterización de una pieza compleja en piezas con menor dificultad.

Al trabajar con barras, el módulo geométrico se puede representar como:

$$M_p = \frac{S}{P} \quad (17)$$

Donde S es el área transversal y P se refiere al perímetro de la barra.

Cuando se obtiene el módulo geométrico se puede convertir a módulo de enfriamiento, para facilitar las distancias térmicas. Otro aspecto que se tiene que cuidar es el espesor equivalente e' ya que representa cualquier pieza o sección de pieza como un prisma envolvente de tres dimensiones: x (distancia perpendicular a la distancia de alimentación), a (superficie de alimentación) y b (espesor de la pieza problema).

Para diferentes posiciones de los alimentadores, el módulo geométrico se puede representar como:

$$M_p = \frac{x \cdot a \cdot b}{2xa + 2xb + ab} \quad (18)$$

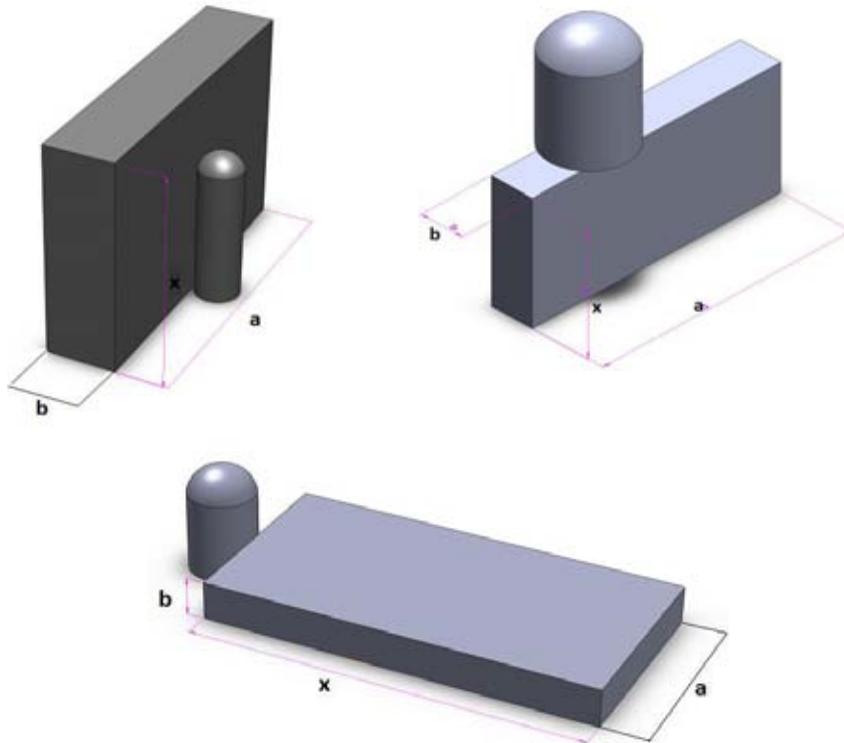


Figura 1.10. Determinación gráfica del módulo de solidificación en función de la posición del alimentador.

Cada elemento tendrá un tiempo local de solidificación caracterizado por un espesor equivalente local. Los puntos calientes (donde el módulo de solidificación es mayor) se pueden representar como círculos cuyo diámetro puede ser representado como el espesor equivalente. En caso de uniones, la saturación térmica de la arena presente en los ángulos o en los corazones rodeados de metal se tomará en cuenta incluyendo el uso de los factores de forma correspondientes.

El módulo de enfriamiento se define como:

$$M' = \omega M_p \quad (19)$$

Donde ω es el factor de forma determinado experimentalmente y M_p es el módulo geométrico. Una vez obtenido el módulo de enfriamiento, se relaciona con el espesor equivalente (e'), el cual deberá corresponder al espesor de una placa infinita que solidifica en el mismo tiempo que el elemento en cuestión.

$$M' = \frac{e'}{2} \quad (20)$$

Donde $e' = 2M$

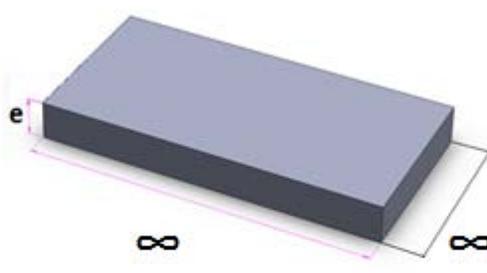
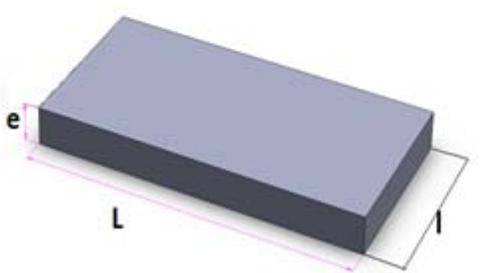
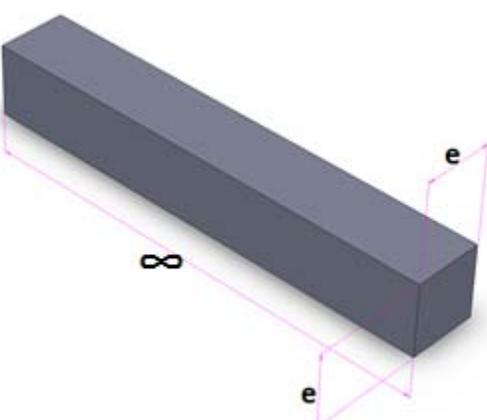
Factores de Forma para geometrías equivalentes			$w(^*)$
Placas infinitas	 <p>The diagram shows a 3D rectangular plate with a thickness labeled 'e'. The length of the plate is labeled with the infinity symbol (∞) at both ends, indicating it is infinite in length.</p>	$\frac{L}{e} = \frac{l}{e} = \infty$	1
Paralelepípedos extendidos	 <p>The diagram shows a 3D rectangular parallelepiped with a thickness labeled 'e', a length labeled 'L', and a width labeled 'l'.</p>	$\frac{L}{e} = \frac{l}{e} = 10$ $\frac{L}{e} = \frac{l}{e} = 6 \text{ a } 8$	0.95 0.9
Barras cuadradas infinitas	 <p>The diagram shows a 3D rectangular bar with a thickness labeled 'e' and a length labeled with the infinity symbol (∞). The cross-section is square, with the width of the top and bottom surfaces also labeled 'e'.</p>	$\frac{L}{e} = \infty$	0.85

Tabla 1. Factores de forma para geometrías equivalentes. Parte 1 de 3

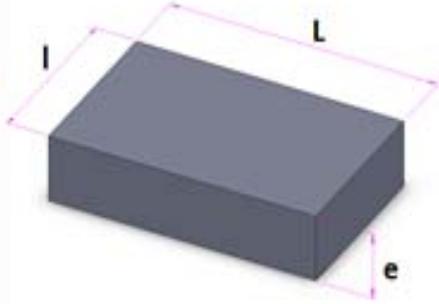
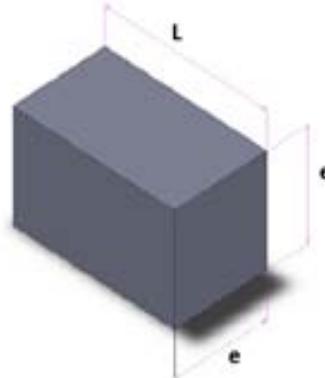
Factores de Forma para geometrias equivalentes.			w(*)
Paralelepipedos poco extendidos		$\frac{L}{e} = \frac{l}{e} = 4 \text{ a } 5$	0.8
Cilindros infinitos		$\frac{L}{e} = \infty$	
Barras cuadradas cortas		$\frac{L}{e} = 2 \text{ a } 5$	

Tabla 1. Factores de forma para geometrías equivalentes. Parte 2 de 3.

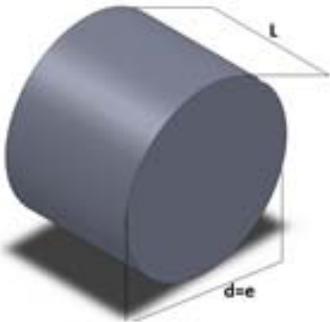
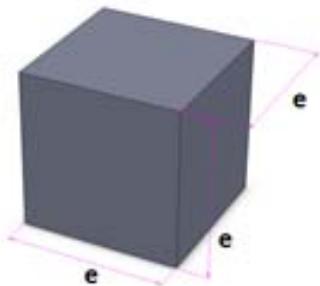
Factores de Forma para geometrías equivalentes			w(*)
Cilindros cortos y muy cortos		$\frac{L}{e} = 2 \text{ a } 5$ $\frac{L}{e} = 1 \text{ a } 2$	0.75
Cubos		$\frac{L}{e} = \frac{l}{e} = 1$	0.75
Esferas		$\frac{L}{e} = \frac{l}{e} = 1$	0.72

Tabla 1. Factores de forma para geometrías equivalentes. Parte 3 de 3

Con base en el espesor equivalente del metal y del espesor del corazón de arena se puede corregir el espesor equivalente mediante una función del factor de forma.

$$\omega = f\left(\frac{d}{e'}\right) \quad (21)$$

Ubicación del alimentador.

Esta limitación depende de la morfología de la pieza problema el cual puede ser ubicado en las siguientes posiciones.

Cuando se ha determinado el diámetro del alimentador D_0 , tomando en cuenta su ubicación (figura 1.11), se puede calcular la altura mediante:

$$D_0 = e' * k \quad (22.a)$$

$$H = 1.5 D_0 \quad (22.b)$$

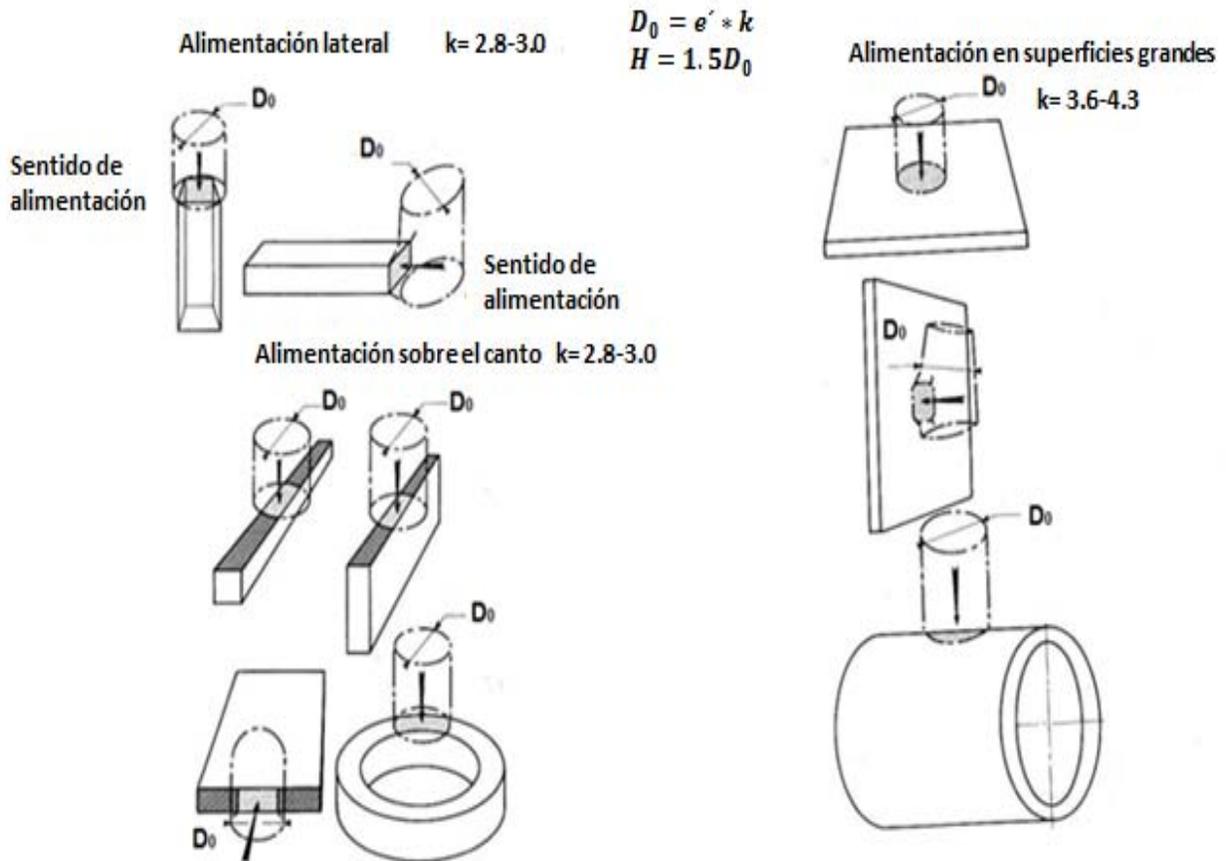


Figura 1.11. Determinación de la constante de alimentación para obtener el diámetro y la altura del alimentador. (*El punto caliente elegido para la ubicación del alimentador es el más importante para determinar el sentido de alimentación).

Mediante los datos generados se puede determinar la dimensión total del alimentador, aunque la ecuación para obtener H en este caso no se utiliza por la generalidad de la figura siguiente. Entre el alimentador y la pieza problema existe una unión denominada cuello, la cual se determina mediante la misma figura.

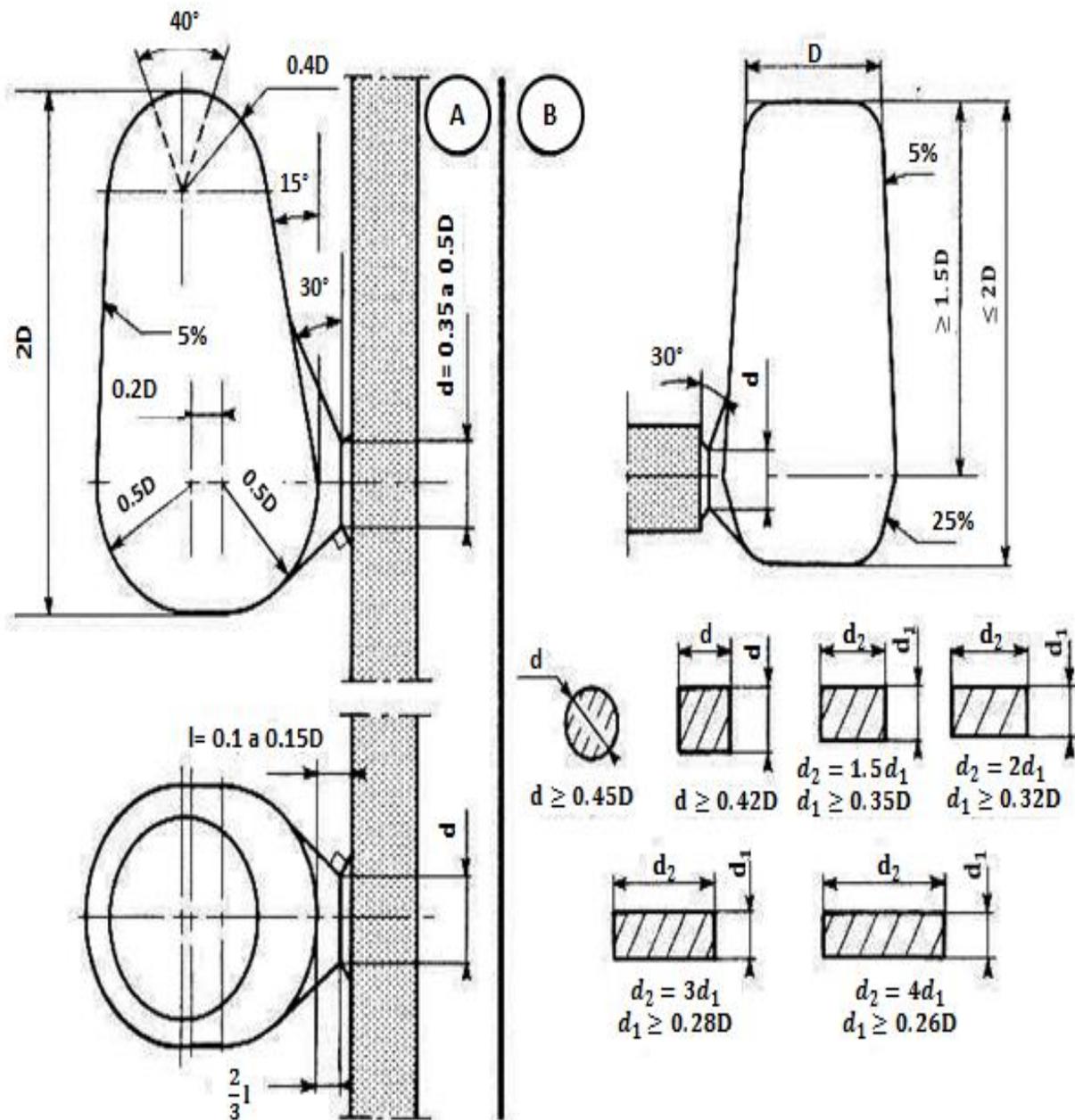


Figura 1.12. Esquemas para calcular el cuello de un alimentador. A) Aplicación de un alimentador para fundiciones grises, B) aplicación de un alimentador para fundiciones blancas.

A una alta temperatura la pérdida de calor aumenta, así la fundición del acero debe solidificar más rápido que una de hierro gris. Esto quizás es comprobado experimentalmente en la gráfica de la figura 1.13 para considerar las dimensiones de los módulos de solidificación.

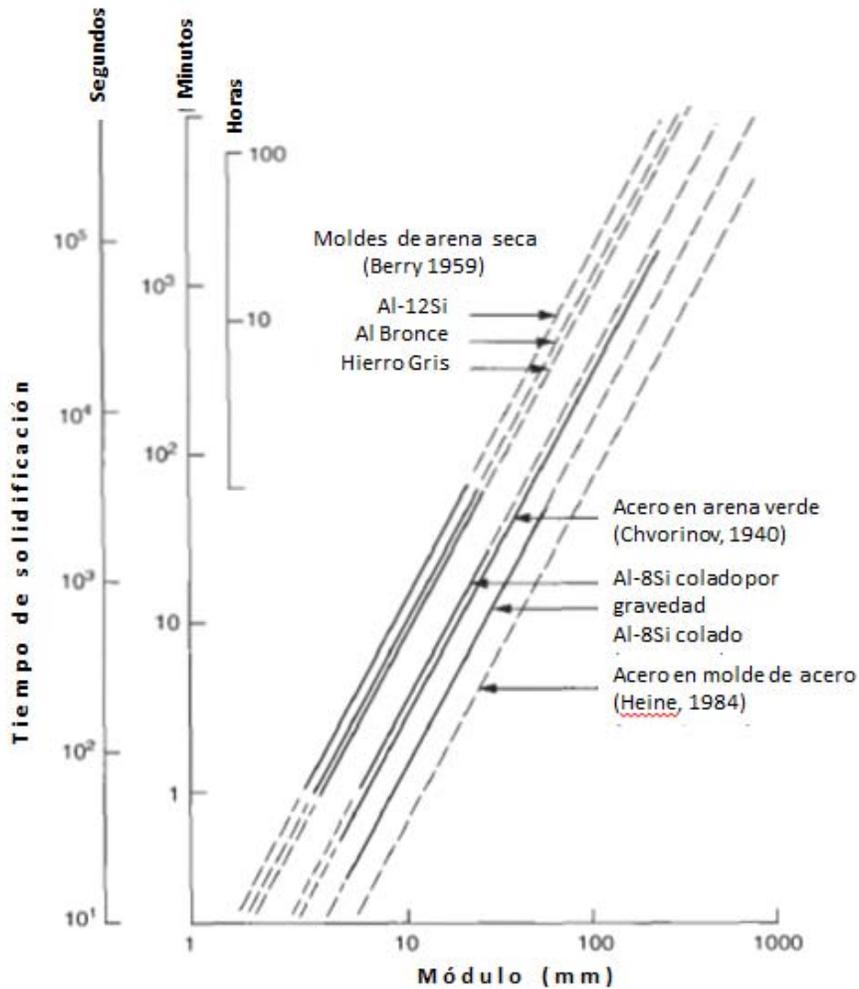


Figura 1.13. Tiempos de enfriamiento para las fundiciones con distintas aleaciones y moldes.

1.5.2 Regla de las contracciones.

Como se había mencionado anteriormente, la regla de las contracciones proporciona detalles para determinar el número de alimentadores para que se pueda proporcionar suficiente líquido requerido para evitar las contracciones líquidas y de solidificación de la pieza problema.

Para que esta regla sea válida en un sistema de alimentación, el alimentador debe cumplir la siguiente condición:

$$V_a > k'rV_p \quad (23)$$

Donde V_a es el volumen del alimentador, k' es la constante de contracción del alimentador (esta suposición depende del tipo de alimentador que se utilice), V_p es el volumen de la pieza, r es la contracción del alimentador y se calcula con $r = R/100$, el valor de R se obtiene mediante la tabla a continuación y además depende del sobrecalentamiento.

Aleación	Sobrecalentamiento en el líquido		Aleación	Sobrecalentamiento en el líquido	
	50°	150°		50°	150°
Bronces	4	4.5	Aleaciones Al- Si 12%	4.5	5
Latón	6	6.5	Aleaciones Al Si [10%, 5%, 7%]	6.5-7.5	7-8
Latón HR	7	7.5	Aluminios Al Cu [8%,4%]	6.5-7.5	7-8
Cu-Al	5	5.5	Aluminios Al Mg [3%,5%]	8	8.5-9
Aleaciones de magnesio	5	6	Aceros con %C=0.8%	6	7
Función Blanca (C. Eq.=3%)	4	6	Aceros con %C=0.3%	5	6

Tabla 2. Valor de “r” para respetar la regla de las contracciones para distintos tipos de aleaciones y sobrecalentamientos en el líquido.

1.5.3 Regla de los radios de acción

Esta regla se encuentra relacionada con el rango de solidificación de las aleaciones así como de la geometría de la pieza problema. Las aleaciones con rangos largo de solidificación ($T_L - T_S > 110^\circ\text{C}$) y formación de granos equiaxiales, dependen en gran medida

de una alimentación semisólida interdendrítica. Resultado de una velocidad de alimentación lenta que origina algunos riesgos al alimentar algunas secciones de la pieza problema causando que la resistencia al flujo se eleve relativamente. Por el contrario las aleaciones con un rango corto de solidificación ($T_L - T_S < 50^\circ\text{C}$) presentarán generalmente una estructura columnar, así la alimentación será líquida y la rapidez de alimentación será elevada.

Es importante resaltar que la geometría de la pieza juega un papel importante dentro de la fundición y de los diseños de sistemas de alimentación ya que afecta directamente al radio de acción. Considerese una placa al momento de solidificar.

No existen gradientes térmicos a lo largo de la placa así que el calor produce una conducción perpendicular a los lados de esta; los frentes de solidificación paralelos se desplazarán desde la pared del molde hasta el centro de la pieza. El flujo de metal líquido es restringido gradualmente, ya que, la alimentación líquida es reemplazada gradualmente por alimentación interdendrítica. Eventualmente el canal de alimentación se cerrará y aparecerá porosidad, conocida como contracción central dispersa, entre las dendritas. En el caso de una cuña que solidifica, (figura 1.18b), existirá un gradiente térmico severo entre el borde y el centro de la pieza. La alimentación líquida será posible hasta el final de la solidificación.

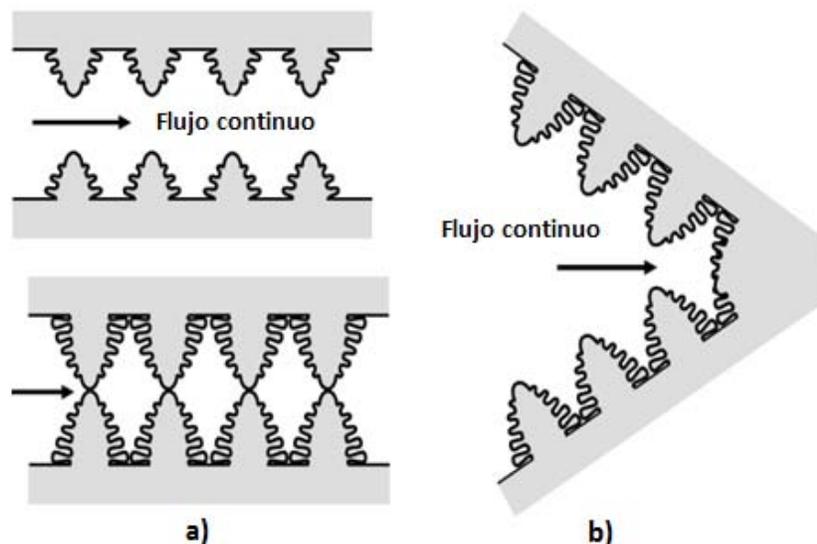


Figura 1.14. Solidificación tipo placa que presenta frentes de solidificación paralelos y b) Solidificación tipo cuña que presenta frentes de solidificación convergentes.

Cuando existen piezas más complejas que la anterior pueden ocurrir varios efectos térmicos, es decir, si el calor es divergente la solidificación será más rápida, eso implica una pérdida de calor mas abrupta. Por el contrario si el flujo de calor es convergente, la solidificación será menor que la divergente y generará puntos calientes.

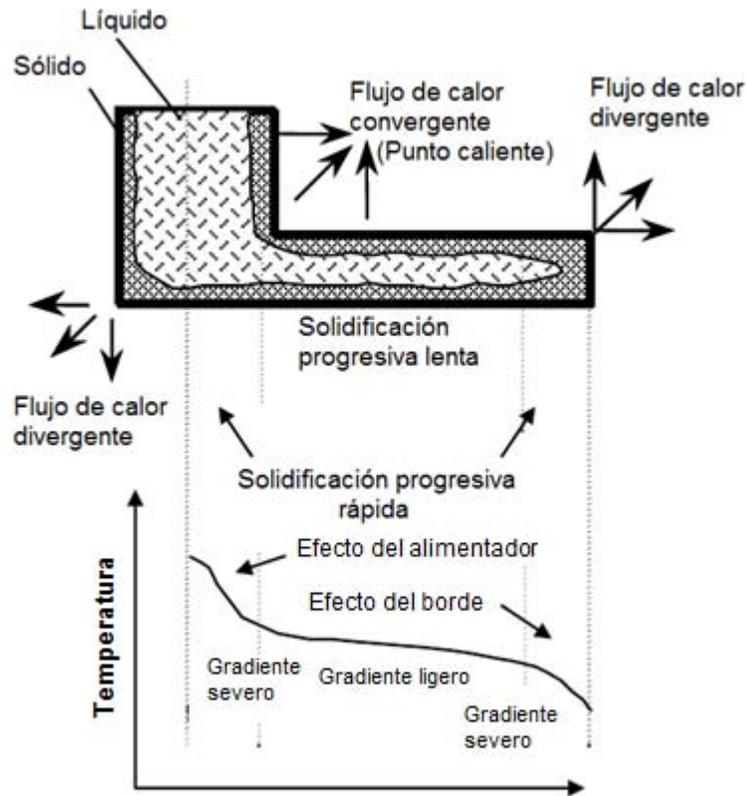


Figura 1.15. Solidificación direccional en una pieza metálica.

CAPÍTULO 2. METODOLOGIA DE CÁLCULO PARA UN SISTEMA DE COLADA.

Como se ha mencionado en el capítulos anteriores, un sistema de colada implica la introducción de metal líquido a una cierta presión y velocidad para evitar turbulencias ocasionadas por el fluido al momento de llenar los moldes, retener gases y escoria, además de prevenir y evitar la erosión del molde, tomando en cuenta la caída de la temperatura para facilitar el llenado de una pieza metálica.

Para determinar la turbulencia se emplea el número de Reynolds (Re), el cual matemáticamente se describe como:

$$Re = \frac{vd}{\nu} \quad (24)$$

Donde v = velocidad de flujo
 d = dimensión lineal del conducto del molde
 ν = viscosidad cinemática del líquido

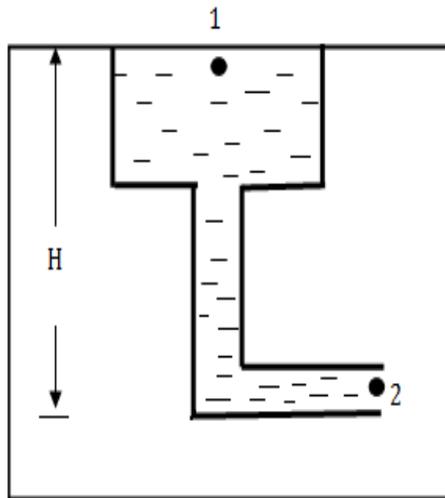


Figura 2.1. Determinación de las velocidades de un flujo.

Se sabe que en los sistemas de colada este número se encuentra arriba de los 2000, esto indica la presencia de un flujo turbulento ocasionado por alta velocidad, canales largos y baja viscosidad cinemática. Para determinar un sistema de colada con los objetivos planteados en el capítulo 1 se emplean dos leyes de la dinámica de fluidos. La primera de

estas dos es la Ecuación de Continuidad, que indica que el flujo volumínico es constante en todo el sistema y se puede expresar como:

$$\theta' = A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (25)$$

Donde θ' = flujo volumínico.

A = área transversal al paso de flujo.

v = velocidad lineal de flujo.

Los subíndices inferiores 1 y 2 en las variables significan entrada y salida (del sistema) respectivamente.

El teorema de Bernoulli se utiliza para caracterizar el comportamiento del metal líquido durante el llenado del molde a través del sistema de colada, es decir, se realiza un balance de energía total por unidad de peso del fluido en todo el sistema, este tiene tres contribuciones principales: energía cinética, energía potencial, y energía de presión:

$$\frac{v_1^2}{2g} + h_1 + \frac{P_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2g} + h_2 + \frac{P_2}{\rho} + \phi \quad (26)$$

Donde v = velocidad lineal de flujo.

h = altura desde un plano.

P = presión.

ρ = densidad.

Se entiende a Φ como la representación de las energías cinética y potencial; los cálculos hechos por estas dos leyes están sujetos a correcciones debidas a la fricción molde-metal líquido, cambios súbitos en las secciones transversales y a cambios de dirección en canales y uniones. Estos principios pueden ser usados para calcular las velocidades de flujo en un sistema individual. El comportamiento del metal en la bajada, por ejemplo, puede ser deducido considerando que la velocidad lineal llegue a ser a la caída de metal

en un punto de reposo sin fricción aparente. Para este caso, bajo presión atmosférica, la energía potencial puede ser directamente proporcional a la energía cinética en cualquier punto de la bajada. En consecuencia con esto, la ecuación de Bernoulli poder ser:

$$h = \frac{v^2}{2g} \quad (27)$$

Despejando v , se obtiene:

$$v = \sqrt{2gh} \quad (28)$$

Entonces la velocidad es simplemente la relación de caída desde el punto inicial de reposo. Siguiendo la ecuación de continuidad y sustituyendo la ecuación (24), se deriva la siguiente relación, que nos da las dimensiones de la bajada:

$$\frac{A_1}{A_2} = \left(\frac{h_1}{h_2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (29)$$

Donde A_1 y A_2 representan las áreas transversales, h_1 y h_2 las profundidades del metal; h_1 es la altura en la entrada de la bajada y h_2 es la altura al final de la bajada (sección de estrangulamiento).

Las características más importantes de un sistema de colada individual son la forma y las dimensiones de los canales, que determinan la rapidez y el tipo de flujo y la posición a la cual el metal entra al molde en relación al diseño de colada. Y su finalidad básica es introducir un volumen de metal V , este volumen está asociado al conjunto alimentadores-pieza, en un cierto tiempo de llenado t , es decir, define el gasto volumétrico promedio, $\dot{\phi}_{prom}$.

$$\dot{\phi}'_{prom} = \frac{V}{t} \quad (30)$$

Analizando la ecuación anterior se pueden definir varios términos. Si se sabe que el volumen del metal se define como:

$$V = \text{área} * \text{distancia} \quad (31)$$

Sustituyendo y simplificando a la ecuación 30 y 31 del gasto volumétrico promedio se puede obtener:

$$\phi'_{prom} = \frac{\text{área} * \text{distancia}}{t} \quad (32)$$

Sabiendo que la velocidad se entiende como:

$$\text{velocidad} = \frac{\text{distancia}}{\text{tiempo}} \quad (33)$$

Entonces el gasto volumétrico promedio con los términos de la ecuación 33 queda como:

$$\phi'_{prom} = \text{área} * \text{velocidad} \quad (34)$$

Éste último término se encuentra en función de la altura, ya que se refiere a la bajada del sistema de colada, y por física, la fuerza de gravedad se vuelve esencial para determinar el flujo volumínico con estas características. Por lo tanto se obtiene:

$$\phi'_{prom} = Ac * \sqrt{2gh} \quad (35)$$

Esta ecuación representa un sistema ideal donde A_c es el área de la sección de estrangulamiento.

Donde Q_m ahora es el gasto másico en g/s, la densidad del metal tiene unidades de g/cm^3 .

Se sabe que el gasto volumétrico es controlado por el área de estrangulamiento, esta se ubica en el plano de partición; la velocidad del metal en este plano, es función de la altura metalostática efectiva H , del factor de fricción B , introduce pérdidas de energía cinética sufridas por el metal líquido durante su paso por el sistema de colada.

$$Q_{Prom.} = BA_c \sqrt{2gH} \quad (36)$$

Tomando en cuenta que básicamente el gasto promedio se puede definir como:

$$Q_{Prom.} = \frac{V}{t} \quad (37)$$

Sustituyendo las ecuaciones 36 y 37, y despejando el área de estrangulamiento se obtiene:

$$A_c = \frac{BV}{t\sqrt{2gH}} \quad (38)$$

Tanto el flujo másico Q_m como el flujo volumétrico Q_v , sirven como base para determinar el área de control de llenado del molde a partir de la cual se calcula el área de los demás componentes sin despreciar la relación de colada y finalmente las dimensiones de cada componente.

$h_d + \frac{L_o + 0,3 L_c}{4}$	0,2	0,4	1	1,5	2	3	5	7
B	1,5 (+ 0,15)	1,6 (+ 0,15)	1,8 (+ 0,15)	2 (+ 0,15)	2,2 (+ 0,10)	2,5 (+ 0,10)	3 (+ 0,10)	3,4 (+ 0,10)

Tabla 3. Valores del factor de descarga B para un sistema de colada de relación 1:2:1.

De igual manera se puede generar una relación para que \emptyset incluya el peso del metal y su densidad:

$$\emptyset'_{prom} = \frac{m*t}{\rho} \quad (39)$$

Donde:

m = masa del metal

t = tiempo de llenado

ρ = densidad del metal.

En un sistema de colada el gasto volumétrico es controlado por el área de estrangulamiento, ubicada en el plano de partición y la velocidad del metal en este mismo plano, que es función de la altura metalostática efectiva H , del factor de fricción f_f que, introduce las pérdidas de energía cinética sufridas por el metal líquido durante su paso por el sistema de colada y el factor de fluidez Fl que introduce el efecto del sobrecalentamiento y la composición química de la aleación vaciada.

$$\phi' = A_c f_r F l \sqrt{2gH} \quad (40)$$

Sustituyendo 39 en 40 y despejando el área de estrangulamiento, ya con todos los factores involucrados se tiene que:

$$A_c = \frac{V}{t f_r F l \sqrt{2gH}} \quad (41)$$

Para permitir un vaciado fácilmente controlable desde el inicio del llenado del molde, el área de estrangulamiento se localiza en la parte inferior de la bajada o en el corredor, lo más cercano posible a la unión corredor-bajada.

Para expresar las características dimensionales de los sistemas de colada se pueden utilizar los términos de relación de colada como: a:b:c

Donde:

a: área transversal de la bajada

b: total de áreas transversales de corredores

c: total de áreas transversales de ataques

Resulta importante mencionar estas relaciones porque en algunos sistemas el total de secciones transversales disminuyen hacia la pieza, haciendo que la presión se incremente en el sistema (sistemas presurizados) o donde las áreas de los canales van aumentando hacia la pieza (sistemas no presurizados).

Una relación de colada se elige en función de la reactividad o de la sensibilidad del metal líquido. Un sistema ideal para todos los propósitos pudiera ser uno en el que las presiones son apenas suficientes para mantener todos los canales llenos y evitar la mezcla de aire antes de que se establezca el flujo.

La relación de colada más adecuada para cada aleación se elige en base a dos criterios

1. Sensibilidad de la aleación
2. Reparto equilibrado de flujo.

El primer punto se refiere a la facilidad que presenta una aleación (o fundición) en estado líquido para reaccionar con el aire para formar óxidos. Con este concepto se pueden distinguir dos clases de aleaciones:

1a. Aleaciones sensibles: aquellas que contienen proporciones considerables de aluminio, magnesio, cromo, las cuales forman fácilmente capas de óxido en el momento de vaciado. Se usa una relación de colada $1:\sqrt{H}:\sqrt{H}$, donde H es la altura metalostática efectiva en decímetros.

1b. Las aleaciones que pueden considerarse como poco sensibles, como gran parte de las aleaciones ferrosas y de cobre.

Este principio se toma en cuenta al definir el modo de llenado de la pieza; y al tratarse de una aleación del tipo poco sensible se utiliza un modo de llenado tipo cascada. Aunque sea definido el tipo de llenado para la fundición se debe considerar las restricciones impuestas por el moldeo.

El llenado de la pieza debe realizarse de una manera equilibrada para minimizar la trayectoria que debe recorrer el metal líquido en la impresión y de modo que se controlen los gradientes térmicos considerados durante el diseño del sistema de alimentación.

De acuerdo con lo anterior, las relaciones de colada que han mostrado en estudios hidrodinámicos, un funcionamiento adecuado en cuanto al reparto del metal líquido introducido a la pieza son las referenciadas en la tabla No.3.

Cabe mencionar que la relación de colada aplicada para el caso bajo estudio se estableció como un sistema neutro.

Tipo de sistema de colada	Relación a:b:c
Sistemas de colada no presurizados	• 1 : 2 : 3
	• 1 : 2 : 4
	• 1 : 2 : 2.5
Sistemas de colada presurizados	• 1 : 0.9 : 0.8
	• 1.2 : 1.1 : 1
Sistema de colada neutros	• 1:2:1

Tabla 4. Relaciones de colada con funcionamiento adecuado en el reparto de metal líquido

También para la obtención de la altura metalostática H se realizan cálculos en base a la ubicación de la pieza, con respecto a la línea de partición. Véase la figura 2.2.

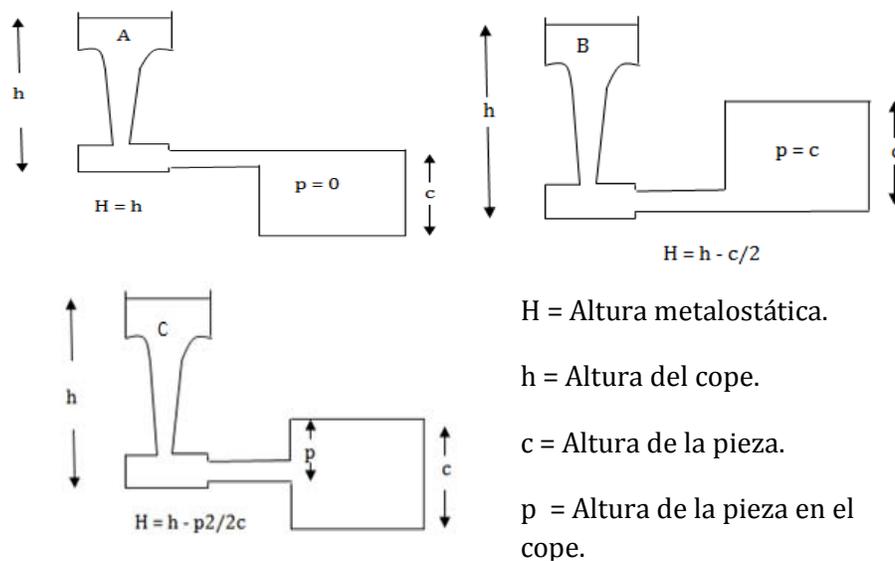


Figura 2.2. Corrección de la altura metalostática en función de la posición de la pieza respecto a la línea de partición.

Después de haber conocido las ecuaciones de flujo de fluidos para desarrollar un sistema de colada, se deben considerar los siguientes pasos a seguir:

- Establecer el tiempo óptimo de llenado del molde.

- Calcular el área de estrangulamiento.
- Seleccionar el escalonamiento o la relación de colada.

2.1 Consideraciones en el desarrollo de un sistema de colada.

La relación de colada es la relación que existe ente el área de la bajada, el área transversal del o de los corredores y del área total transversal de los ataques y se expresa como:

$$A_{\text{bajada}} : A_{\text{Corredores}} : A_{\text{Ataques}}$$

A partir de esta relación, se catalogan a los sistemas de colada como sistemas presurizados y no presurizados, conceptos revisados ya en el capítulo anterior, que resultan de gran importancia no solo para el llenado del molde y el sistema de alimentación, sino para la minimización de la turbulencia.

La exclusión de la turbulencia en la superficie es quizá la regla más complicada para un sistema de colada. Desafortunadamente a pesar de muchos estudios este factor no se elimina y es el causante del 80% de los defectos en la fundición. Para entender el problema se dice que una gota no tiene que exceder la altura de 10 mm para que la velocidad crítica de caída libre no se llegue al límite. En los sistemas reales las caídas son de 10 a 100 veces mayores y el daño está implícito en la energía involucrada, entonces el daño que se espera es del orden de 100 a 10000 veces mayor, y como en la mayoría de las fundiciones la alimentación se logra por gravedad este problema se vuelve cotidiano.

2.1.1 Requerimiento de la velocidad crítica.

Existen variables que se pueden controlar más fácilmente que otras, se pueden mantener constantes (temperatura, calidad de la aleación, contenido del molde geométrico, tipo de agregado, etc.) sin denotar importancia, mientras que la velocidad puede cambiar radicalmente. Entonces la velocidad de entrada (figura 2.3) sería el factor dominante y solamente cambiando este factor se puede remover con éxito la falla completa.

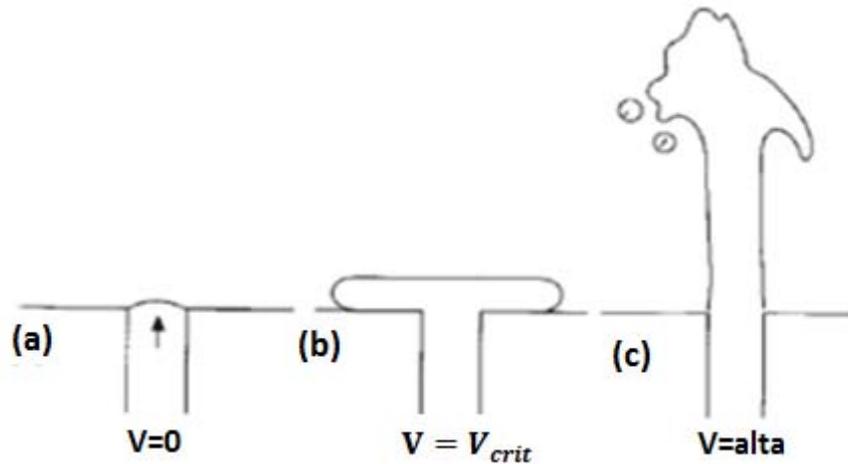


Figura 2.3. Efectos de la velocidad del fluido al molde en una fundición, (a) cero, (b) crítica, y (c) alta.

Retomando el tema de la velocidad, y utilizando el sentido común, existe una velocidad óptima en la cual el metal debe entrar al molde. A una velocidad de cero, la colada es particularmente segura evitando daños en el molde, desafortunadamente esta propiedad no es útil para el llenado de los moldes.

Por el contrario a una alta velocidad, el metal líquido entra dentro del molde con demasiada presión, dañando el metal y el molde.

Conceptos teóricos demuestran que la velocidad que debe alcanzar un metal es cercana a 0.5 m/s, este valor corresponde a la velocidad intermedia del metal que entra al molde apoyado por la tensión superficial y llene el molde sin daño alguno (figura 2.3).

Conocer el significado de la velocidad crítica resulta importante ya que existe la formación de defectos sobre la superficie, los cuales quedarán atrapados dentro de la zona de turbulencia debido a un efecto de envoltura, formando bicapas de óxido, y está demostrado que un defecto de este tipo reduce las propiedades de la aleación de la pieza problema hasta en un 90%.. Para el caso de estudio se tomará un sistema con la relación de colada 1:2:1.

2.3 Determinación de los componentes de un sistema de colada.

2.3.1 Bajada.

Este componente de un sistema de colada tiene la finalidad de conseguir que el metal fundido pase con una disminución de defectos aun a pesar de la velocidad de flujo que se genera al momento de vaciar el metal líquido al molde.

El problema fundamental con el diseño de la bajada es que la longitud excede la altura crítica de la caída, provocando que se alcance la velocidad crítica del metal líquido incluso que se exceda. Por lo tanto, la bajada se tiene que realizar lo más estrecha posible, de modo que el metal no tenga la oportunidad de romper la superficie durante la caída y si así ocurriera evitar que el metal salpique. Ver figura 2.4.

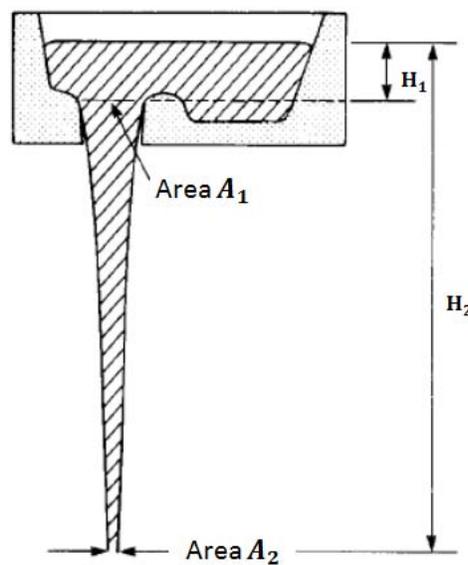


Figura 2.4. Geometría recomendada de la bajada.

La mayoría de las bajadas son de gran tamaño. Esto es malo para la calidad del metal, el cual se daña de dos maneras importantes:

- i. La bajada tarda más tiempo para llenar. Esto causa gran turbulencia en la bajada, lo cual trae como consecuencia a una acumulación de óxido dentro de la bajada y consecuentemente el arrastre de éste dentro de la cavidad del molde.

- ii. La caída libre del metal líquido, provoca gran agitación y chapoteo dentro del molde, debilitando las paredes de arena, teniendo como consecuencia la erosión del molde.

Básicamente, la bajada se diseña para simular la forma cónica que la corriente de metal líquido adopta naturalmente al caer como resultado de su aceleración debido a la gravedad. Para piezas coladas de tamaño medio, esto se corrige simplemente haciendo la entrada de la bajada 20 por ciento más grande en el área de la salida, con esto se puede evitar igualmente el arrastre de aire.

2.3.2 Unión bajada-corredor.

El punto en el cual el líquido que cae emerge de la salida de la bajada y cambia de dirección entrando al corredor se ha estudiado durante muchos años, pero se han obtenido resultados variados, por lo que Campbell ha propuesto una unión de geometría diferente comparada con la recomendada por la AFS.

En los estudios realizados han confirmado que la unión bajada-corredor es mejor un diseño de vuelta simple (ver figura 2.5 a, b y c). Para una vuelta simple estrecha en lugar del colchón la velocidad del metal en el corredor se ve reducida un poco debido a la fricción adicional de la pared (aproximadamente 20 por ciento).

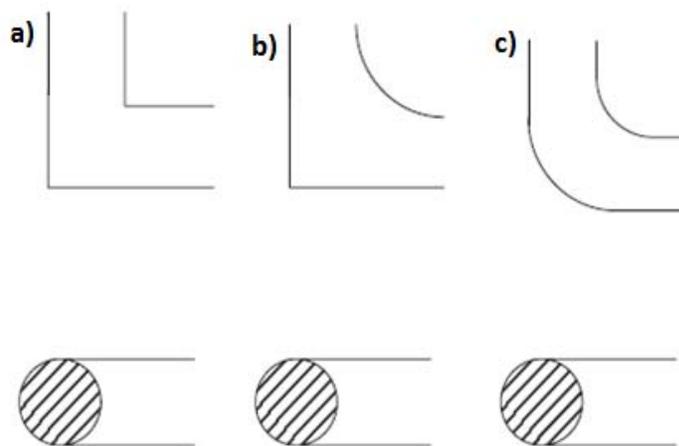


Figura 2.5. Diferentes uniones de bajada-corredor utilizados en la actualidad.

2.3.3 Radio de Vuelta.

Se ha demostrado que para piezas coladas pequeñas, hasta algunos kilogramos, el metal líquido puede dar vuelta en la unión bajada-corredor de ángulo recto doble (figura 2.5a). Sin embargo, si no tiene radio, el metal líquido no puede seguir la curva, de modo que en el borde del ángulo superior ocurre una zona de baja presión, aspirando gran cantidad de aire el cual provoca la oxidación del metal y atrapamiento de burbujas.

En cambio, si a la esquina interna de la curva se da un radio suficientemente grande, el metal líquido dará vuelta a la esquina sin la aspiración o turbulencia (figura 2.5b). De hecho, la acción del metal al avanzar funciona como un pistón en un cilindro: el aire es empujado y nunca se mezcla. Para ser efectivo, el radio necesita ser por lo menos igual al diámetro de la salida de la bajada. La acción del radio interno se mejora si la curva exterior también presenta un radio (figura 2.5c).

2.3.4 Corredor.

Campbell menciona que Webster (1964) realizó algunos experimentos para determinar el tamaño óptimo del corredor. Él encontró que en un corredor que tiene la misma área que la salida de la bajada (cociente 1), la velocidad del metal es alta con un cociente de 2, la demanda del metal está cercana al valor óptimo puesto que el corredor se llena rápidamente y elimina las burbujas de aire. Un cociente de 3 dificulta el llenado del corredor y un cociente de 4 es excesivamente muy grande para la mayoría de las piezas. Webster informó de los peligros al utilizar corredores grandes y a pesar de todo, continuó utilizándose.

De acuerdo a los mejores resultados obtenidos, y respaldado por estudios recientes, se ha establecido claramente que el área transversal de corredor tiene que ser dos veces mayor al área inferior de la bajada.

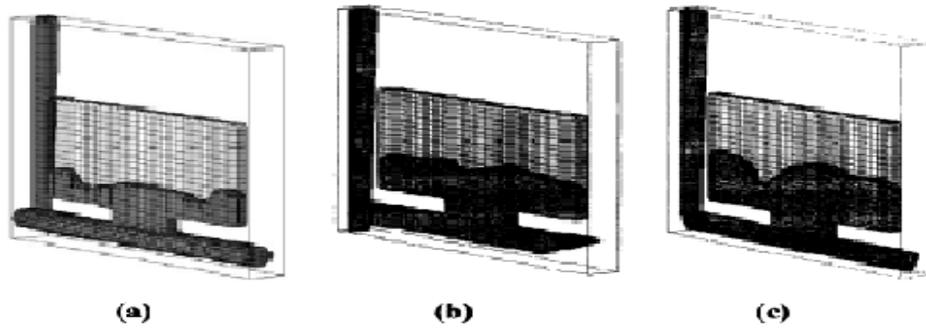


Figura 2.6. Esquema general de los tres corredores utilizados por Campbell. (a) CC; (b) CR; (c) CT.

John Campbell ha estudiado el efecto que tiene el diseño del sistema de colada sobre la fuerza mecánica de diferentes piezas de aleación Al-7Si-Mg, obtenidas por fundición con tres diferentes formas de secciones transversales de los corredores, manteniendo las mismas dimensiones del tazón de colada, la bajada y de los ataques: el Corredor Circular (CC), el Corredor Rectangular (CR) y el Corredor triangular (CT). Ver figura 2.6.

También modeló, con ayuda de un programa de Computo de Dinámica de Fluidos (CFD, por sus siglas en ingles), empleando el código FLOW-3D, los tres diseños de corredores, para identificar el comportamiento del flujo y la distribución de las películas de óxido en las piezas coladas.

Las piezas obtenidas, se analizaron por rayos X para examinar la distribución general de defectos de los diversos sistemas de corredores. Las placas se sometieron al método de dobles del Cuarto-punto y la dispersión de los resultados en las curvas de fuerza fue cuantificada por el método estadístico Weibull. Y por último, las películas de óxido y los defectos de colada que existían en la superficie de la fractura de las muestras fueron observados utilizando la Microscopia Electrónica de Barrido. Ambos resultados, numéricos y experimentales, demostraron que el corredor CC puede controlar con eficacia la velocidad la entrada a las puertas, evitando la generación de turbulencia superficial y el arrastre de las películas de óxido, obteniendo placas con pocas inclusiones de óxido y características mecánicas más confiables comparadas con las fundiciones en las que se utilizan sistemas de colada de corredores convencionales. El CR presenta un desempeño inferior pero aceptable mientras que el CT muestra claros problemas de generación de turbulencia y con esto formación de capas de óxido.

2.3.5 Ataques.

Este complemento tiene la finalidad de abastecer metal líquido a la pieza problema reduciendo la velocidad, en ocasiones más baja que la velocidad crítica, para que el metal entre suavemente a la cavidad del molde. Ya se ha mencionado que el efecto de la velocidad crítica es evitar turbulencia, que a su vez podrían generar bi capas de óxido además de que provocaría el atrapamiento de gas dentro del molde causando un daño irreversible a la pieza problema.

Por lo tanto una regla importante se puede seguir de una forma simple: no ubicar el o los ataques cerca de donde se encuentra la unión bajada-corredor (figura 2.7). Una segunda regla importante se refiere al tamaño de los ataques. Estos deben proporcionar suficiente área para reducir la velocidad del metal líquido, pues si el área del ataque es demasiado pequeña el metal será acelerado, entrando a la cavidad del molde en forma de chorro, corriendo el peligro que dañe seriamente el molde de arena.

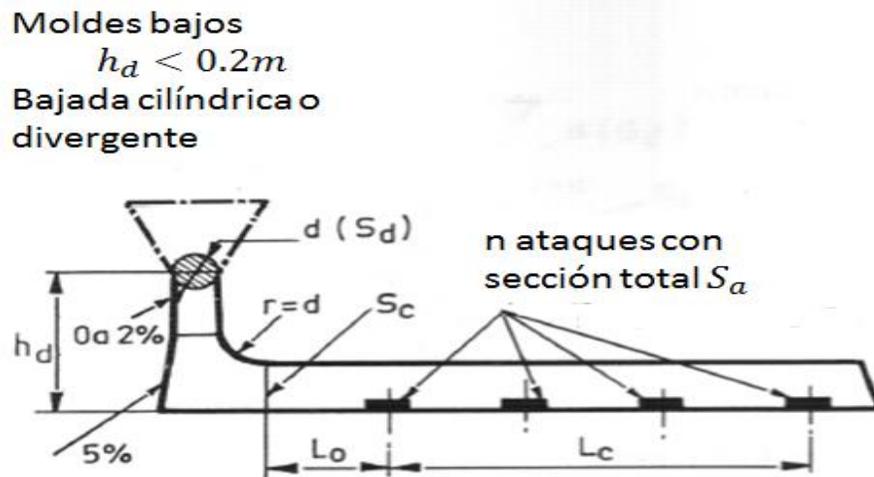


Figura 2.7. Ubicación de los ataques para obtener el factor de descarga B.

2.3.6 Ángulos recomendados.

Michel Jeancolas menciona que cualquier ángulo vivo situado dentro de un sistema de colada es dañino tal que:

- Causan la formación de turbulencias.

- Pueden causar, sobre todo en el interior de los ángulos o cambio de dirección, zonas de vacío en la cual puede ocurrir el atrapamiento de aire.

Ahora bien, en las figuras 2.8, 2.9, y 2.10, se muestran las dimensiones que se deben de tomar en cuenta para el redondeo de los ángulos vivos en cada una de las partes que constituyen el sistema de colada.

Utilizando las recomendaciones realizadas en este trabajo, se obtienen piezas de aleaciones fácilmente oxidables, se evita el atrapamiento de aire, la erosión de la arena, con lo cual se evita las inclusiones dentro de la pieza, y por último las incrustaciones de películas de óxido atrapadas dentro de la pieza.

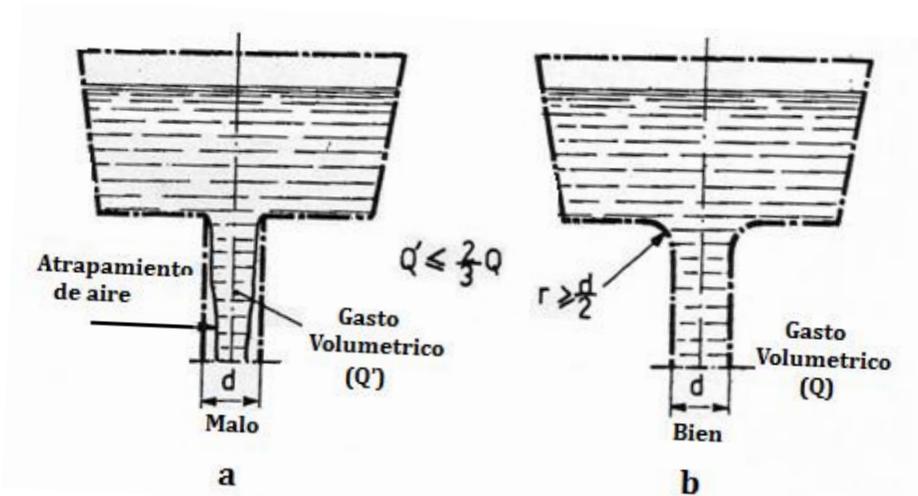


Figura 2.8. Recomendación para el trazado de los ángulos del tazón de colada.

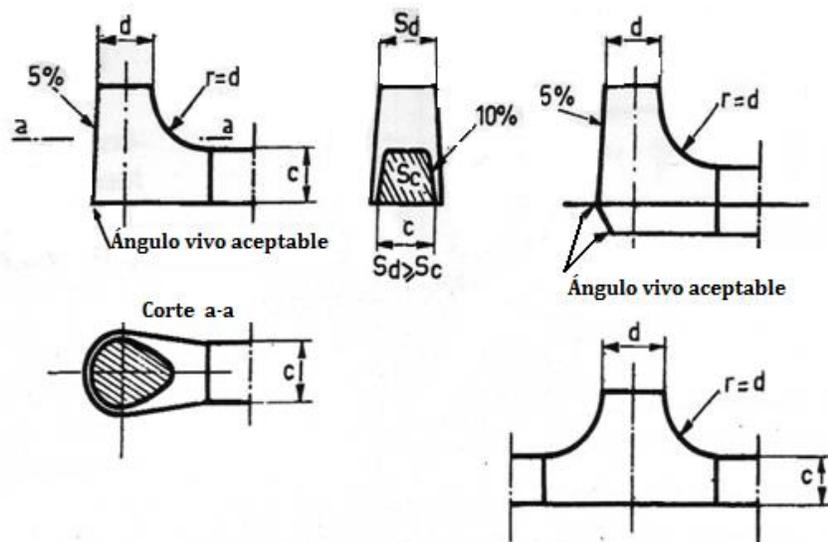


Figura 2.9. Dimensiones recomendadas para los ángulos de la unión bajada-corredor.

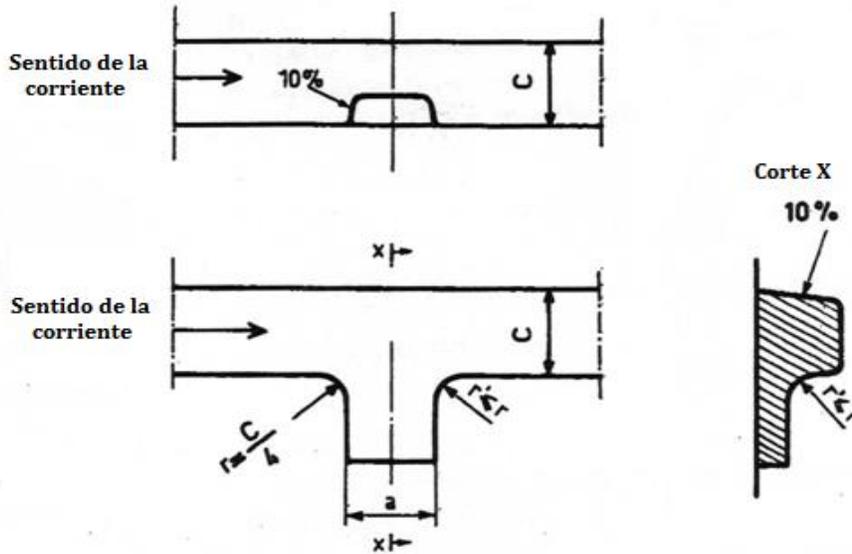


Figura 2.10. Trazo de los ángulos recomendados para los ataques.

2.3.7. Tiempo de colada.

Para lograr un correcto llenado de la cavidad del molde, es necesario llenar los moldes en un tiempo t_v que está relacionado con el tiempo t_{ini} de enfriamiento de la aleación, desde su temperatura de entrada en la cavidad del molde hasta su descenso a la temperatura de "liquidus". Lo cual se puede lograr manteniendo la siguiente relación; $t_v < t_{ini}$ donde t_v es el tiempo de llenado y t_{ini} es el tiempo de inicio de la solidificación.

Ya es sabido que en moldeo en verde puede existir la aparición de defectos superficiales debido a un tiempo de llenado prolongado, ya que las paredes interiores del molde se degradan por la radiación del metal. En la literatura se encuentra que el tiempo crítico de aparición de las llamadas colas de rata es $t_{CA} = 3$ a 5 segundos, donde t_{CA} es el tiempo crítico de aparición de defectos en arena fina (AFS > 100) y en arenas finas o gruesas $t_{CA} = 5$ a 12 segundos.

Para determinar el tiempo de llenado, existen gráficas y tablas, un ejemplo se muestra en la figura 2.11, en la cual el t_{ini} es una función del sobrecalentamiento, el modulo representativo de la pieza y el tipo de aleación. Se recomienda que el tiempo de llenado

del molde sea menor al tiempo de liquidus ya que, de lo contrario, los corredores podrían solidificar antes y se detendría el llenado del molde.

Un correcto cálculo del sistema de colada no garantizará una pieza libre de defectos, aun así el correcto diseño puede contribuir significativamente a la reducción del problema. Desafortunadamente la calidad del diseño es proporcional a la experiencia del diseñador. La simulación del llenado a través de modelado numérico puede ayudar a optimizar los diseños, ya que permiten una visualización del llenado del molde y corrección de problemas locales a través del rediseño.

El tiempo de llenado depende de la posición de la pieza con respecto a la línea de partición en el molde, ya sea por encima, por debajo o mixto (ver figura 2.2). Para calcular el tiempo de llenado se deben cumplir con las siguientes relaciones:

- Si el modo de llenado es en fuente $t_v \geq t_{ini}$.
- Si el modo de llenado es en caída o mixto $t_v \leq 2$ a $3 t_{ini}$.
- Para ambos casos $t_v < t_g$

Donde t_g representa el tiempo crítico de la aparición de defectos superficiales en moldes de arena por exposición a la radiación del metal líquido y se presenta en la tabla 4:

Molde en verde		Moldes cocidos	Moldes o corazones de arena compacta.
Arena fina	Arena media o gruesa.	15 a 30 segundos	20 a 60 segundos
3-5 segundos	5-12 segundos		

Tabla 5. Tiempos críticos de aparición de defectos superficiales en moldes de arena.

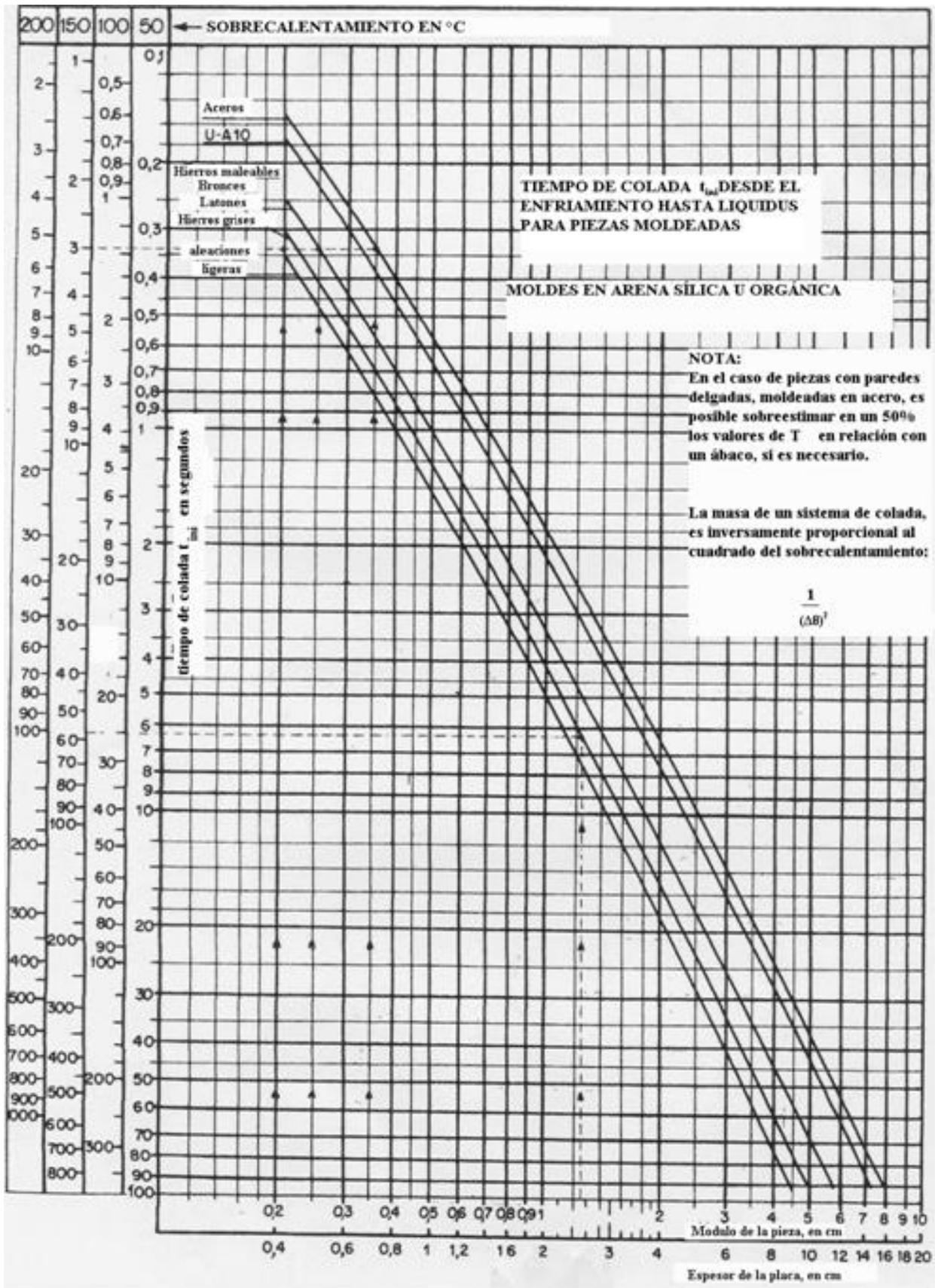


Figura 2.11. Nomograma del tiempo de solidificación en función del tipo de aleación y el sobrecalentamiento a partir del módulo significativo de la pieza problema.

CAPITULO 3. CALCULO DEL SISTEMA DE COLADA Y ALIMENTACION DE LA PIEZA BAJO ESTUDIO.

Para ubicar el sistema de colada y alimentación en la caja de moldeo se debe tener en cuenta las dimensiones de ésta, las cuales son 35.5cm de altura, 50cm de longitud y 40cm de ancho, esto se esquematiza a continuación.

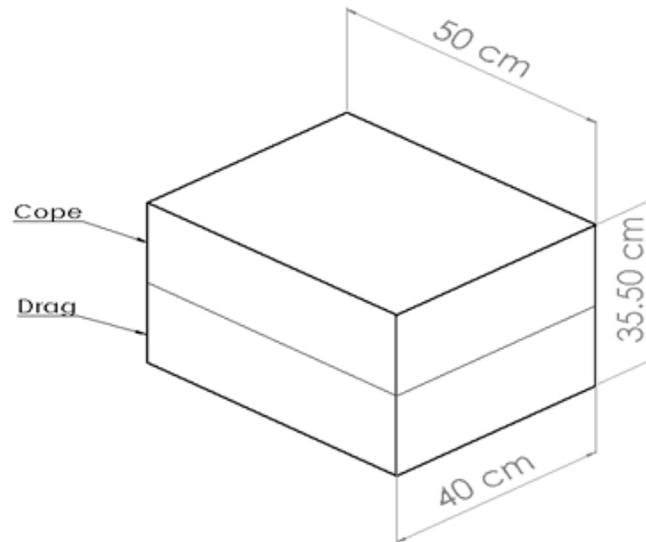


Figura 3.1. Esquema y dimensionamiento de la caja de moldeo para la pieza problema.

Cuando se ubica la pieza, provista de su sistema de alimentación en el espacio del molde y se determina su posición en el molde en relación al plano de partición (LP), estableciendo las dimensiones en la caja. Se tiene lo mostrado en la figura

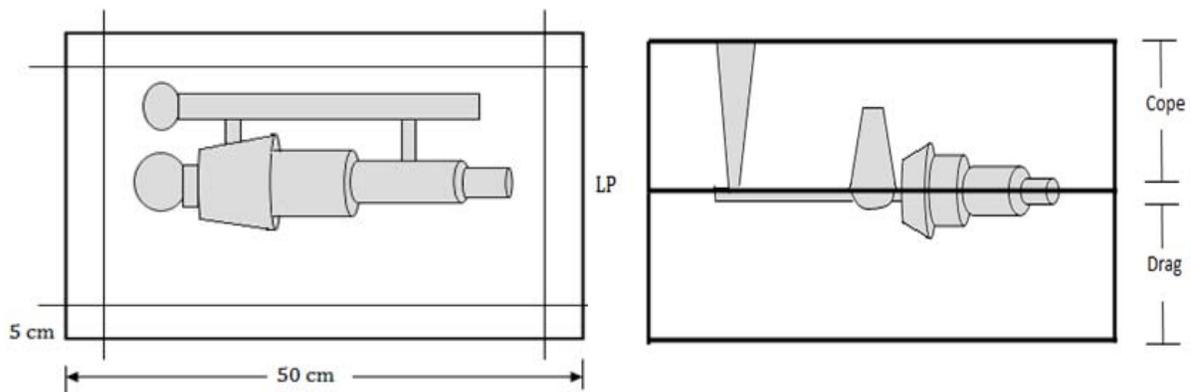


Figura 3.2. Ubicación de la pieza problema en la caja de moldeo en 2 vistas.

Para iniciar los cálculos requeridos para calcular el sistema de colada y alimentación es necesario dimensionar todo el conjunto de elementos que establecerán dicho complejo. Se muestra la pieza problema con las dimensiones requeridas acotadas en centímetros (cm) en la figura 3.3.

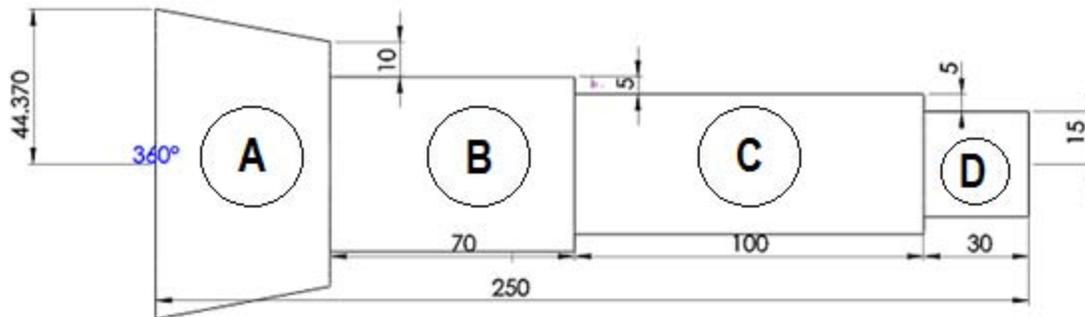


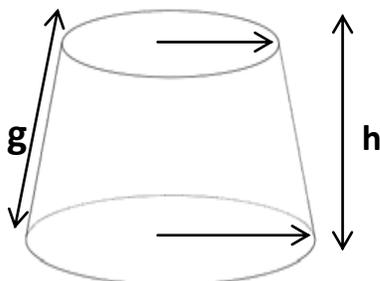
Figura 3.3. Corte de la pieza problema debidamente dimensionada. Acotaciones dadas en mm.

Para determinar el sistema de alimentación es necesario obtener los módulos locales de solidificación, los cuales son el resultado del cociente del volumen entre el área de enfriamiento de la pieza analizada. Para mayor facilidad observación se divide la pieza sus compuestos obvios.

3.1 Determinación de los módulos de solidificación.

Dividiendo al modelo en sus compuestos, las ecuaciones para obtener el área y volumen del cono truncado (A), y los cilindros (B), (C) y(D) son:

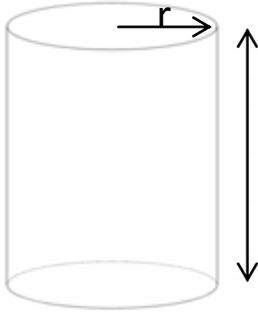
(A) Cono truncado.



$$V = \frac{1}{3}\pi h(R^2 + r^2 + R * r)$$

$$A = \pi[(R + r)g + R^2 + r^2]$$

$$g = \sqrt{h^2 + (R - r)^2}$$

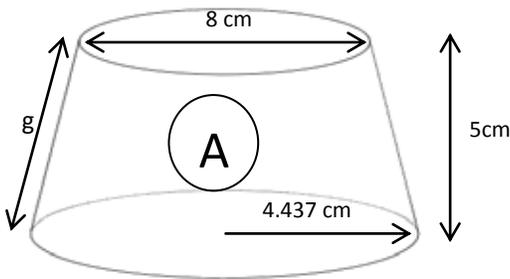


(B) Cilindro

$$A = 2\pi r(h + r)$$

$$V = \pi r^2 h$$

Dimensionando las simplificaciones:



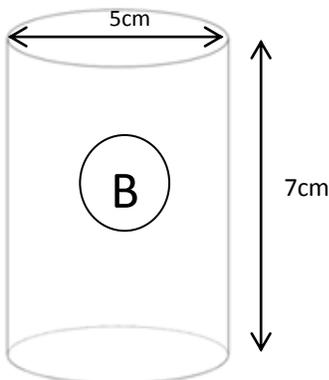
$$V_A = \frac{1}{3}\pi(5\text{cm}) * [(4.437\text{cm})^2 + (4\text{cm})^2 + (4.437\text{cm} * 4\text{cm})] = \mathbf{279.78\text{cm}^3}$$

$$g = \sqrt{(5\text{cm})^2 + (4.437\text{cm} - 4\text{cm})^2} = \mathbf{3.66\text{cm}}$$

$$A_A = \pi[(4.437\text{cm} + 4\text{cm}) * 3.66\text{cm} + (4.437\text{cm})^2 + (4\text{cm})^2] = \mathbf{209.12\text{cm}^2}$$

Calculando el módulo de solidificación:

$$M_{pA} = \frac{V}{A} = \frac{279.78\text{cm}^3}{209.12\text{cm}^2} = \mathbf{1.337\text{cm}}$$

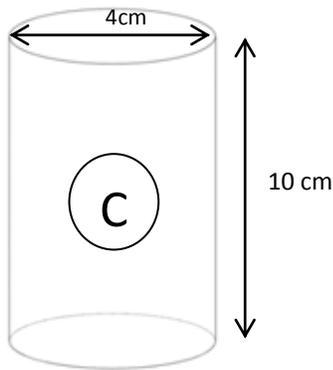


$$V_B = \pi(2.5\text{cm})^2 * 7\text{cm} = \mathbf{137.44\text{cm}^3}$$

$$A_B = 2\pi(2.5\text{cm}) * (7\text{cm} + 2.5\text{cm}) = \mathbf{149.22\text{cm}^2}$$

Calculando el módulo de solidificación:

$$M_{pB} = \frac{V}{A} = \frac{137.44\text{cm}^3}{149.22\text{cm}^2} = \mathbf{0.921\text{cm}}$$

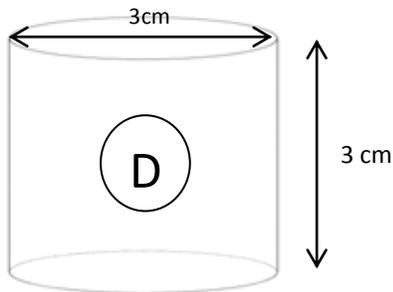


$$V_C = \pi(2\text{cm})^2 * 10\text{cm} = 125.66 \text{ cm}^3$$

$$A_C = 2\pi(2\text{cm}) * (10\text{cm} + 2\text{cm}) = 150.79 \text{ cm}^2$$

Calculando el módulo de solidificación:

$$M_{pC} = \frac{V}{A} = \frac{125.66 \text{ cm}^3}{150.79 \text{ cm}^2} = 0.833 \text{ cm}$$



$$V_D = \pi(1.5\text{cm})^2 * 3\text{cm} = 21.2 \text{ cm}^3$$

$$A_D = 2\pi(1.5\text{cm}) * (3\text{cm} + 1.5\text{cm}) = 42.41 \text{ cm}^2$$

Calculando el módulo de solidificación:

$$M_{pD} = \frac{V}{A} = \frac{21.2 \text{ cm}^3}{42.41 \text{ cm}^2} = 0.499 \text{ cm}$$

Retomando la figura original se tienen entonces las dimensiones junto con el módulo de solidificación de cada zona de interés:

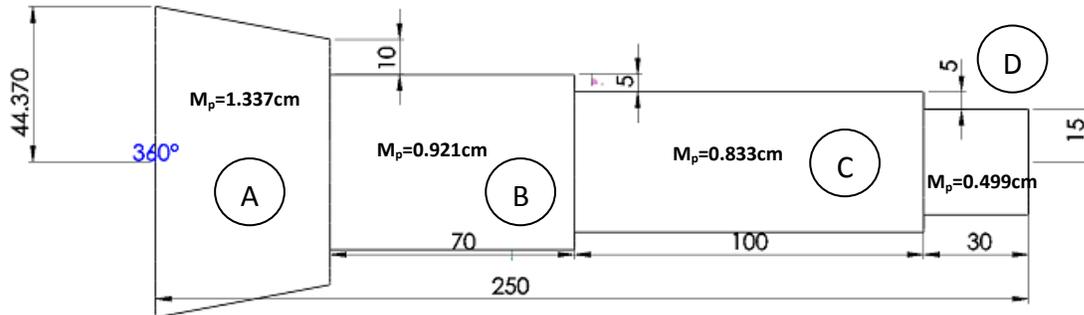


Figura 3.4. Plano de la pieza problema junto con los módulos de solidificación en las zonas de interés. Dimensiones de la pieza expresada en mm

Por consiguiente se deduce que el alimentador quedará donde el módulo sea mayor, es decir, M_1 , al inicio de la pieza. La relación en los módulos de alimentación en función del volumen de la pieza total demuestra que el módulo significativo es aquel que contiene la mayoría de material y el mayor módulo.

Módulo	Valor (cm)	% de la pieza.
M_{pA}	1.337	49.6
M_{pB}	0.921	24.35
M_{pC}	0.833	22.27
M_{pD}	0.499	3.75

Tabla 6. Proporciones del módulo de solidificación en función del volumen de la pieza total.

Con este dato se pueden obtener las dimensiones del alimentador que abastecerá a la pieza problema en el futuro. Para esto se debe obtener una serie de datos relevantes que lleven al resultado final.

3.2 Obtención del módulo del alimentador.

Para obtener esta información se emplea el método del Centro Técnico de la Industria de La Fundición (CTIF), Francia, para calcular el diseño, dimensiones y cuello del alimentador requerido por la pieza. Para tal efecto se necesita calcular el módulo de enfriamiento de la sección significativa de la pieza así como su espesor equivalente el cual será empleado junto con parámetros semi empíricos para calcular el diámetro de alimentador como se muestra a continuación:

$$M' = wM_p \quad (42)$$

Donde w es un factor de forma determinado experimentalmente. Tomando w para un cilindro infinito:

$w=0.8$. Entonces:

$$M' = 0.8(1.337cm) = 1.0696cm$$

Sabiendo que el módulo de enfriamiento es proporcional a la mitad del espesor equivalente del alimentador, se puede traducir algebraicamente esto a:

$$M' = \frac{e'}{2} \quad (43)$$

Entonces sustituyendo los valores y despejando e' se obtiene el espesor equivalente de la función para calcular el alimentador:

$$e' = 2M'$$

$$e' = 2(1.0696cm) = 2.1392cm$$

3.3 Ubicación del alimentador.

El sistema de alimentación requerido corresponde en mayor medida con la siguiente representación esquemática, típica de la ubicación del alimentador en el canto lateral de la pieza y del empleo de la constante semi empírica mostrada en el dibujo.

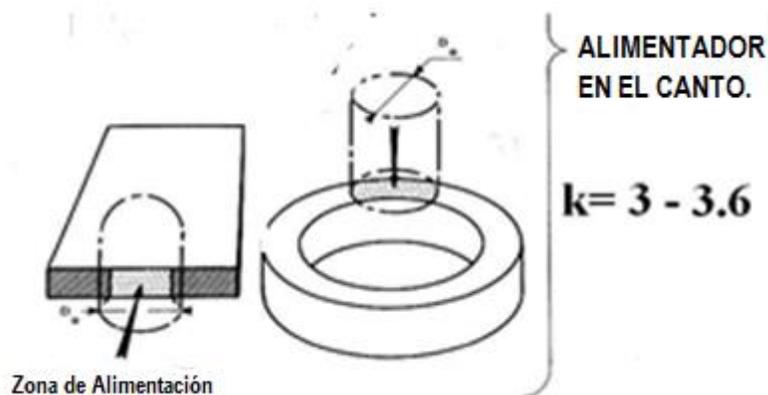


Figura 3.5. Determinación de la posición del alimentador.

Se toma a k con valor de 3.3 y se sustituye en la ecuación para evaluar D_0 , de acuerdo con el método CTIF

$$D_0 = e' * k \quad (44)$$

$$D_0 = 2.1392\text{cm} (3.3) = 7.059\text{cm}$$

Este valor determina el diámetro para un alimentador que abastecerá la demanda líquida al momento de la fundición de la pieza metálica.

3.4 Ubicación del cuello del alimentador.

Ya habiendo obtenido D_0 se relaciona con las dimensiones del diseño de un alimentador que ha sido probado repetidamente por el CTIF, y que se representa esquemáticamente a continuación, con acotaciones descritas en detalle, donde $D=D_0$, es la dimensión de la función del alimentador.

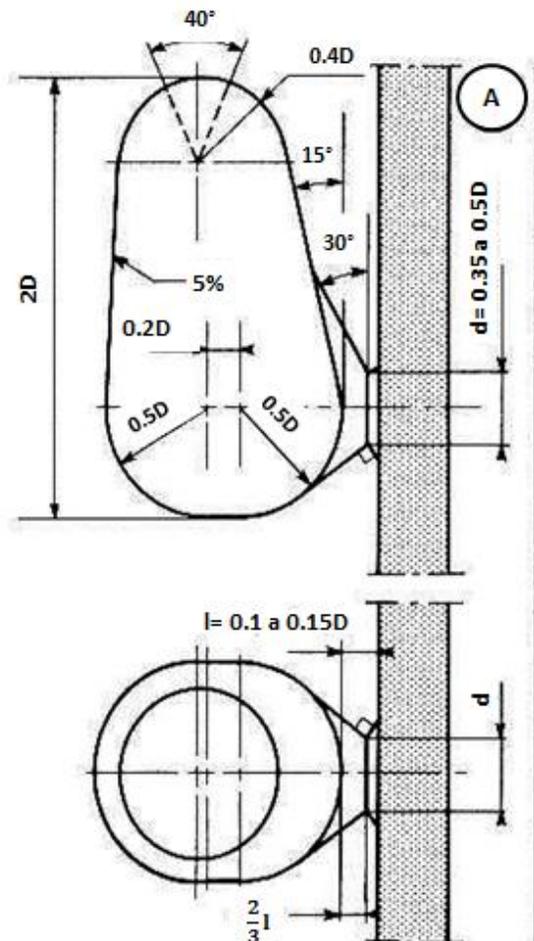


Figura 3.6. Determinación del tipo de alimentador requerido.

Obteniendo numéricamente las dimensiones, se tiene un alimentador como sigue:

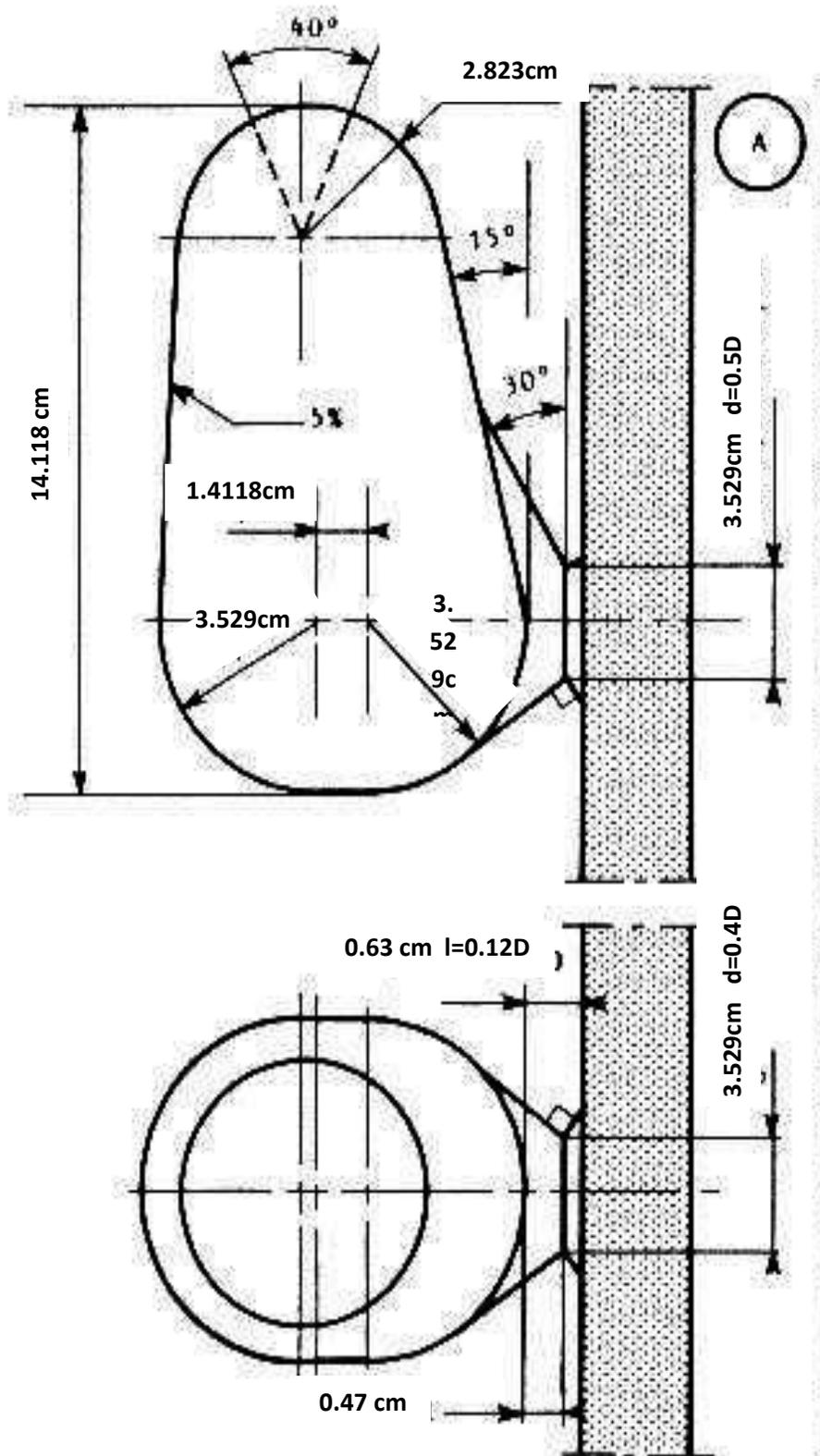


Figura 3.7. Dimensiones del alimentador y cuello para el sistema de colada.

3.6. Cumplimento de la regla de las contracciones.

Para esta regla se debe cumplir la siguiente ecuación, que representa la capacidad total de abastecimiento de metal líquido requerido proveniente del alimentador en función del volumen de la pieza problema y de su demanda líquida para compensar sus contracciones:

$$V_a > k' r V_p \quad (45)$$

Donde k' es la constante de contracción del alimentador y depende del tipo de alimentador que se trate, r es la contracción de un alimentador y se define como:

$$r = \frac{R}{100} \quad (46)$$

Donde R el porcentaje de contracción depende del tipo de aleación y del sobrecalentamiento y se encuentra tabulado en la literatura.

Entonces para k' se tiene un valor de 6 cuando para el alimentador empleado. Para un sobrecalentamiento de 100°C se tiene que $R=5.5$ para aceros con un contenido de carbono de 0.3%.

Sustituyendo los valores anteriores en la ecuación:

$$V_a > 6 \left(\frac{5.5}{100} \right) * 564.08 \text{cm}^3$$

$V_a > 186.1464 \text{ cm}^3$ *Volumen requerido para abastecer a la pieza problema.*

Si se obtiene el volumen de un cilindro con $D_0= 7.059 \text{ cm}$ y una altura semejante se obtiene:

$$V = \pi(3.5295 \text{cm})^2 * 7.059 \text{cm} = 276.26 \text{ cm}^3$$

Por tanto:

$276.26 \text{cm}^3 > 186.15 \text{ cm}^3$ Se cumple la regla de las contracciones

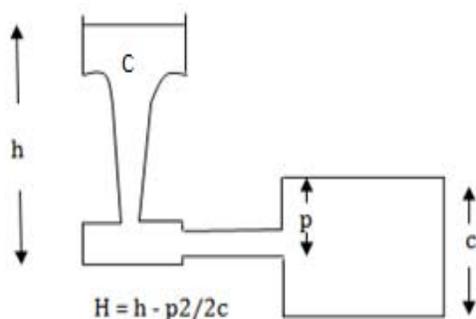
En la tabla número 6 se presentan las propiedades físicas de la aleación para el problema bajo estudio.

Densidad de la aleación	7.83 gcm ⁻³
Volumen de la pieza	564.08 cm ³
Peso de la pieza	4416.74 g
Volumen del alimentador	276.26cm ³
Peso del alimentador	2163.122 g
Volumen del metal total en el molde	840.34cm ³
Peso del metal total en el molde	6579.82 g

Tabla 7. Propiedades físicas del sistema de colada y alimentación.

3.7 Cálculo de la altura metalostática en base a la ubicación de la pieza en el molde.

Utilizando la línea de partición para ubicar la pieza problema se utiliza la figura 3.8 para los cálculos correspondientes.



H = Altura metalostática.

h = Altura del cope.

c = Altura de la pieza.

p = Altura de la pieza en el cope.

Figura 3.8. Determinación de la ubicación de la pieza problema con referencia al molde.

Sustituyendo valores esto se traduce en:

$$h = 12.8 \text{ cm}$$

$$c = 8.87 \text{ cm} \quad H = 12.8 \text{ cm} * \left[\frac{4.437 \text{ cm}(2)}{2(8.87 \text{ cm})} \right] = 6.4 \text{ cm}$$

$$\rho = 4.437 \text{ cm}$$

3.8 Cálculo del tiempo de solidificación.

Con el módulo significativo de la pieza problema de 1.337cm se interpola una línea recta en la sección de aceros según el nomograma de la figura 2.11 en el capítulo 2 se obtiene un tiempo $T_f = 12$ segundos, a partir del módulo significativo la pieza problema, tardará este tiempo en alcanzar la línea *líquidus*; este tiempo se toma como punto de partida para determinar el tiempo de vaciado, junto con las consideraciones vistas en el mismo capítulo, tomando un tiempo de vaciado de 7.5 segundos esto se hace para evitar algún defecto producido por la radiación sobre el material del molde.

3.9 Cálculo del área de estrangulamiento (parte inferior de la bajada).

Este dato se obtiene mediante la ecuación 37, vista en el capítulo 2 de este trabajo:

$$A_c = \frac{BV}{t\sqrt{2gH}}$$

B es determinado por la relación de colada que en este caso se trata de 1:2:1, el cual se definió en el capítulo 2, con los siguientes datos obtenidos del sistema de colada y de los diagramas de observados en el capítulo anterior.

$$h_d = 0.128 \text{ m}$$

$$L_0 = 0.063 \text{ m}$$

$$L_c = 0.145 \text{ m}$$

$$L = h_d + \frac{L_0 + 0.3L_c}{4} \quad L \text{ se expresa en unidad metro.}$$

Sustituyendo los valores antes proporcionados en la tabla 3 y determinando el valor B para este caso se tiene:

$$L = 0.125m + \frac{0.063m + (0.3(0.145m))}{4} = 0.151m$$

Para un valor $L=0.151m \rightarrow B=1.5$

Sustituyendo todos los valores obtenidos en la ecuación se obtiene el área inferior de la bajada:

$$A_c = \frac{1.5 * 934.18 \text{ cm}^3}{7.5 \text{ seg} \sqrt{2 * 980 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2} * 6 \text{ cm}}} = \frac{1041.27 \text{ cm}^3}{813.32 \text{ cm}} = 1.72 \text{ cm}^2$$

Para obtener el diámetro inferior de la bajada solo se despeja de la ecuación del área de un cilindro.

$$A = \pi \left(\frac{D_B}{2} \right)^2$$

$$D_B = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \left[\frac{4(1.72 \text{ cm}^2)}{\pi} \right]^{\frac{1}{2}} = 1.48 \text{ cm}$$

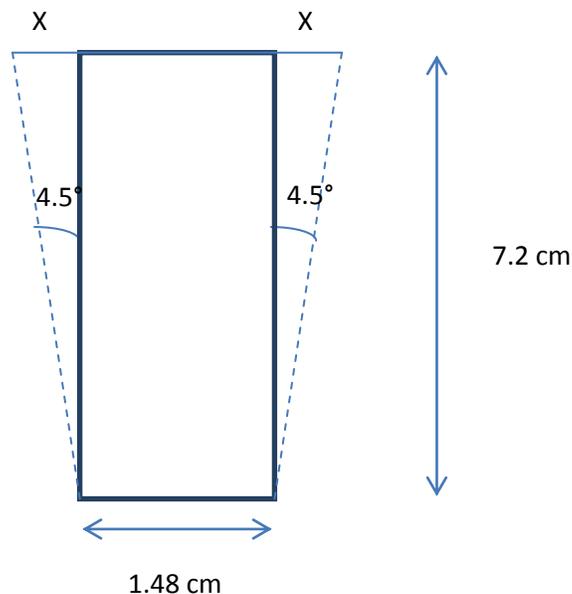


Figura 3.9. Diagrama de la bajada de un sistema de colada para determinar el diámetro superior.

3.10 Diseño de la bajada empleando un ángulo de salida de 4.5 grados.

A partir de los datos obtenidos con anterioridad se puede obtener este dato trigonométricamente, utilizando el concepto de la tangente de un triángulo rectángulo.

$$\tan 4.5^\circ = \frac{x}{7.2\text{cm}}$$

Ahora solamente se despeja a la incógnita para determinar el diseño total de la bajada con el ángulo recomendado.

$$x = 7.2\text{cm} (\tan 4.5^\circ) = 0.56\text{cm}$$

Como es el mismo ángulo para cada lado de la bajada, se traduce numéricamente a:

$$1.48\text{ cm} + 2(0.56\text{cm}) = \mathbf{2.60\text{cm}} \text{ Diámetro superior de la bajada.}$$

Finalmente se tendrá una bajada como lo muestra la figura 3.10.

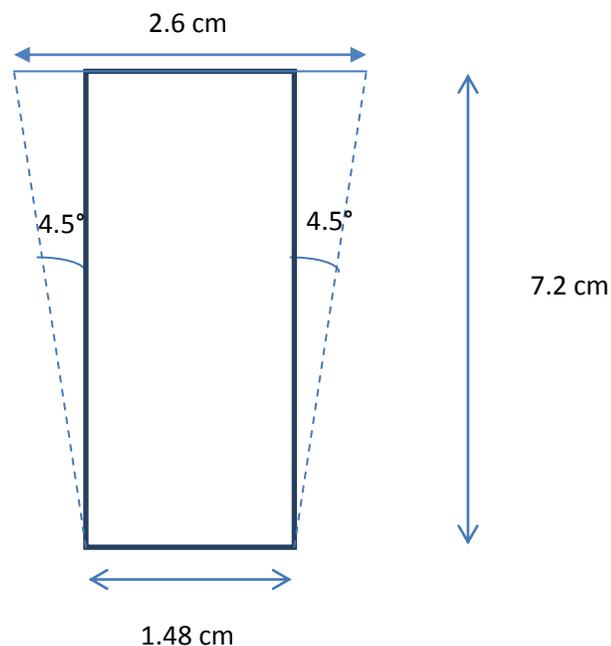


Figura 3.10. Diagrama de la bajada resuelto para el sistema de colada bajo estudio.

3.11 Cálculo del área transversal del corredor.

Conociendo la relación de colada (1:2:1) y el área de la bajada, se establece lo propuesto por Webster en el capítulo anterior, entonces, el área de del corredor es el doble del área de la bajada del sistema de colada.

$$A_c = 2A_b$$

$$A_c = 2(1.72\text{cm}^2) = \mathbf{3.44\text{cm}^2}$$

Estableciendo que el corredor es de geometría cuadrangular, entonces todos sus lados son iguales. Matemáticamente se puede expresar lo anterior como:

$$A = L^2$$

$$L = \sqrt{A} = \sqrt{3.44\text{cm}^2} = \mathbf{1.85\text{cm}}$$

Entonces el corredor a diseñar tendrá las dimensiones como se muestra en la figura 3.11.

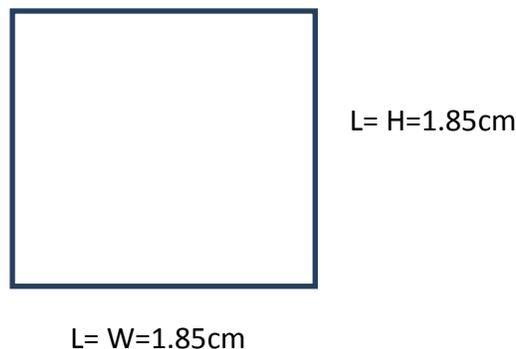


Figura 3.11. Diagrama del corredor y sus dimensiones.

3.12 Cálculo del área transversal de los ataques.

Se generarán 2 ataques en el sistema de colada debido a la magnitud de la pieza problema con una relación $W=4H$. Se sabe que el área transversal de los ataques es igual al área transversal de la bajada, y como se trata de dos ataques se tiene:

$$A_A = \frac{A_B}{2} = \frac{1.72\text{ cm}^2}{2} = \mathbf{0.86\text{cm}^2}$$

Si en el corredor se tiene la relación $H=W$, y en los ataques se tiene que $W=4H$, entonces se simplifica numéricamente como sigue:

Si $A_A = HW$ y $W = 4H$ entonces: $A = 4H^2$

Para obtener el valor de H:

$$H = \sqrt{\frac{A}{4}} = \sqrt{\frac{0.86\text{cm}^2}{4}} = 0.46\text{cm}$$

Entonces el ataque bajo estudio para el sistema a generar tendrá las siguientes dimensiones expresadas en la figura 3.12.:



Figura 3.12. Diseño de los ataques para el sistema de colada estudiado.

3.13 Diseño de la unión bajada-corredor.

Con todos los datos obtenidos se puede generar la unión bajada-corredor para el sistema de colada de la pieza problema, quedando dimensionada de la siguiente manera.

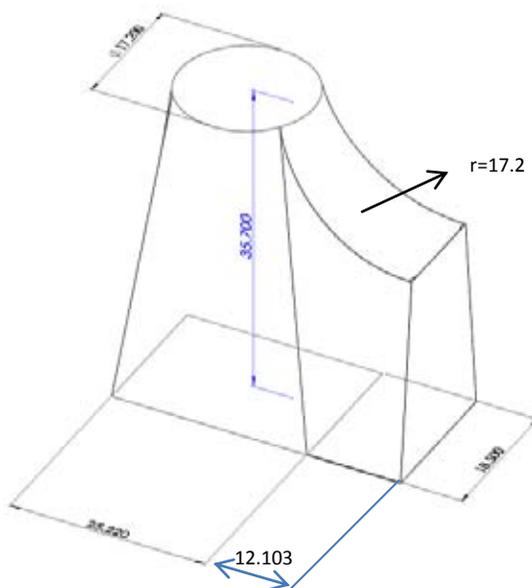


Figura 3.13. Esquema y dimensionamiento de la unión bajada corredor. Acotaciones dadas en milímetros (mm).

CAPITULO 4. DIGITALIZACIÓN DE LA PIEZA PROBLEMA EN EL SOFTWARE SOLID WORKS 2010 E INTRODUCCIÓN AL SOFTWARE PROCAST.

4.1 Generación del sistema de colada y alimentación en el software CAD Solid Works.

SolidWorks es un programa de diseño asistido por computadora para modelado mecánico desarrollado en la actualidad por SolidWorks Corp., una subsidiaria de Dassault Systèmes (Suresnes, Francia), para el sistema operativo Microsoft Windows. Es un modelador de sólidos paramétrico. Fue introducido en el mercado en 1995 para competir con otros programas CAD como Pro/ENGINEER, NX, Solid Edge, CATIA, y Autodesk Mechanical Desktop.

El programa permite modelar piezas y conjuntos y extraer de ellos tanto planos como otro tipo de información necesaria para la producción. Es un programa que funciona con base en las nuevas técnicas de modelado con sistemas CAD. El proceso consiste en trasvasar la idea mental del diseñador al sistema CAD, "construyendo virtualmente" la pieza o conjunto. Posteriormente todas las extracciones (planos y ficheros de intercambio) se realizan de manera bastante automatizada. En los renglones siguientes se explica a detalle la generación de la pieza que se generará a una escala real de 1:1 para no confundir al lector al momento de realizar los cálculos pertinentes. Con respecto a las unidades de medición, el programa se basa en milímetros para el sistema decimal, así que todas las dimensiones acotadas serán a base de este tipo de medida.

A continuación se enlistan la secuencia de pasos ejecutados para la construcción de la pieza problema y se describen con detalle para futuras aplicaciones.

- I. Para iniciar el programa el programa se requiere un documento en blanco, entonces se elige la opción **Nuevo**. En el ícono  (figura 4.1).

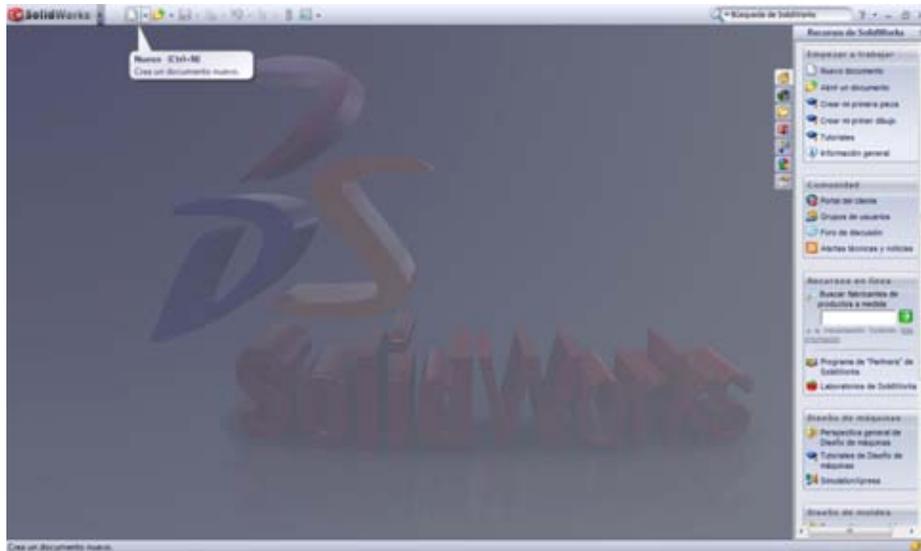


Figura 4.1. Interfaz de inicio de Solid Works 2010.

- II. Una vez realizada la elección aparece una interfase distinta en la cual se elige la opción **Pieza /Aceptar**.

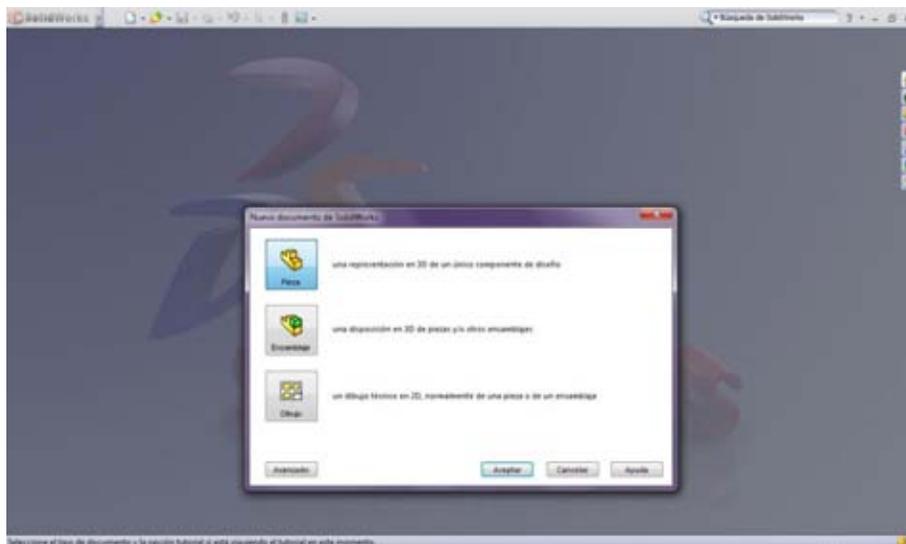


Figura 4.2. Menú de opciones para diseño en la interfaz de inicio.

- III. Enseguida aparecerá el menú de inicio de construcción para la pieza problema. Los planos donde se trabajará será *Planta* y *Alzado*. Existe un gestor de diseño

en la parte lateral izquierda que muestra el historial de las acciones realizadas en los planos por orden de aparición.

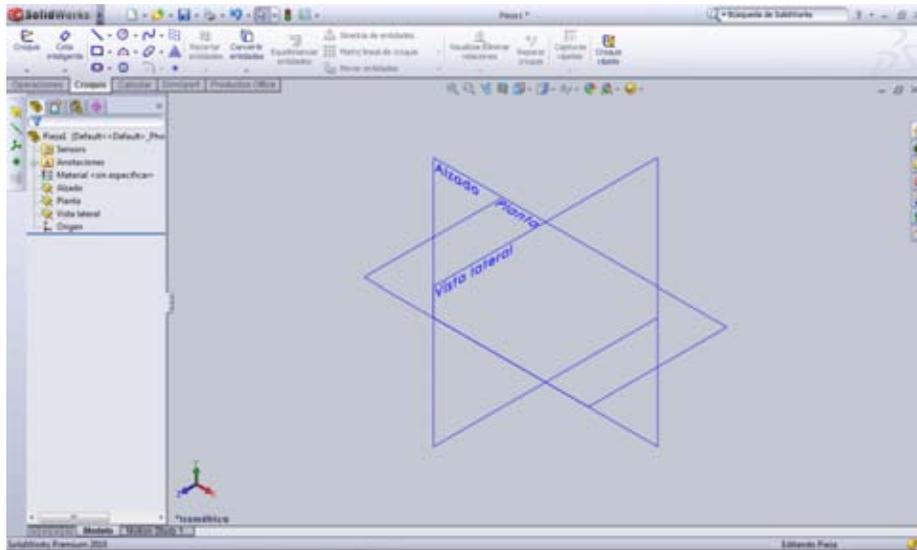


Figura 4.3. Planos de referencia para el trabajo y su espaciado dimensional.

- IV. Para generar la primer parte del sistema de alimentación, el cual se trata de la unión bajada-corredor, se va realizar el siguiente procedimiento: La primera parte se genera mediante la opción de recubrimiento  de dos croquis detallados con un cuadrado de dimensiones 25.22 x 11.3 mm en el plano *Planta*, y un círculo de 17.2 mm de diámetro en un plano paralelo a una distancia de 35.7 mm.

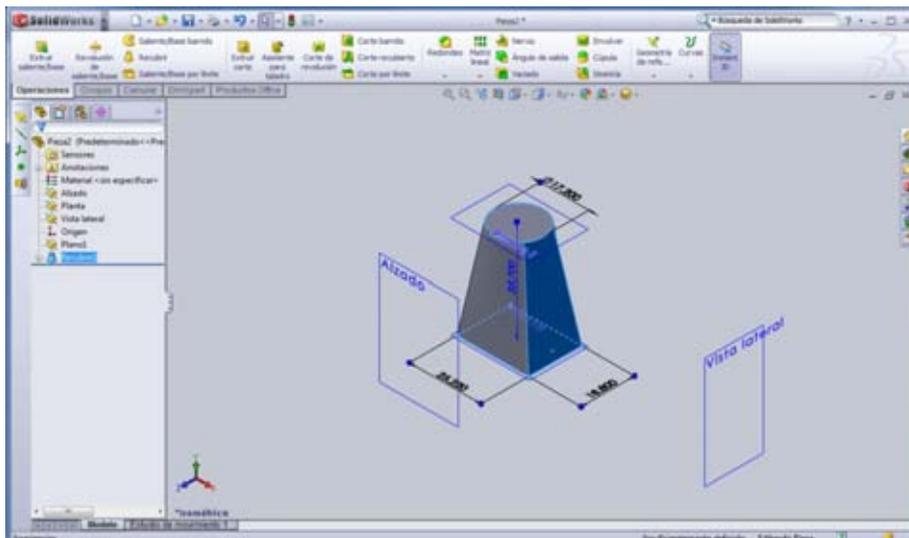


Figura 4.4. Operación de recubrimiento para generar la unión bajada corredor.

- V. A continuación se realiza una operación de extrusión de 270 mm a una sección de la pieza pasada con una altura de 22.8 mm para generar el corredor y el radio de curvatura de la unión bajada-corredor. Para generar este sólido es necesario crear un plano adyacente a la cara resaltada en azul, ya que se trata de un sólido irregular. Cuando se crea el corredor se utiliza el borde de la sección adjunta a la pieza anterior para generar la curvatura de 17.2 mm. Véase figura 4.5.

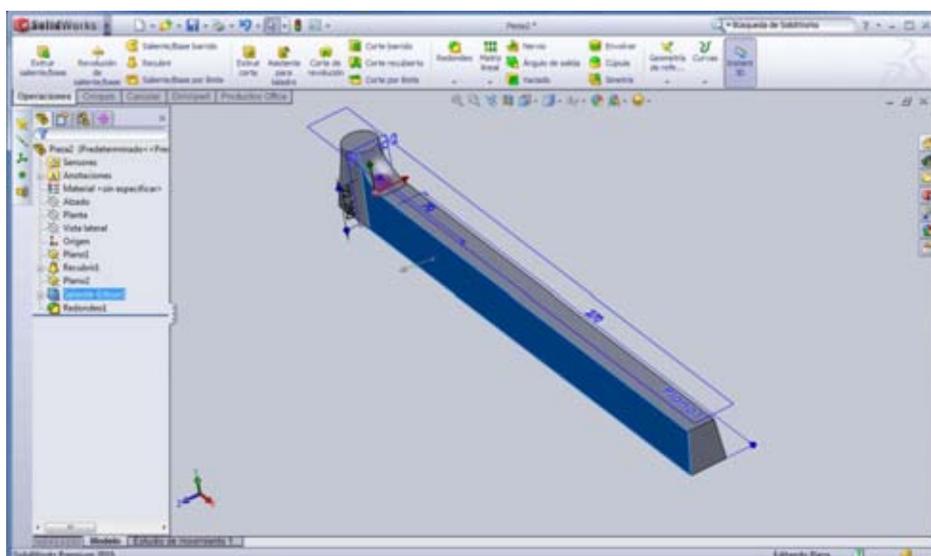


Figura 4.5. Extrusión del corredor a una distancia de 270mm.

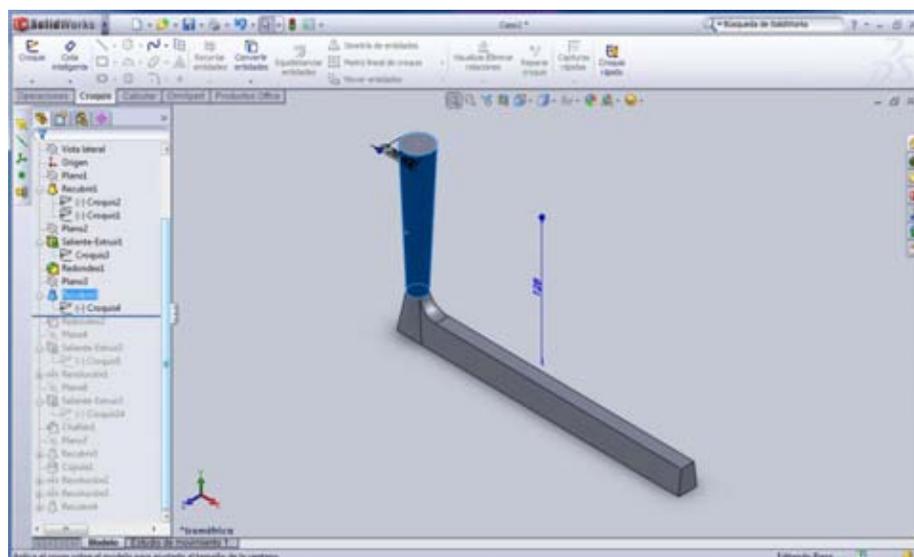


Figura 4.6. Operación de recubrimiento para generar la bajada del sistema de colada.

- VI. Seguido de esta operación se genera la bajada del sistema de colada calculado. Esta sección, representada en la figura 4.6 se genera mediante la acción de recubrimiento del círculo superior de la unión bajada-corredor con una dimensión de 28.4 mm de diámetro en un plano paralelo a 128 mm de distancia.
- VII. Para generar los ataques, que en este sistema son 2, se genera un plano adyacente al corredor y un croquis de dos cuadriláteros de dimensiones 4.6 x 1.85 mm. separados a una distancia de 145 mm en el centro del corredor que posteriormente se extruirán a 71 mm de distancia.

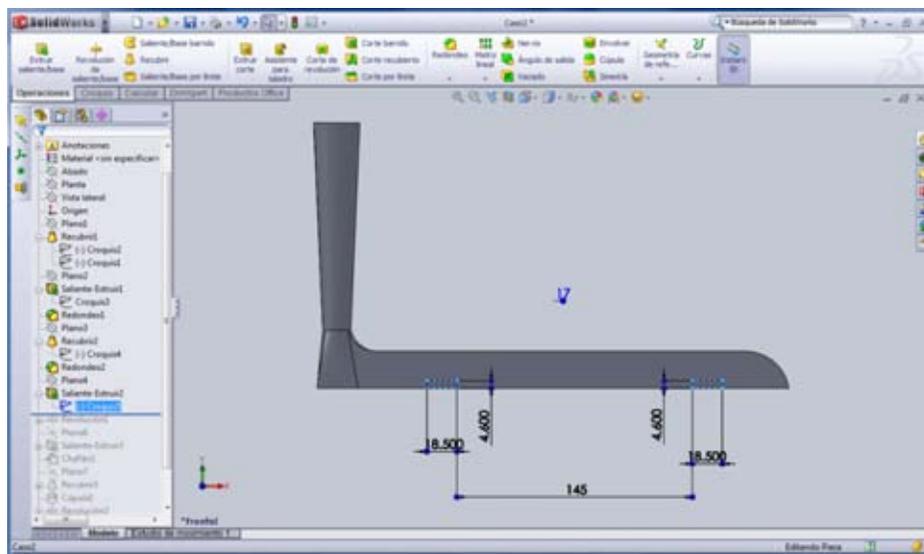


Figura 4.7. Generación de los ataques por medio de una operación de extrusión y la generación de un plano adyacente al corredor.

- VIII. Cuando se tienen los ataques se procede a crear la pieza problema, esta se logra con una acción de “*Revolución base/saliente*”, únicamente creando el croquis de la pieza y revolucionando a 360°

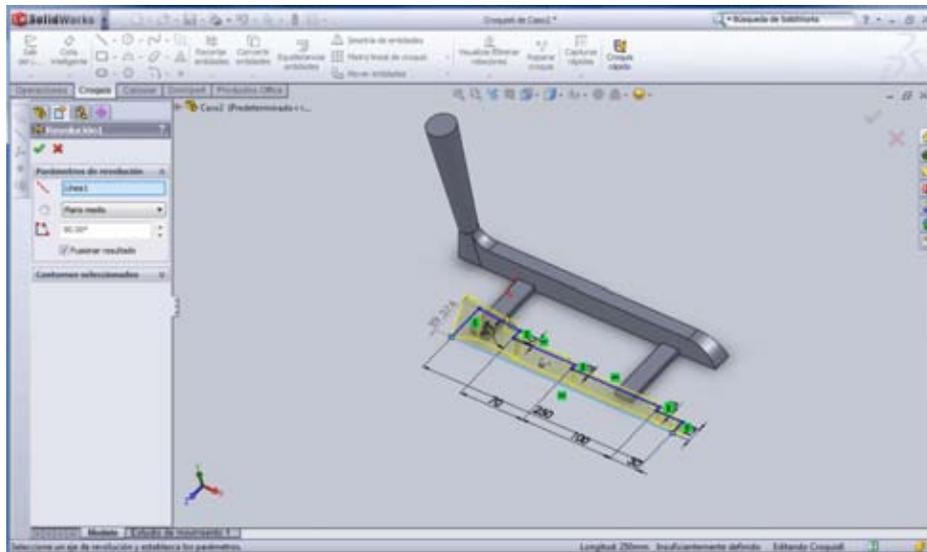


Figura 4.8. Generación de la pieza problema a partir de la operación *Revolución base/saliente*.

- IX. Cuando la pieza problema se ha creado totalmente se dispone a construir el alimentador para el cual primero se prepara la zona donde hará conexión, esta es en la parte superior de la pieza problema. En este punto se necesita una extrusión de un ataque cuadrado de 35.29mm con una longitud de 1mm y un chaflán de la misma medida.

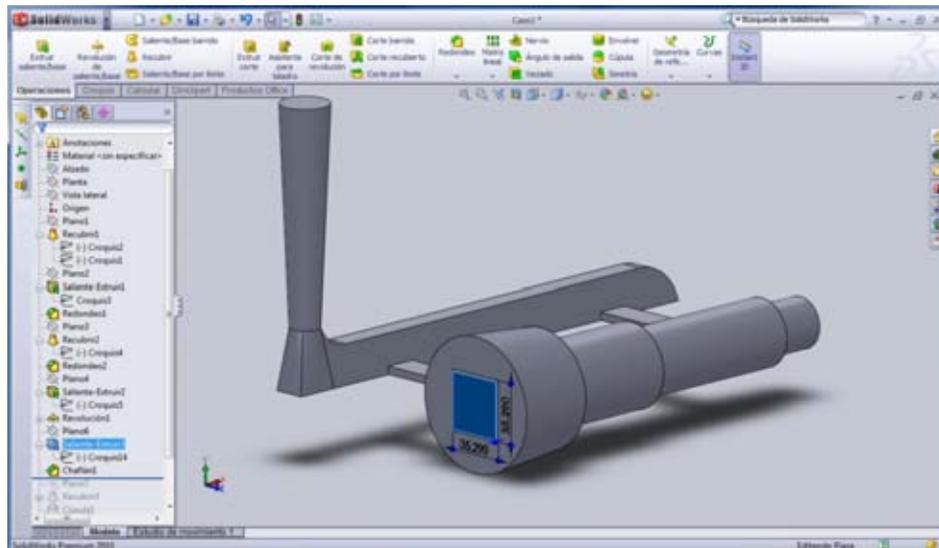


Figura 4.9. Extrusión de la unión corredor-pieza problema.

- X. Para el alimentador se utilizan varias operaciones que se mencionarán ordenadamente. Primeramente se genera un recubrimiento entre una elipse de dimensiones 84.698mm x 74mm del plano *Planta* y un círculo con una dimensión de 56.46mm de diámetro en un plano paralelo a 110mm de separación del primero. Este recubrimiento se genera a 4.2mm de distancia del ataque de la pieza problema.

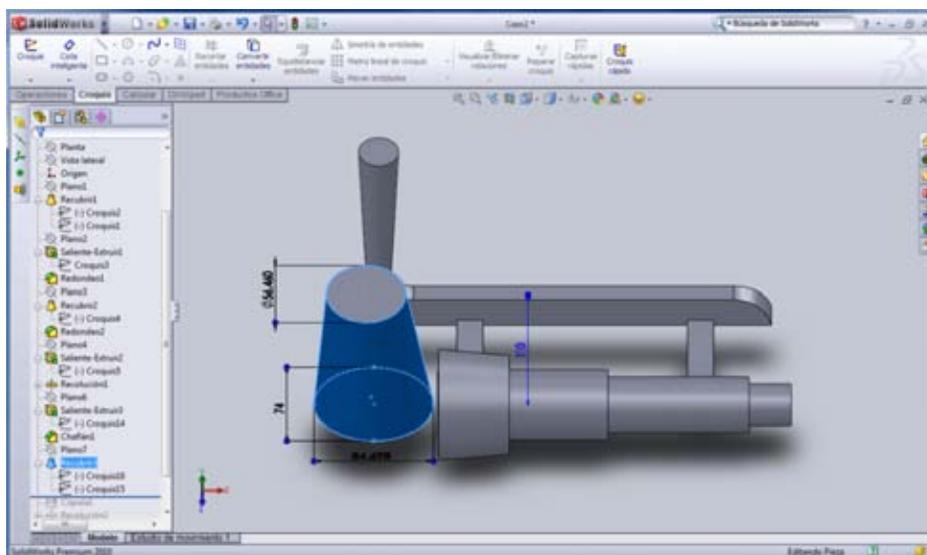


Figura 4.10. Primera parte de la generación del alimentador con las dimensiones requeridas y una operación de recubrimiento.

- XI. Teniendo el primer sólido que formará al alimentador según las especificaciones, se crea una cúpula en la parte inferior del recubrimiento con un radio de 30.118mm.

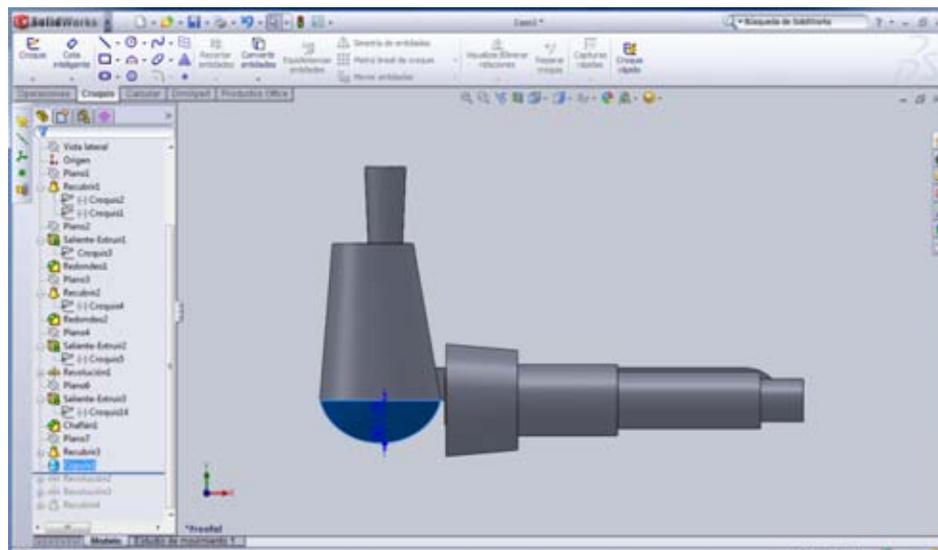


Figura 4.11. Segunda operación para la construcción del alimentador.

- XII. Para la parte superior se realizan 2 croquis de semiesferas con operaciones de “*Revolución de base/saliente*” con una apertura de 70°, para descontar los 40° de apertura según las especificaciones de la figuras 3.6 y 3.7.

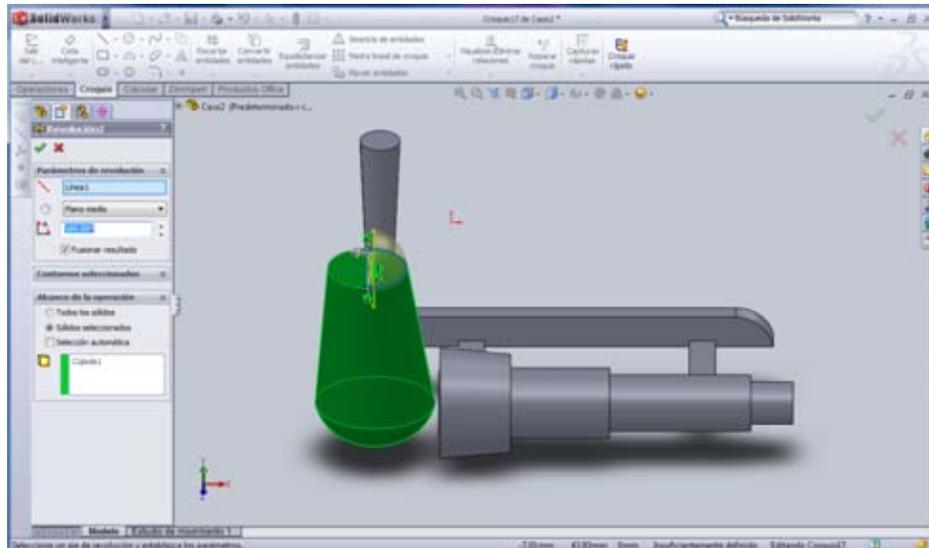


Figura 4.12. Tercera operación para la generación completa del alimentador.

- XIII. Para unir a la pieza problema con el alimentador se utiliza una operación de recubrimiento entre la extrusión y un croquis de dimensiones, mostrada en la figura 4.13.

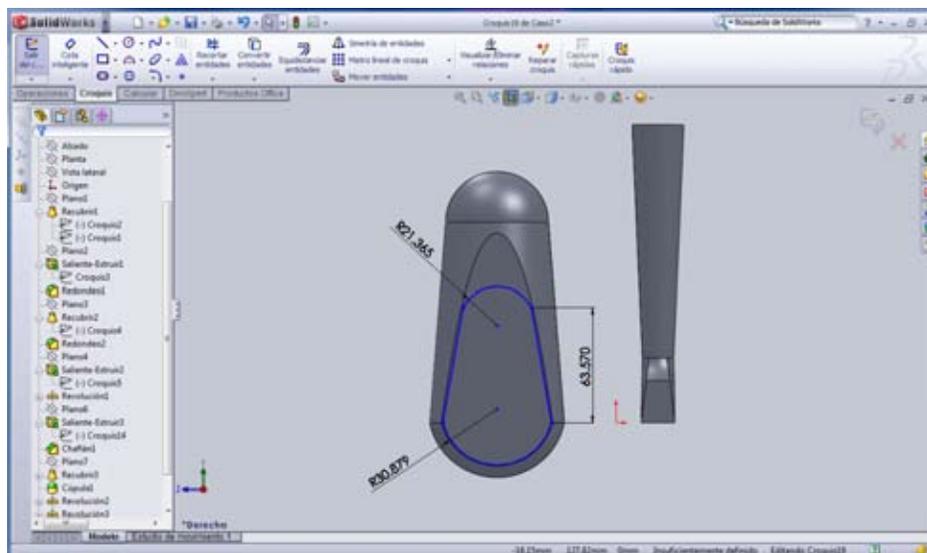


Figura 4.13. Operación de recubrimiento para unir a la pieza problema con el alimentador.

XIV. Por último se detalla el sistema de colada para que tome la forma de las especificaciones según los cálculos requeridos y las geometrías especificadas.

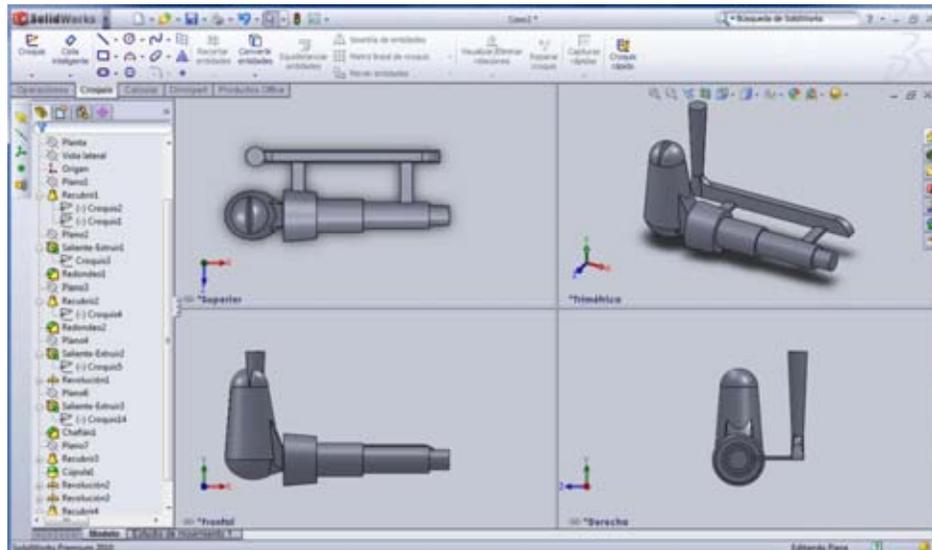


Figura 4.14. Vistas de la pieza problema en el visualizador de imágenes de Solid Works 2010.

4.2 Generalidades y usos del software ProCAST.

En la actualidad las simulaciones se adentran más y más al campo industrial debido que representan un gran número de ventajas tales como la solución de un problema sin solución analítica. Resultan ser de gran ayuda para lograr una solución, siendo este método, el único método de solución en muchos casos. Económicamente hablando, permite la experimentación en condiciones que podrían ser de riesgo personal o monetario en el sistema real; en general contribuyen a la reducción del riesgo inherente a la toma de decisiones.

Una de las desventajas que se pueden presentar es que las soluciones no son del todo exactas y existe el riesgo de tomar malas decisiones basadas en modelos de simulación que no han sido validados y verificados adecuadamente.

En los sistemas de colada este procedimiento es de gran ayuda ya que se puede generar un ahorro económico en mano de obra y materiales debido a la anulación de la experimentación.

En la actualidad existen muchos programas especializados que se utilizan en la industria para la simulación del proceso de fabricación de piezas. Un software de los más completos es ProCAST.

ProCAST es un software especializado en modelos de fundición para los requerimientos de la industria. Está basado en el proceso de resolución numérica conocida como elemento finito (FEM, por sus siglas en inglés), esto permite la predicción de distorsiones y esfuerzos residuales, además puede adentrarse en procesos específicos como semisólidos, núcleo de soplado, centrífugo, cera perdida y colada continua. El software cual permite el modelado de la Transferencia de Calor (flujo del calor), incluyendo la radiación con factores de visión, el Flujo de Fluido, incluyendo el llenado del molde, las Tensiones junto completamente con la solución termal (Termomecánica). Junto con todo esto, se puede observar la microestructura y la porosidad de las piezas modeladas.

4.2.1 Generalidades del software ProCAST.

Para poder generar una simulación de colada para un sistema de alimentación cualquiera, se debe conocer la organización del programa, ya que existen varios pasos antecedentes antes del modelo. Estos datos se generan en distintos módulos los cuales son:

- MeshCAST.
- PreCast.
- DataCAST/ProCAST.
- ViewCAST.



Figura 4.15. Interfaz de inicio de ProCAST 2008.

- MeshCAST.

Es una interfase preparatoria para los cálculos, la cual se determinan los nodos o piezas de reconocimiento para la generación de una malla, en esta fase se genera el tipo de material, las aristas reconocidas regulares, la magnitud de los nodos y el reconocimiento virtual entre ellos, aparte de otras funciones de diseño en caso de ser requerido.

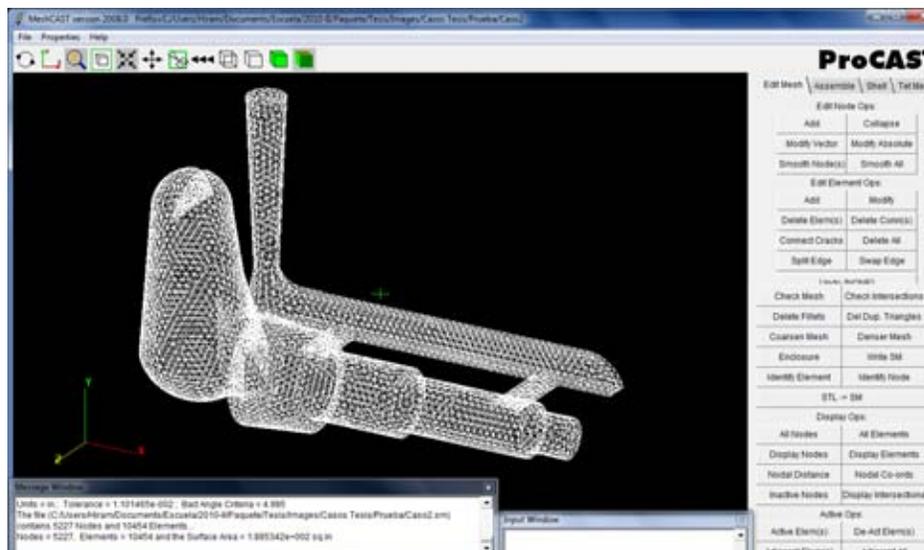


Figura 4.16. Pieza problema en el módulo MeshCAST.

La malla y los arreglos que se tienen que realizar para preparar el sistema de colada se muestran en el diagrama de flujo representado en la figura 4.17:

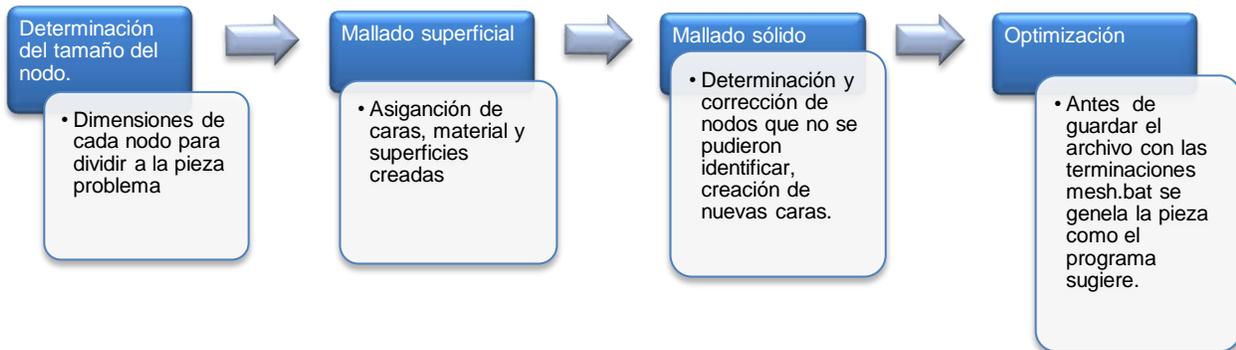


Figura 4.17. Diagrama de flujo para la secuencia de arreglos antes de correr las simulaciones del sistema bajo estudio.

- PreCAST.

En este módulo se agregan los datos condicionantes de la pieza problema, tales como dimensiones del molde virtual, tipo de material de la pieza problema y el molde, condiciones a la frontera, condiciones internas de velocidad y temperatura, velocidad de vaciado, magnitud del coeficiente de transferencia de calor (h), propiedades constantes de temperatura para el inicio entre otras opciones. Cabe mencionar que el software consta de una gran variedad de datos termodinámicos y de materiales para la colección de piezas en distintos materiales. El proceso se muestra en el diagrama de flujo de la figura 4.18.

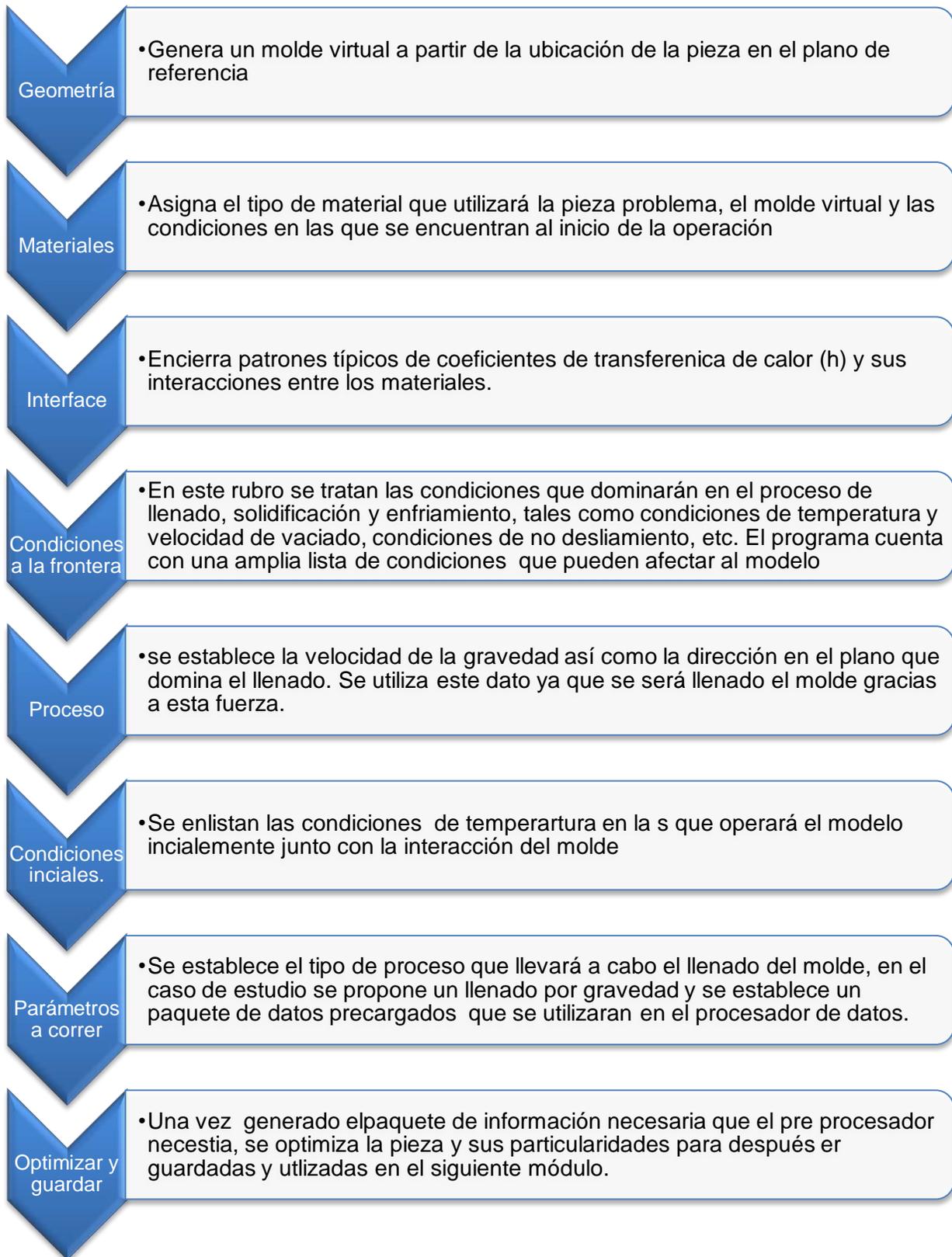


Figura 4.18. Diagrama de flujo de la metodología del módulo PreCAST.

Habiendo conocido el proceso de funcionamiento del software se establecerán las condiciones para simular las posibilidades de los hallazgos a encontrar en el caso de estudio planteado en este trabajo.

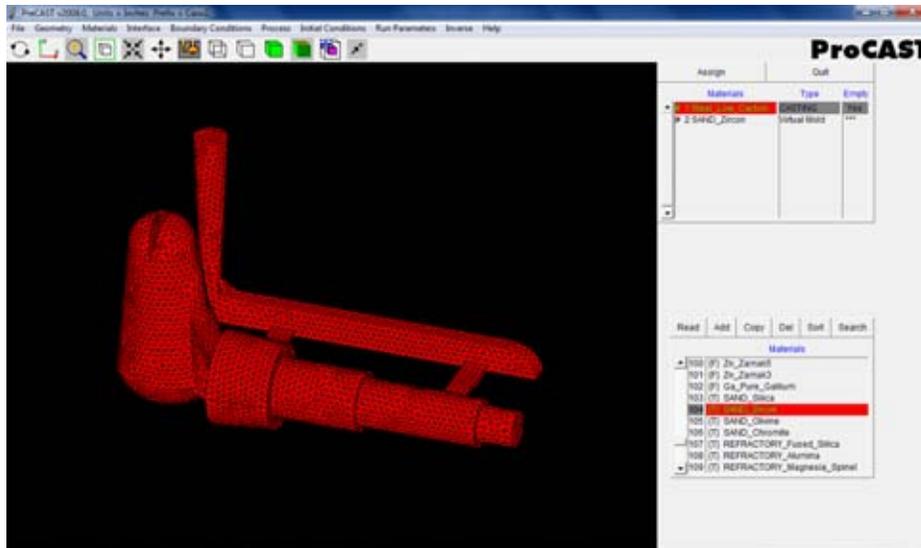


Figura 4.19. Pieza problema en el módulo ProCAST.

- DataCAST y ProCAST.

El primer módulo genera los datos condicionales junto con el segundo módulo. Por último los resultados obtenidos se pueden visualizar en el módulo ViewCAST.

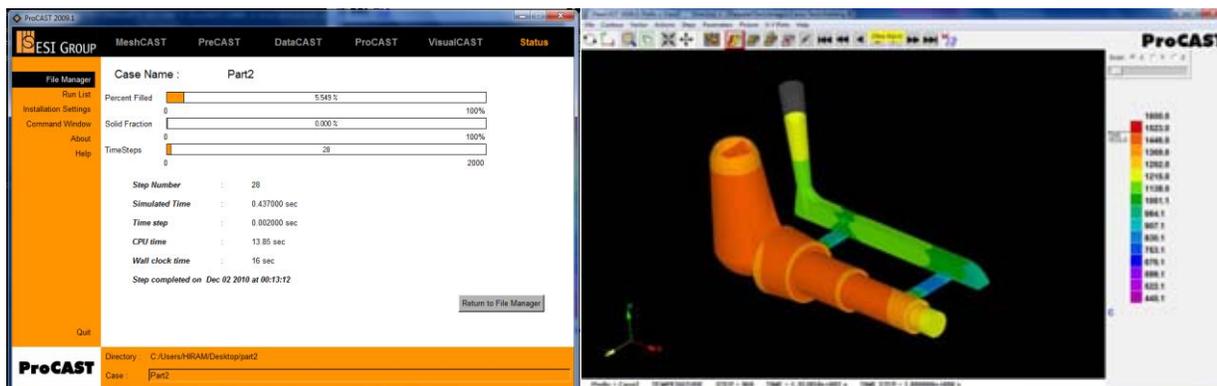


Figura 4.20. Avance de resultados en DataCAST y revisión del caso en ViewCAST.

En general el programa PROCAST mantiene un orden de función establecido en la secuencia del diagrama de flujo presentado a continuación.

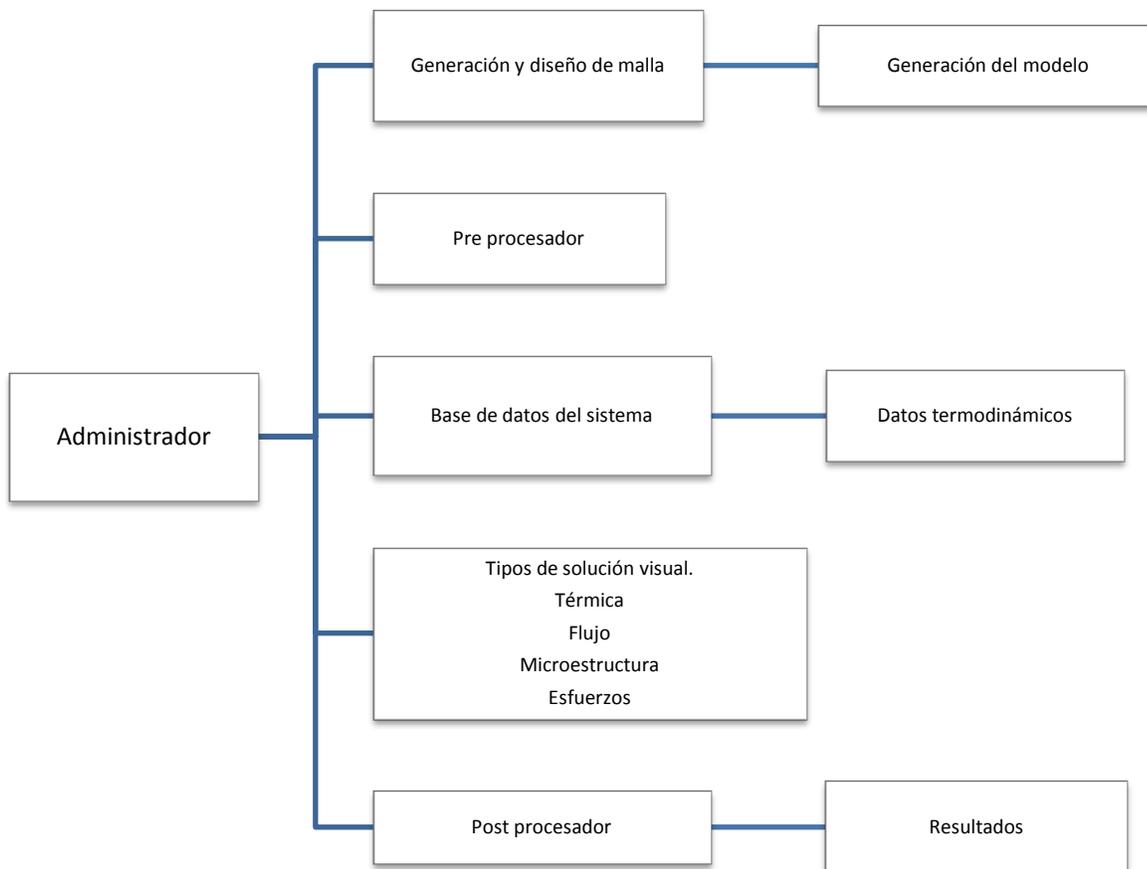


Figura 4.21. Secuencia de pasos para generar un modelo en el software ProCAST.

4.2.2 Características de evaluación de ProCAST.

El software, una vez desarrollado el modelo, prevé resultados para la prevención de defectos o técnicas alternas para prevenirlos, mientras tanto la visualización permite una

visión del comportamiento en condiciones ideales en una pieza colada. Todo esto se resumirá a continuación con una explicación detallada del potencial del programa si se usa adecuadamente. Se tomará un caso en el cual el sistema de colada no presenta un sistema de alimentación.

4.2.2.1 Velocidad del fluido

Esta característica permite al observador determinar zonas de turbulencia mediante vectores que indican la magnitud de la velocidad que pueden afectar al modelo de arena en la fundición, así como la predicción futura de defectos o alteraciones en la calidad de la pieza. Tal como se puede apreciar en la figura 4.22, este concepto de velocidad puede resultar importante para reconocer zonas de posible atrapamiento de escorias, gases y formaciones de óxidos, además de corroborar la efectividad del modelo del sistema de colada en los ángulos recomendados para disminuir la turbulencia al momento del llenado.

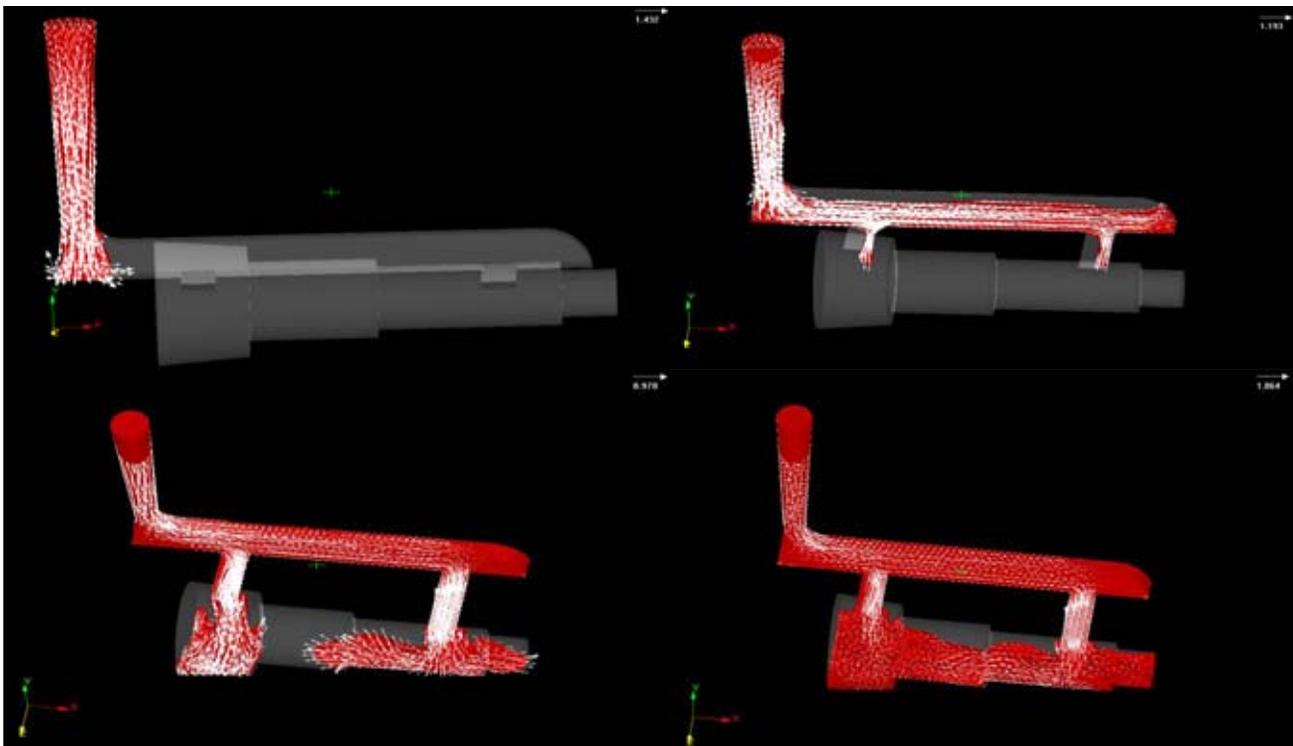


Figura 4.22. Evolución de los vectores de velocidad al llenar el molde y las magnitudes expresadas gráficamente en flechas blancas.

4.2.2.2 Presión de llenado.

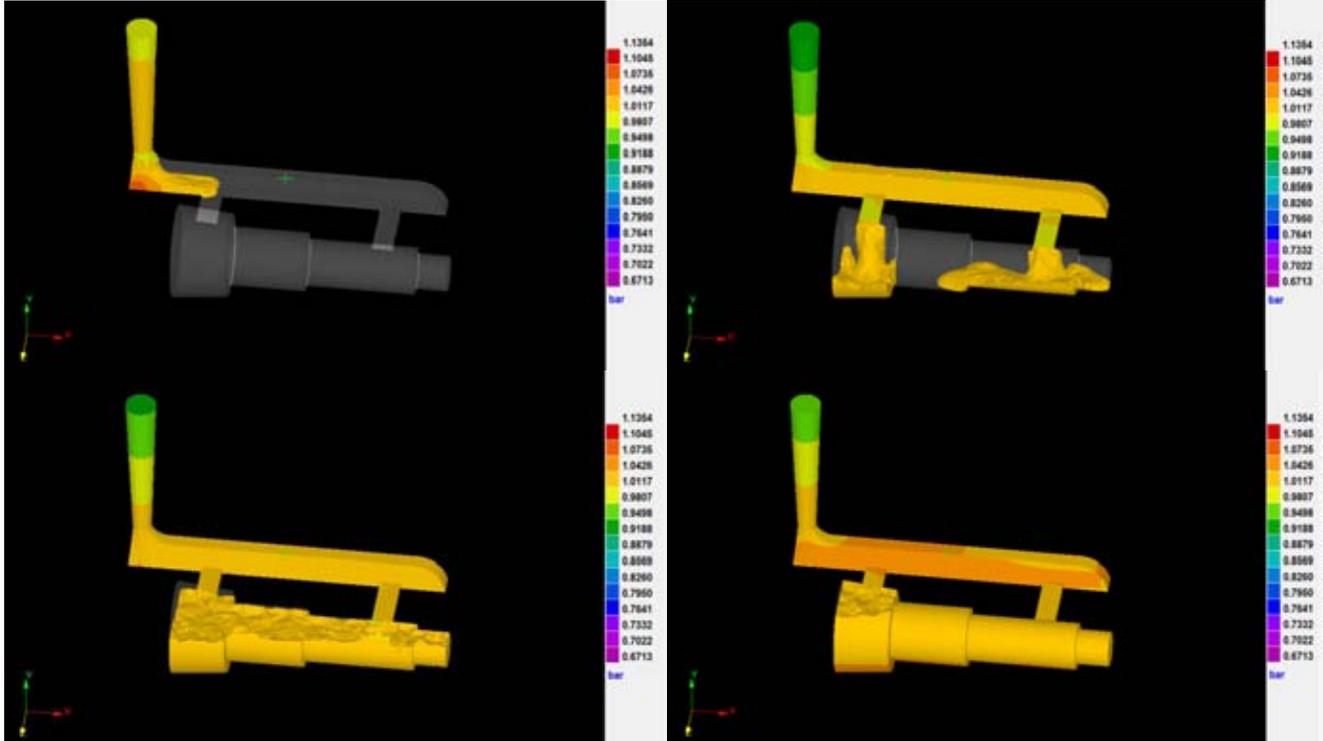


Figura 4.23. Presión de llenado para una pieza problema, la escala cromática refleja la magnitud de esta propiedad en unidades Bar.

Al igual que la magnitud vectorial del fluido, la presión de llenado afecta directamente a la velocidad de llenado, provocando lesiones internas en la pieza por la expansión volumétrica y la resistencia interna del molde dando como resultado una pieza con defectos superficiales debido a la acumulación de gases, ya que no se cuenta con una salida alterna. La escala cromática refleja la magnitud de la presión en las zonas de la pieza problema.

4.2.2.3 Tiempo de llenado.

Muestra la cantidad de tiempo que toma llevar la demanda líquida de metal a todo el molde, es un factor que influye para calcular el tiempo de llenado, la velocidad de llenado y la temperatura de vaciado para una pieza problema. Con esta herramienta visual se

pueden hacer predicciones acerca de los posibles defectos que la pieza puede contener debido a la contracción térmica y la formación de rechupes dentro de la pieza.

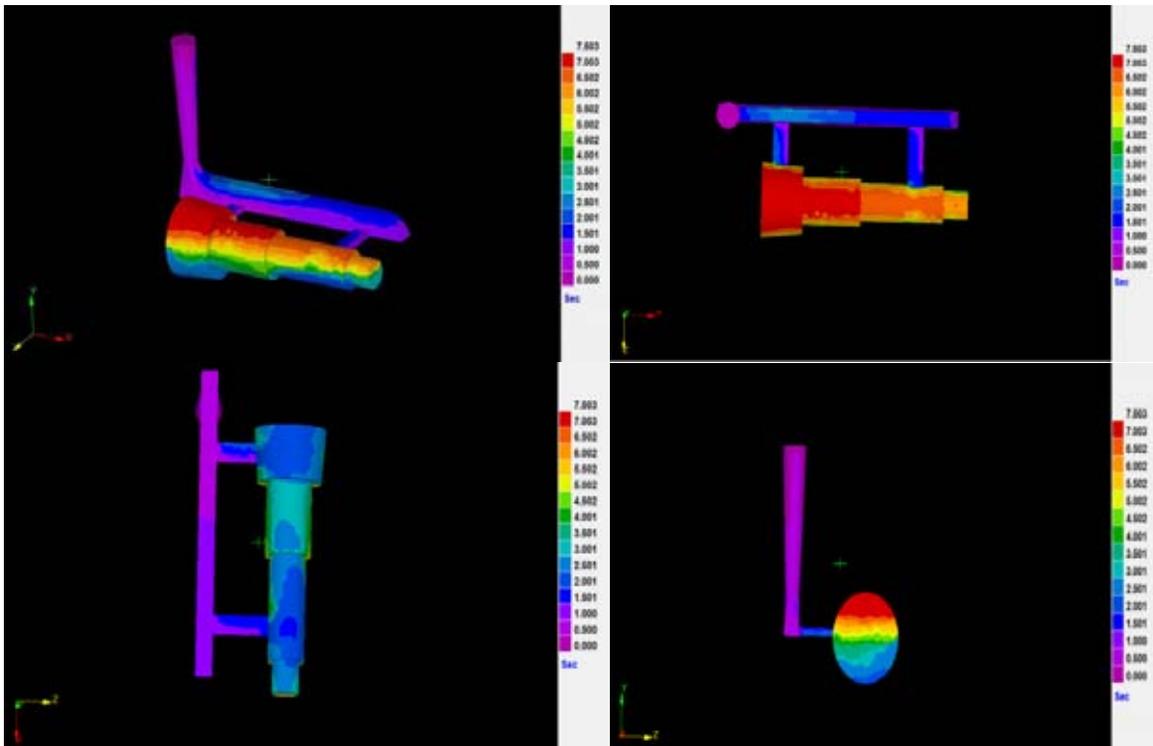


Figura 4.24. Escala cromática del tiempo de llenado, la escala parte del color morado para tiempos de 0 segundos hasta el color rojo que es el tiempo de llenado propuesto de 7.5 segundos.

Para la parte térmica ProCAST cuenta con una amplia variedad de determinación de defectos en las zonas externas e internas así como la fracción sólida, el tiempo de solidificación, los poros abiertos a la atmósfera, los rechupes, etc. En las siguientes líneas se describen las características más importantes para predecir algunos aspectos térmicos de una pieza problema.

Antes de iniciar el análisis interno se tiene que establecer un plano de referencia para el estudio, para esto existe la opción *picture: slice* la  cual permite realizar un corte en la dirección deseada, ya que el cilindro es la zona de interés, entonces se establecerá un plano normal en la dirección z justamente a la mitad de la pieza tal como lo muestra la figura 4.25.

Cuando se tiene la zona de estudio se presentan las predicciones térmicas a partir del modelo generado por el software.

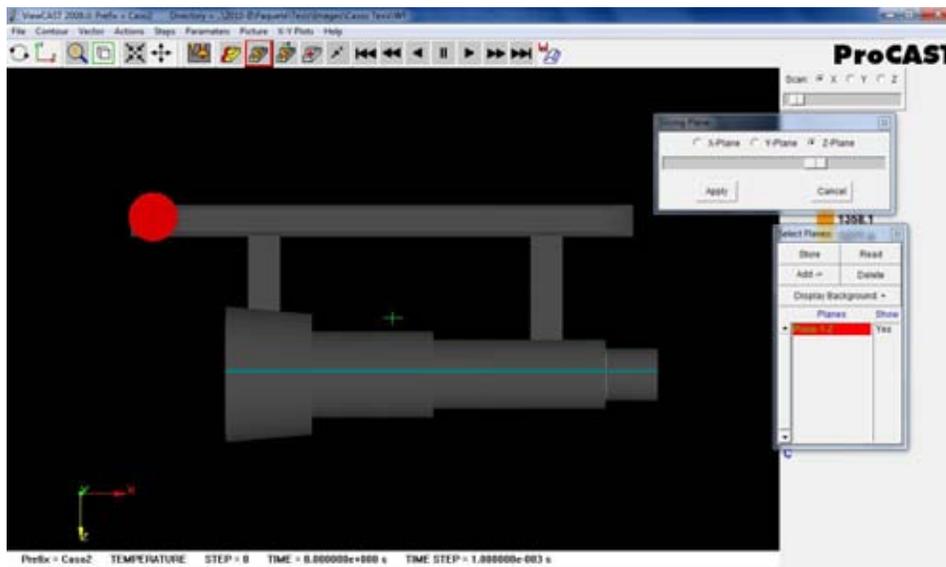


Figura 4.25. Realización de corte normal al plano z.

4.2.2.4 Temperatura.

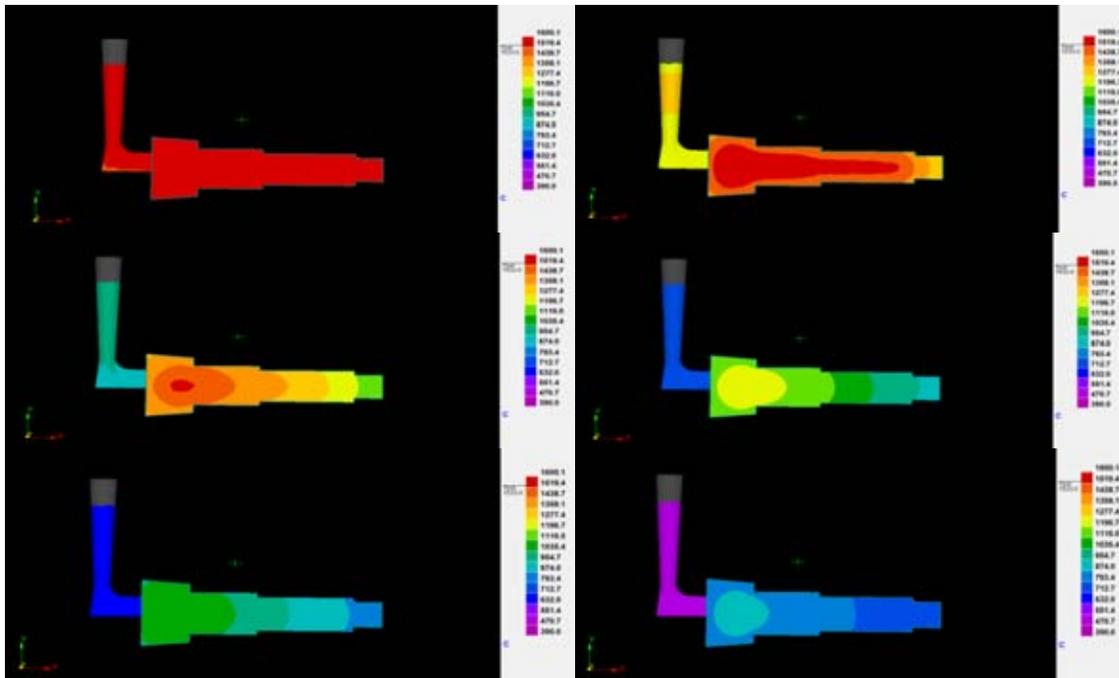


Figura 4.26. Secuencia de enfriamiento de una pieza problema en ProCAST.

Presenta las isotermas a través del tiempo de llenado y solidificación en la zona media de la pieza problema en escala cromática.

4.2.2.4 Fracción sólida.

Permite la observación del proceso de solidificación a través del tiempo, esta herramienta suele ser útil para detectar puntos calientes y zonas que enfrían al final para la prevención de defectos por contracción, y ser corroborados por la secuencia de cálculos expuestos.

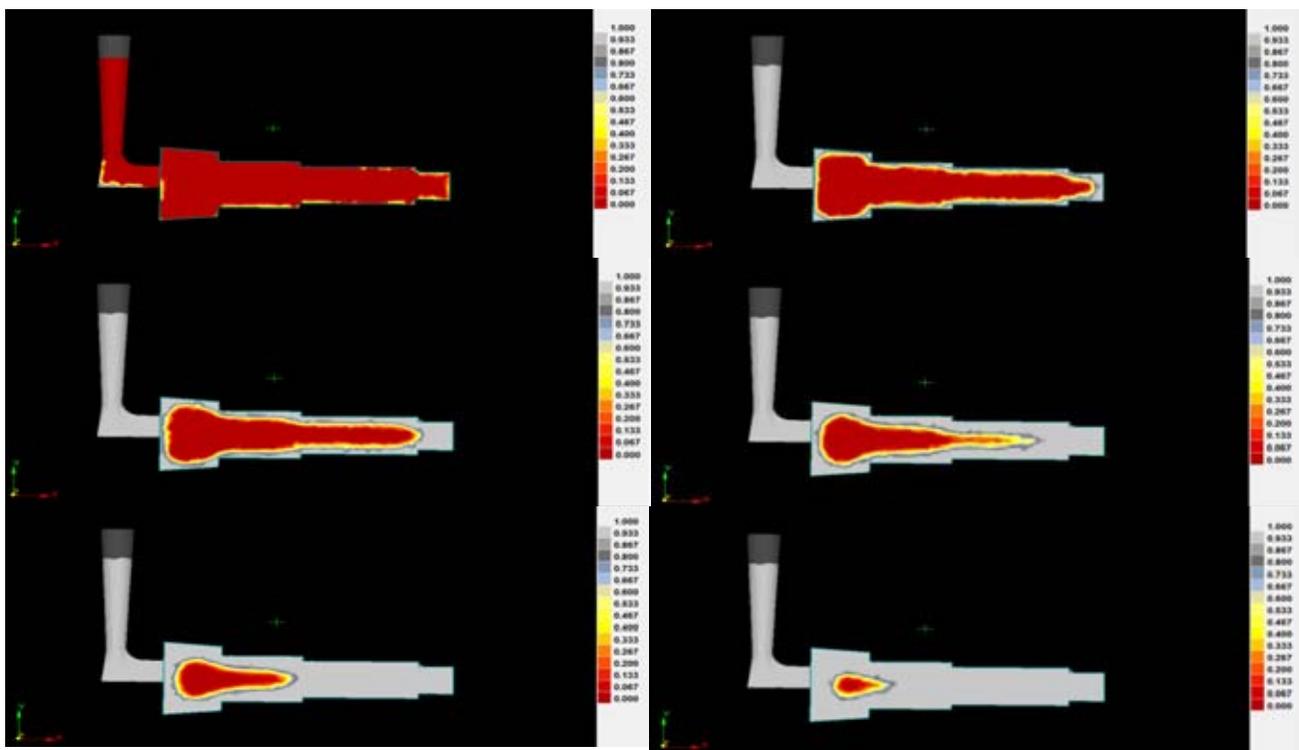


Figura 4.27. Evolución de la dirección y proceso de solidificación predicho por el Software CFD.

4.2.2.5 Tiempo de solidificación.

Muestra las zonas que tienen un patrón similar de solidificación mediante isotermas, dando a conocer los puntos calientes y la predicción de defectos por contracción a través del tiempo, mientras evoluciona la solidificación de la pieza problema. Véase figura 4.28.

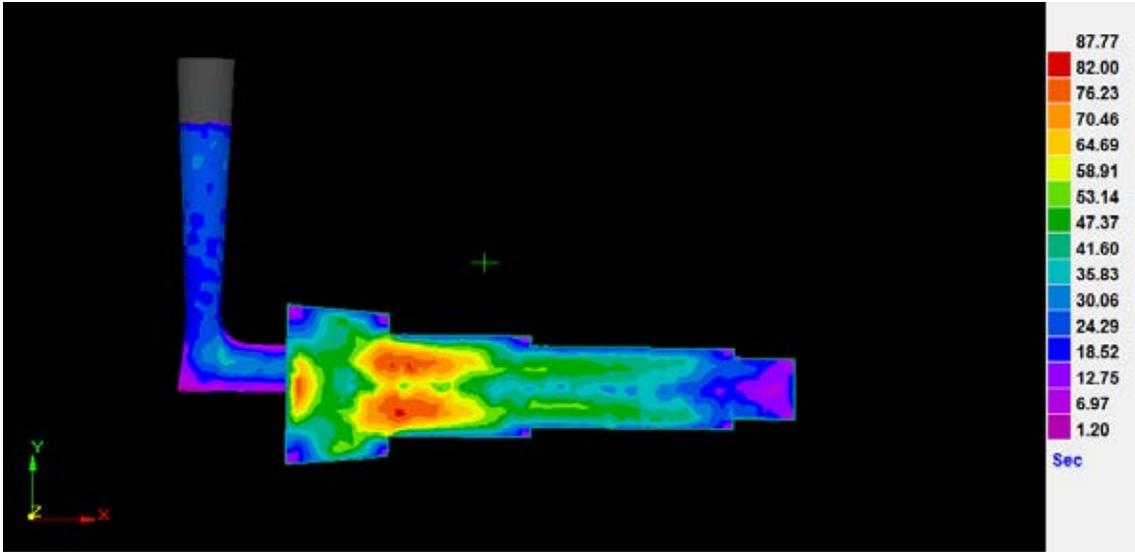


Figura 4.28. Tiempo de solidificación presentado por escala cromática en unidades de segundo (tiempo).

4.2.2.6 Detección de defectos por contracción.

Una vez analizado todos los fundamentos térmicos se puede predecir la aparición de rechupes y poros internos que afectan la calidad de la pieza problema, dando como resultado una posible cadena de defectos a la hora de ser tratado, maquinado o simplemente al remover el molde. Véase figura 4.29.

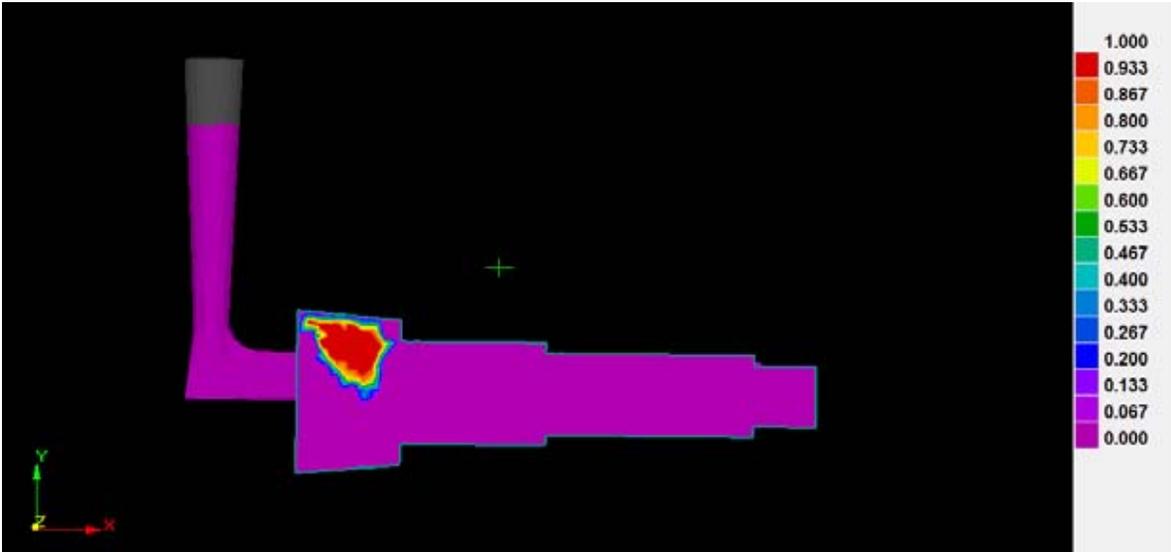


Figura 4.29. Detección de defectos por contracción en el software CFD.

CAPITULO 5. CASOS DE ESTUDIO Y RESULTADOS.

Se establecieron 4 casos de estudio para comprobar la efectividad del método de cálculo del sistema de alimentación y presentar los resultados adecuados. Los casos a estudiar son:

- Sistema de colada sin la presencia de un alimentador.
- Sistema de colada con un sistema de alimentación defectuoso.
- Sistema de colada y alimentación calculado con la metodología establecida y mostrada en este trabajo, respetando las tres reglas de alimentación.
- Sistema de colada y alimentación calculado con la metodología establecida y mostrada en este trabajo, respetando las tres reglas de alimentación con un sobre calentamiento hasta 1700°C.

Los casos de estudio se diseñaron en el software Solid Works 2010 y se corrieron en el Software ProCAST 2008. Estos resultados se presentan a continuación.

5.1 Casos de estudio.

- Caso 1. Sistema de colada sin la presencia de un alimentador.

En la figura 5.1 se muestra una secuencia de imágenes asociadas con el llenado y enfriamiento de la pieza de acero bajo estudio, colada en un molde de óxido de zirconio a una temperatura de colada de 1600°C para el acero y una temperatura inicial de 30°C para el molde, el tiempo de llenado es de 7.5 segundos, no existe presencia del sistema de alimentación. En la Figura 5.1a se observa el campo superficial de temperaturas del conjunto sistema de colada-pieza durante el llenado. La Figura 5.1b muestra al conjunto bajo estudio una vez finalizado el llenado y las Figuras. 5.1c y d muestran la evolución de la temperatura superficial del conjunto durante su enfriamiento.

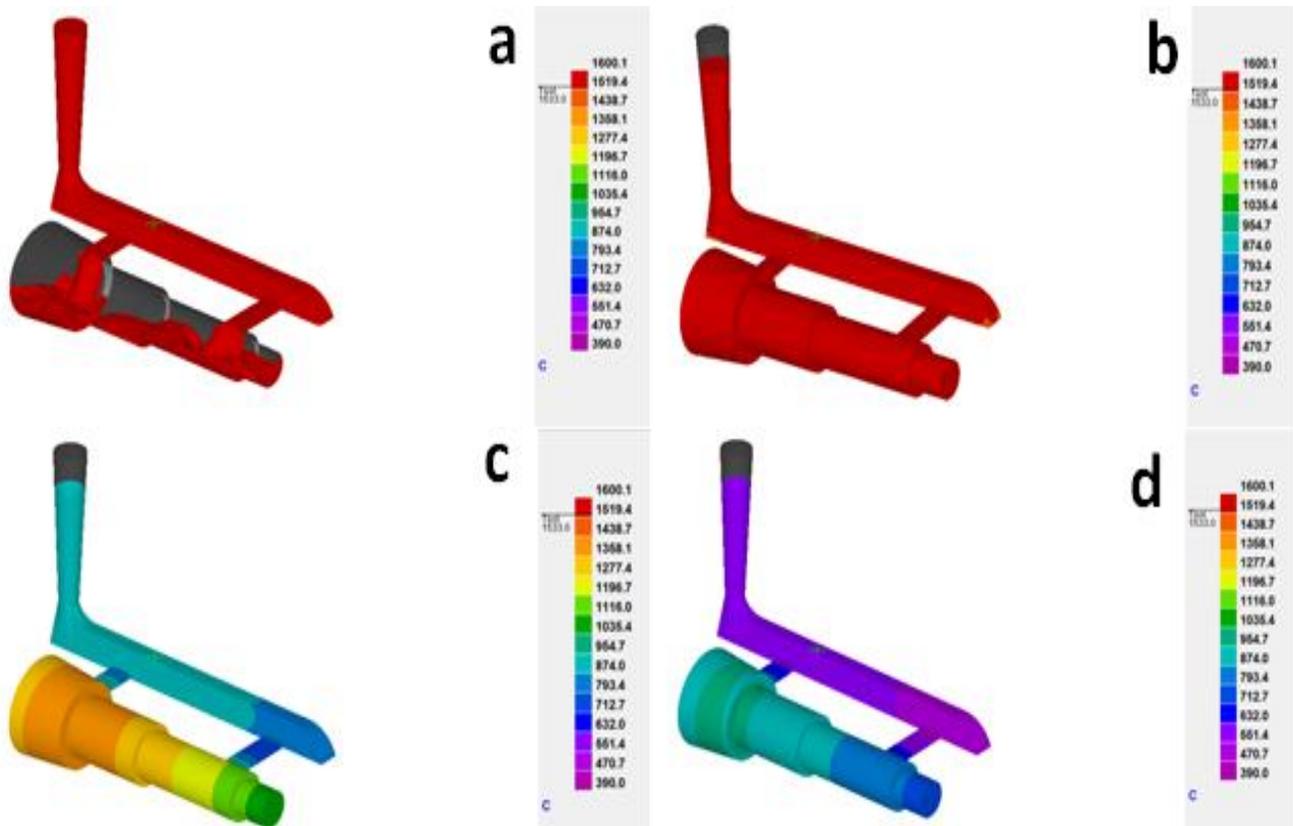


Figura 5.1. Campo superficial de temperaturas en el llenado y solidificación de un sistema de colada sin la presencia de un sistema de alimentación.

- Caso 2. Sistema de colada con un sistema de alimentación defectuoso.

Se muestra el proceso de solidificación para una pieza de acero en un molde de óxido de zirconio a una temperatura de colada de 1600°C para el acero y 30°C para el molde, el tiempo de llenado es de 7.5 segundos, y con un alimentador mal dimensionado. Al igual que el caso anterior figura 5.2a presenta el campo superficial de temperaturas del conjunto sistema de colada-pieza durante el llenado. La figura 5.2b muestra al conjunto bajo estudio una vez finalizado el llenado y las figuras 5.2c y d muestran la evolución de la temperatura superficial del conjunto durante su enfriamiento.

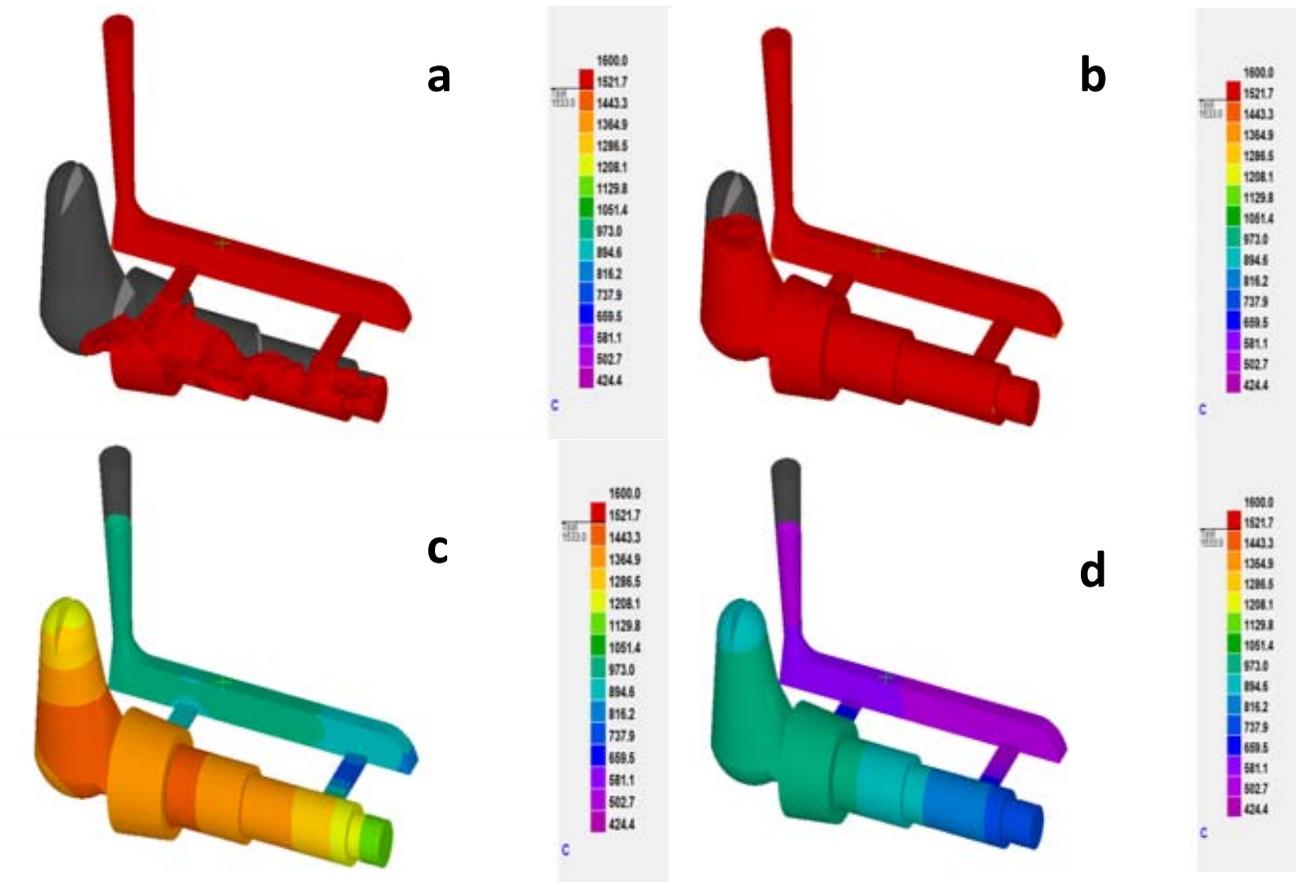


Figura 5.2. Campo superficial de temperaturas en el llenado y solidificación de un sistema de colada provisto de un sistema de alimentación mal calculado.

- Caso 3. Sistema de colada y alimentación calculado con la metodología requerida.

Se muestra el proceso de llenado y de enfriamiento y solidificación para una pieza de acero en un molde de óxido de zirconio a una temperatura de colada de 1600°C para el acero y 30°C para el molde, con el sistema de colada y alimentación calculado con la metodología requerida, teniendo un tiempo de llenado de 7.5 segundos. En la secuencia de imágenes se puede observar de nueva cuenta el llenado del sistema de colada y la pieza problema (figura 5.3a), el abastecimiento de metal líquido al sistema de alimentación (figura 5.3b) y la secuencia de enfriamiento del caso bajo estudio (figuras 5.3c y d).

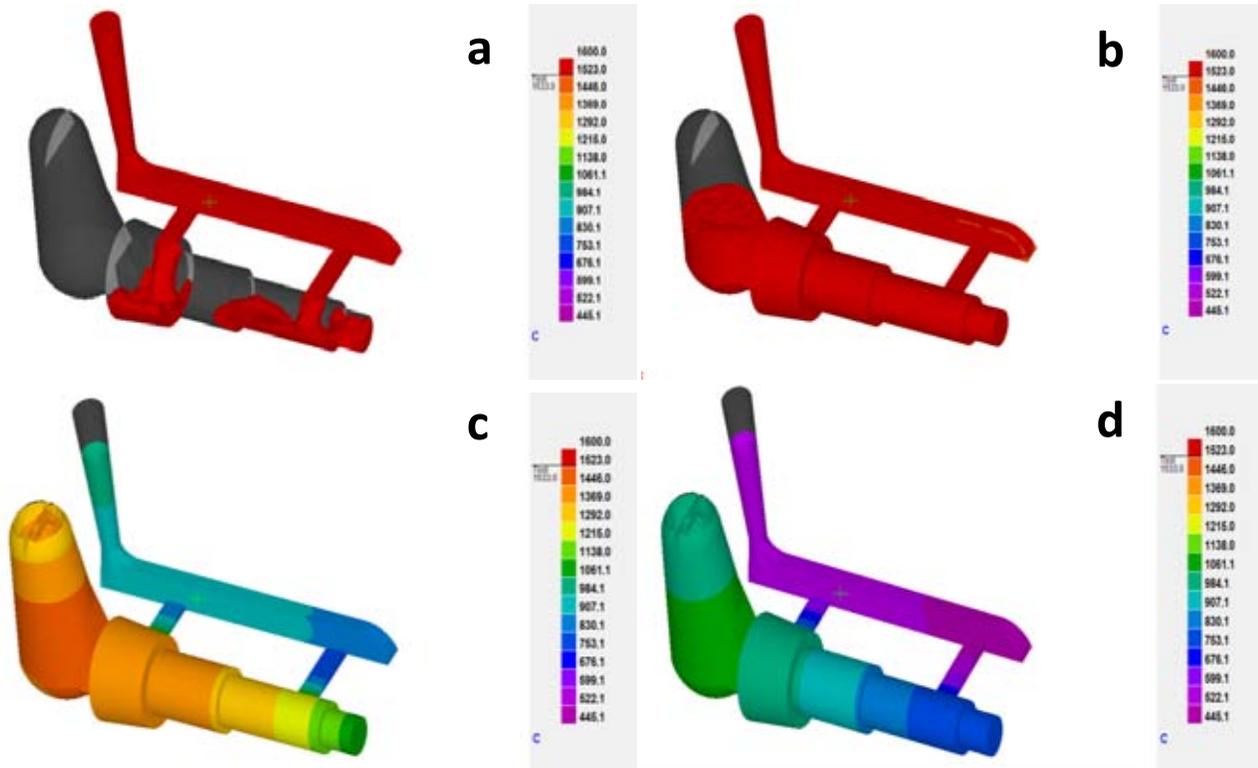


Figura 5.3. Campo superficial de temperaturas en el llenado y solidificación de un sistema de colada y alimentación calculado según la secuencia lógica.

- Caso 4. Sistema de colada y alimentación con un sobre calentamiento hasta 1700°C.

Se muestra el proceso de solidificación para una pieza de acero en un molde de óxido de zirconio a una temperatura de colada de 1700°C para el acero y 30°C para el molde con el sistema de colada y alimentación calculado con la metodología requerida pero con un sobrecalentamiento mayor, el tiempo de llenado es de 7.5 segundos, en este caso el alimentador se construye bajo la metodología aplicada. En la figura 5.4a, se puede observar el perfil de temperaturas en el llenado del sistema de colada, la pieza problema y el sistema de alimentación. En la fig. 5.4b se aprecia la culminación del llenado del sistema bajo estudio, y en las figuras 5.4c y d se observa a detalle el enfriamiento ininterrumpido del caso 4.

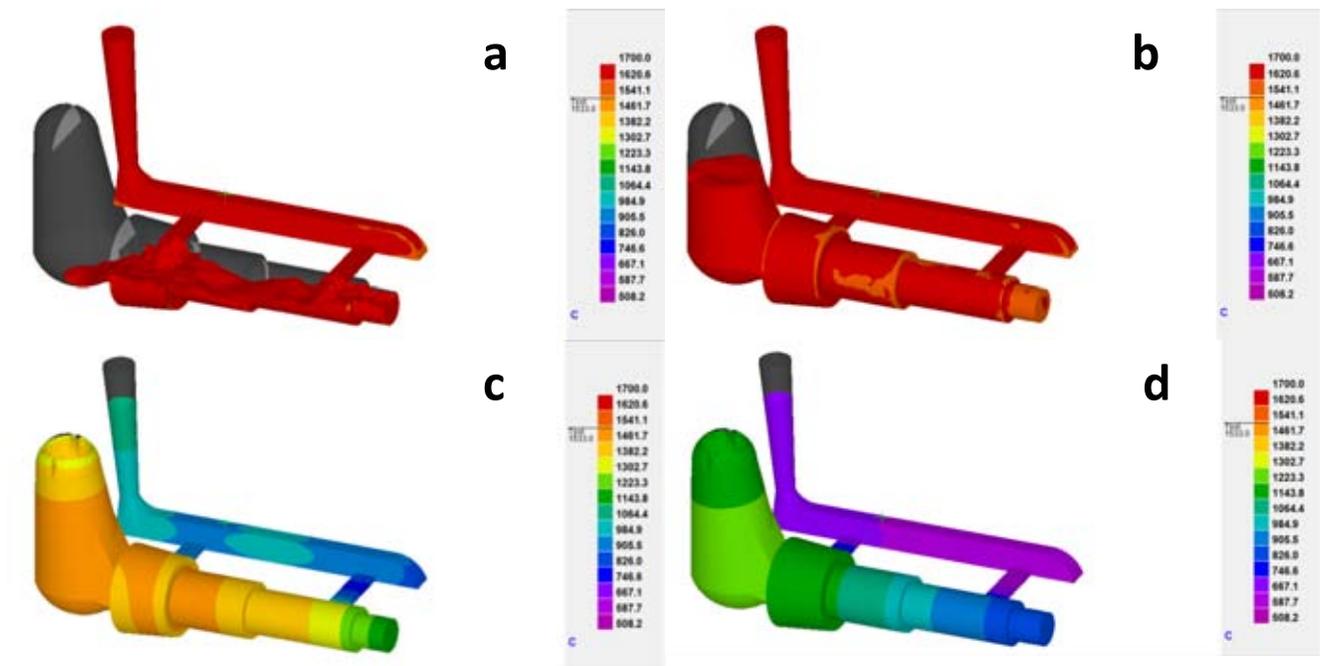


Figura 5.4. Campo superficial de temperaturas en el llenado y solidificación de un sistema de colada y alimentación adecuado, con una temperatura de colada de 1700° C

5.2 Análisis de resultado para los casos de estudio.

Para el análisis de resultados de los casos propuestos se utilizarán las herramientas del software ProCAST 2008 referentes a los cambios térmicos que ocurren durante el proceso de llenado y solidificación de la pieza problema para la predicción de algún defecto generado por la contracción térmica; se analizará caso por caso y se comparará con los demás el final de este capítulo para realizar las conclusiones pertinentes. Para profundizar el análisis se realizará un corte normal al plano z, esto permitirá la observación en el interior de la zona de interés, en estos casos es la parte interna de la pieza problema en una sección longitudinal.

A continuación, se presentan las secuencias gráficas capturadas a partir de una simulación del software, empezando por el comportamiento de la solidificación en función del tiempo, permitiendo el estudio la recolección pruebas concretas para la determinación de la calidad de la pieza. Estos resultados se presentan en las páginas siguientes.

- Caso 1 Sistema de colada sin la presencia de un alimentador.

1.1 Fracción sólida:

Aunque este trabajo está interesado en investigar los efectos de un sistema de alimentación, se presenta este caso al inicio para dar a conocer de una manera simple la necesidad de tener un sistema que proporcione metal líquido a la pieza problema cuando se requiera. En la figura 5.5 se puede mostrar la evolución y cronología de la fracción sólida, teniendo en cuenta que después de casi 100 segundos (1.63 minutos) la mayor parte de la pieza problema se encuentra en estado líquido o en la transición y como no se tiene una salida de gases ni se encuentra un alimentador es muy probable que se puedan presentar defectos por contracción.

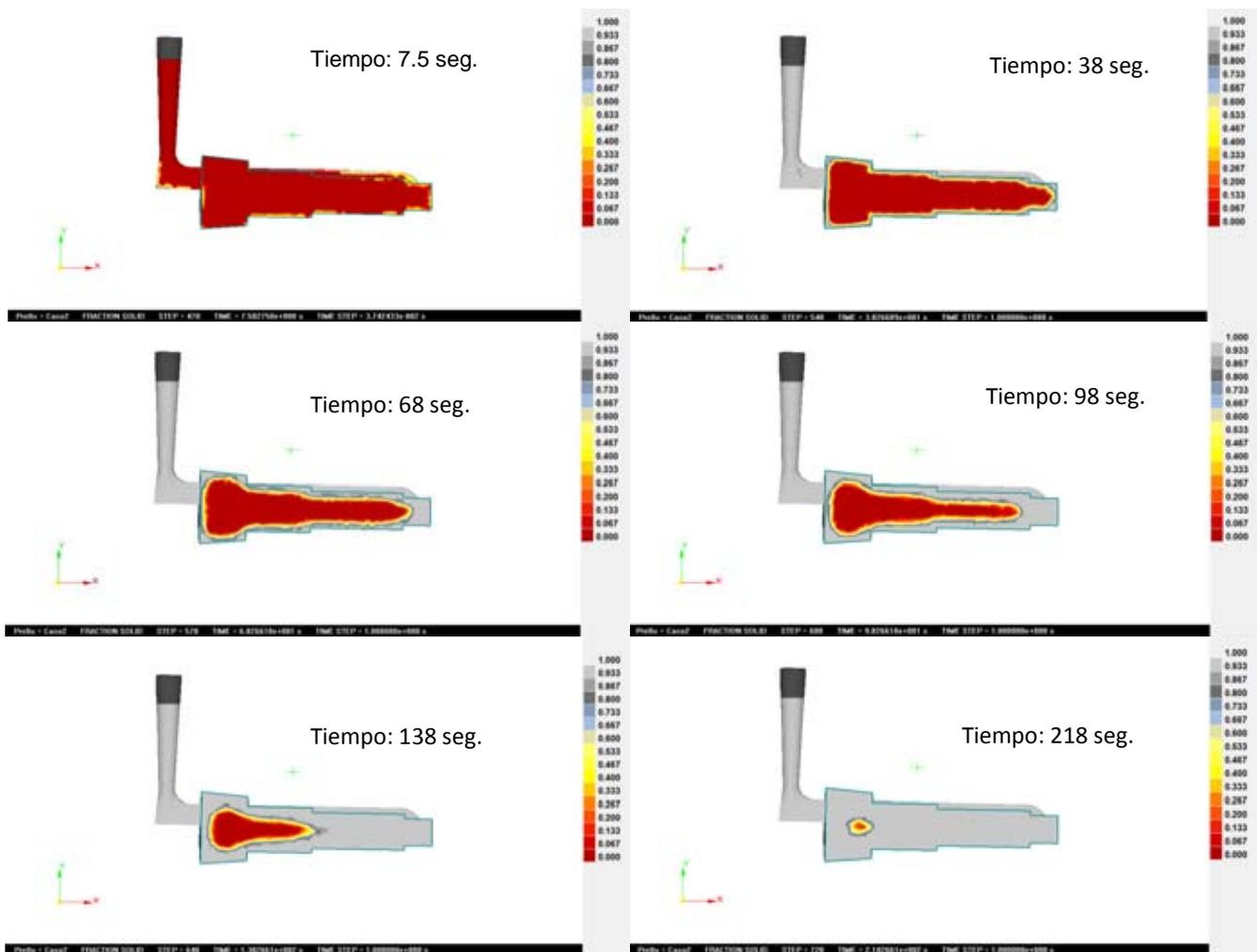


Figura 5.5. Evolución del tiempo de solidificación en segundos de la pieza mediante la escala cromática en el sistema de colada sin un sistema de alimentación.

1.2 Tiempo de solidificación.

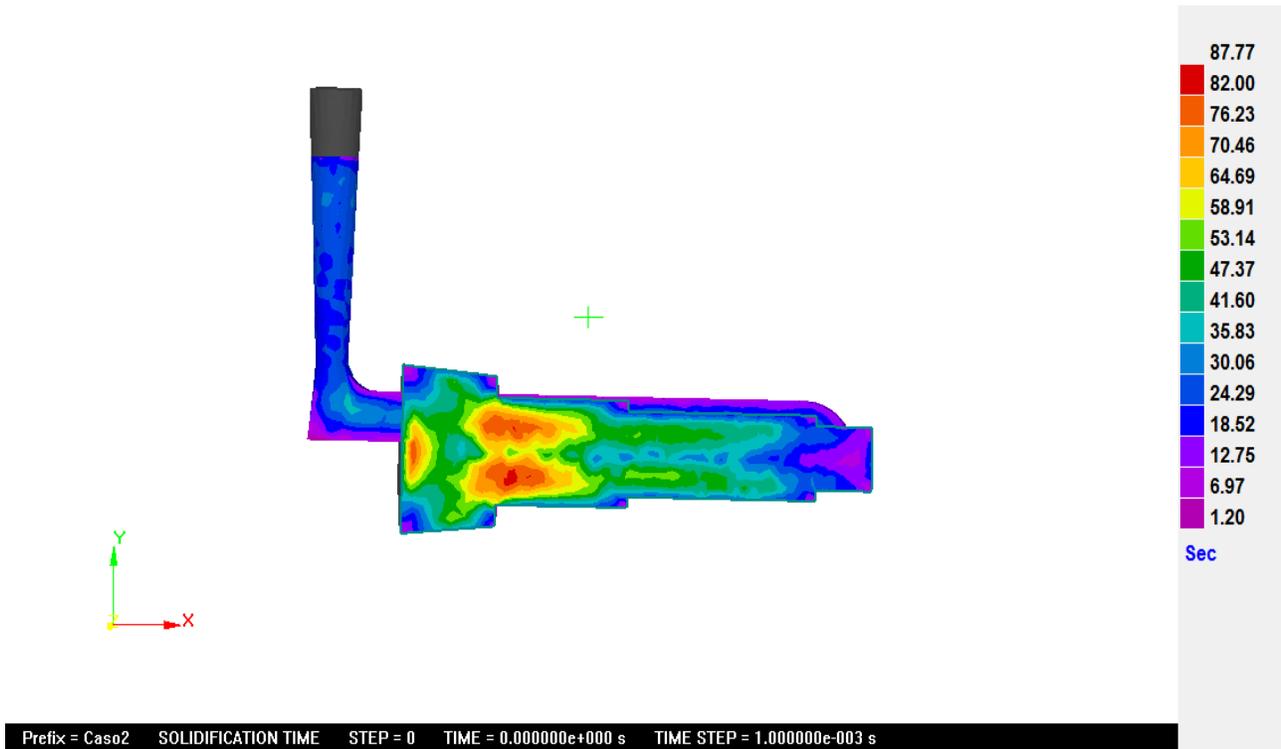


Figura 5.6. Secuencia cronológica de la solidificación de un sistema de colada desprovisto de un sistema de alimentación.

La escala cromática que se presenta en la figura 5.6 para el análisis, examina el tiempo en el que tarda la pieza problema en solidificar, y las zonas que se pueden ver afectadas, además el comportamiento térmico en el interior de la pieza en estudio. Como se observa la zona donde el alimentador puede estar colocado es donde se encuentran puntos calientes; es decir, las zonas donde el tiempo de solidificación se extiende, tal es el caso de la zona cercana al primer ataque, donde el tiempo llega al intervalo de 80 a 90 segundos después del vaciado (1.33 a 1.5 minutos). Como se trata de un sistema de colada cerrado y la única salida es la misma bajada se supone que el tiempo de enfriamiento será mayor que en los otros casos.

1.3 Defectos por contracción (rechupes)

Como en las predicciones pasadas, los defectos por contracción se presentan debido a la distribución de los tiempos de solidificación, a la evolución de la fracción sólida en función del tiempo y principalmente debido a la falta de un sistema de alimentación que abastezca la demanda de metal líquido a la pieza al momento de la seguimiento de la contracción térmica mostrada en la figura 5.7, es de notarse que el rechupe en la pieza estudiada en el caso 1 se presenta en la zona del mayor módulo de solidificación, en la parte superior debido al efecto de la gravedad. Es importante mencionar también, que este caso viola todas las reglas de alimentación, debido a que no existe un sistema de alimentación que soporte al caso bajo estudio.

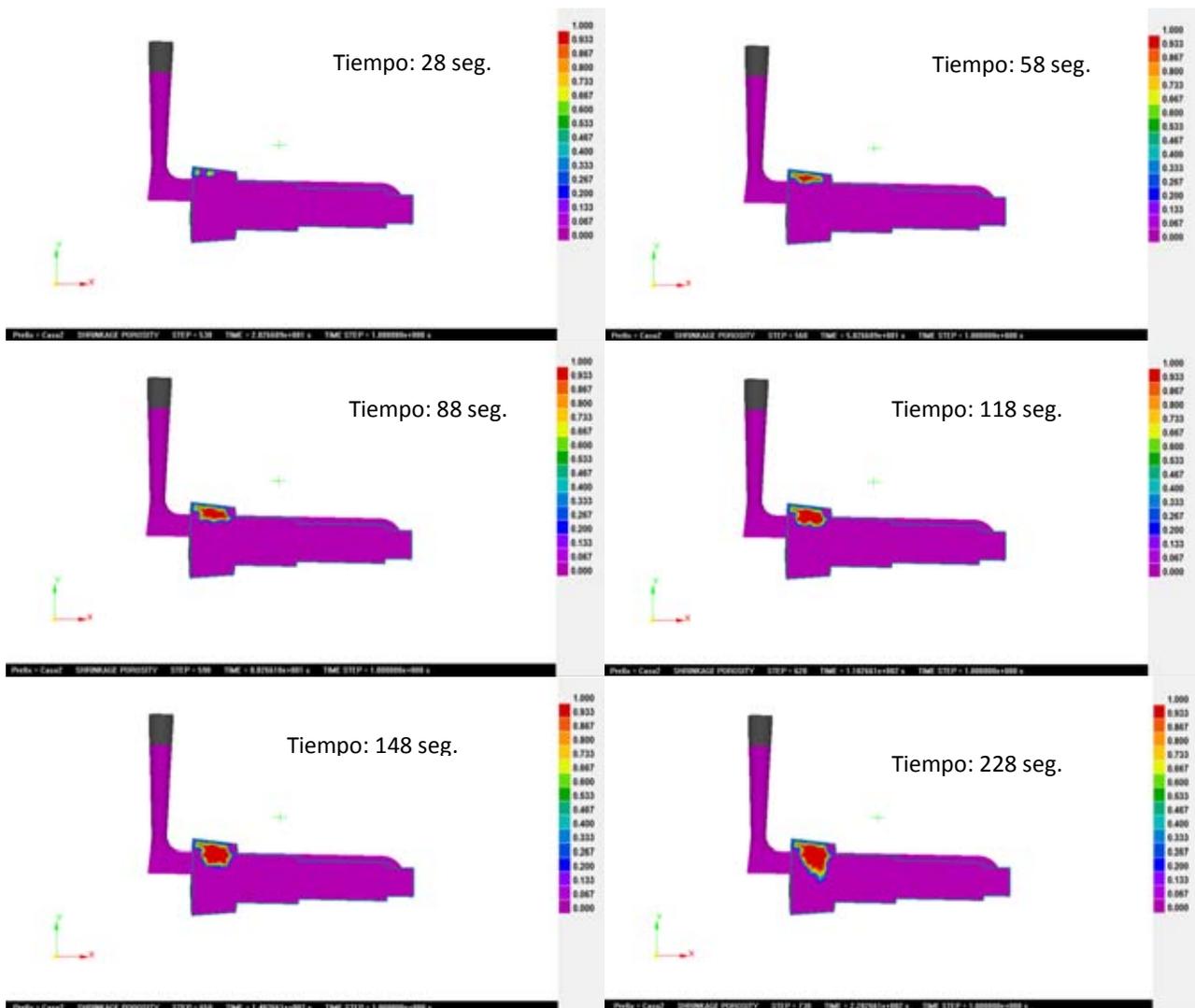


Figura 5.7. Secuencia cronológica de la generación y evolución de un defecto por contracción (rechupe) en un sistema de colada desprovisto de un sistema de alimentación,

- Caso 2. Sistema de colada con un sistema de alimentación defectuoso.

2.1 Fracción sólida.

Este caso presenta un sistema de alimentación mal diseñado, aunque presente un alimentador, los defectos por contracción pueden originarse, ya que si no se tiene en cuenta las reglas de la alimentación, el alimentador no abastecerá la demanda líquida a las zonas necesitadas.

Con el sistema de alimentación diseñado en este caso se puede observar en la figura 5.8, después de 105 segundos (1.75 minutos), el perfil de solidificación se ve direccionado y el cuello entre el alimentador y la pieza aun no solidifica.

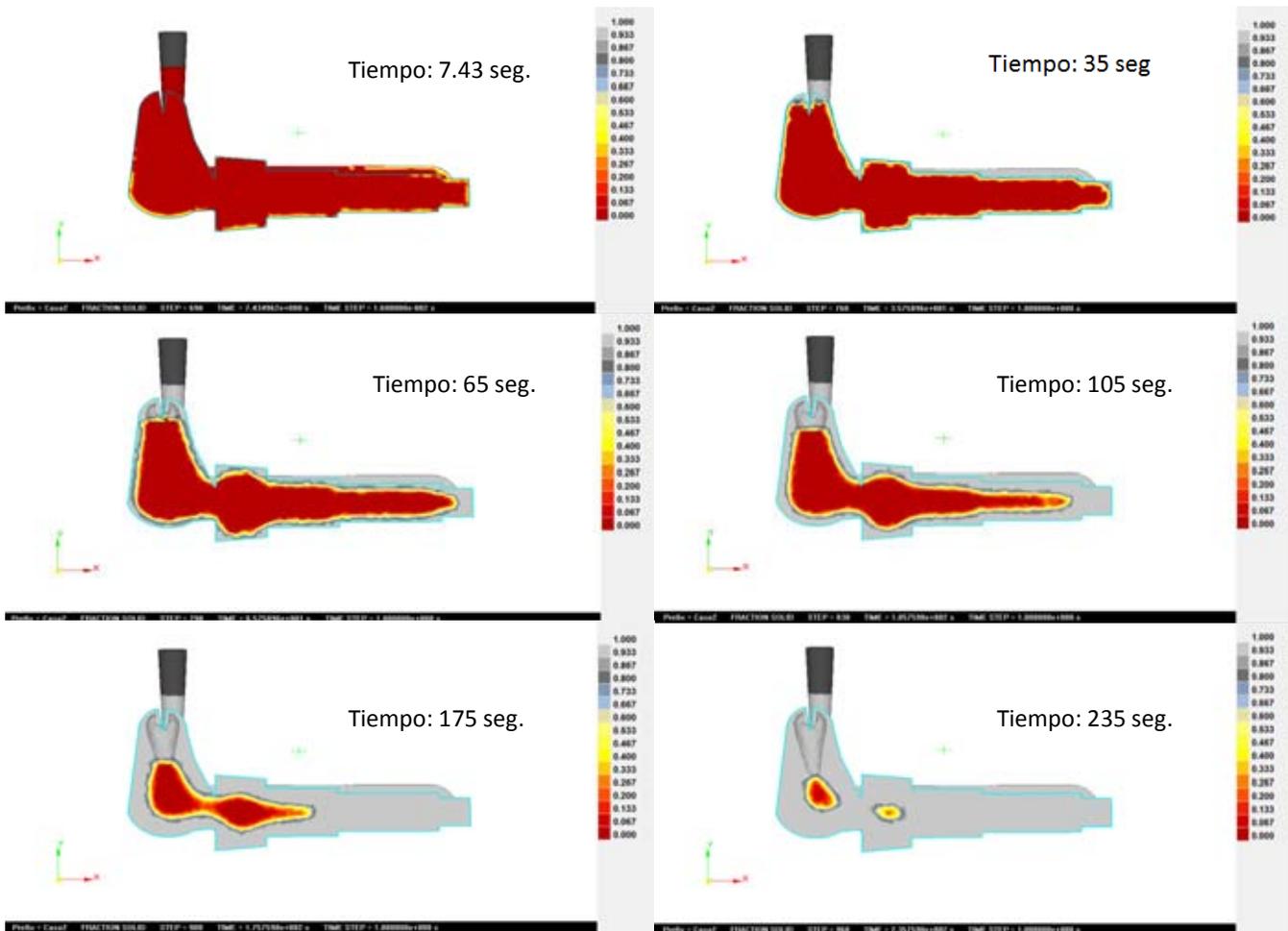


Figura 5.8. Secuencia cronológica de la solidificación de un sistema de colada con un sistema de alimentación construido sin las recomendaciones y cálculos recomendados.

Después de 175 segundos de haber vaciado el metal líquido en el molde se puede apreciar que el cuello de la unión alimentador pieza llega a solidificar, violando también un requerimiento principal de un sistema de alimentación que es el que el cuello debe solidificar hasta que el alimentador haya cumplido con su tarea. Finalmente es predecible que se encuentra una zona sin solidificar mucho menor que en el caso 1, aunque con los análisis siguientes se podrá determinar la eficiencia del sistema de alimentación en el caso de estudio actual.

2.2 Tiempo de solidificación.

En la figura 5.9 del caso 2 se aprecia la caída de tiempo de solidificación comparado con el caso 1. Se aprecia que el tiempo se reduce debido al implemento del sistema de alimentación, dando una solidificación regular entre 40 y 80 segundos (0.66 y 1.3 minutos), presentando un punto caliente entre la unión del alimentador y la pieza, el cual tarda en enfriar alrededor de 100 a 120 segundos (1.66 a 2 minutos). Con este intervalo de solidificación presentado se podría decir que la pieza posiblemente no genera defectos por contracción, sin embargo, es una respuesta temprana ante las herramientas del software.

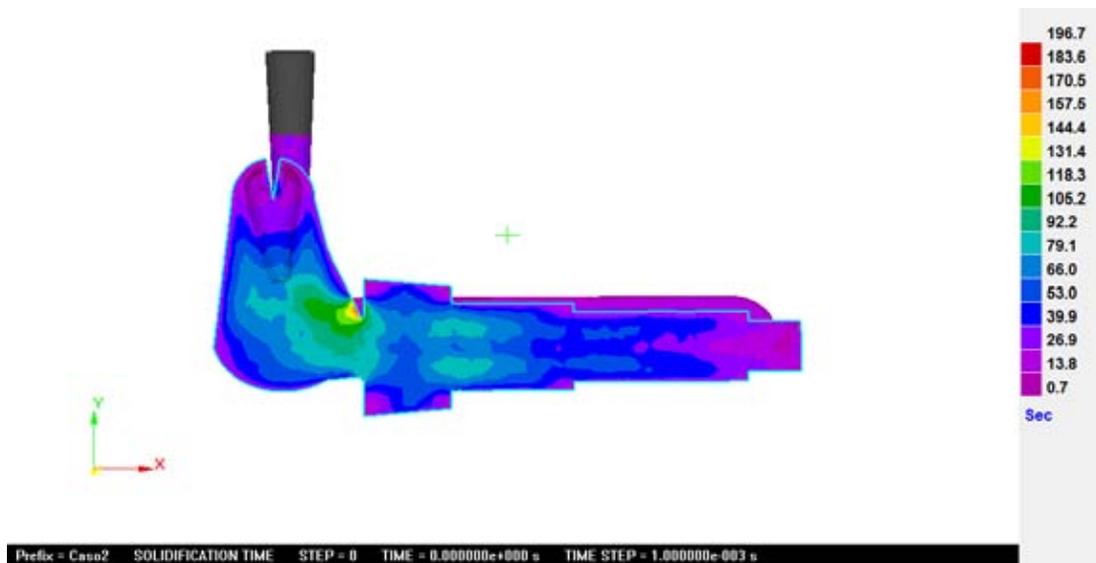


Figura 5.9. Referencia cromática del tiempo de solidificación en segundos de la pieza problema sin un sistema de alimentación.

2.3 Defectos por contracción (rechupes).

Con las predicciones anteriores y la cronología de la aparición de rechupes de la figura 5.10 se puede establecer que el caso 2 no respeta a la regla de los módulos ya que el cuello solidifica antes de la zona crítica de la pieza y el alimentador no puede funcionar adecuadamente debido a la presencia de un cuello del alimentador defectuoso, con un módulo inadecuado que provoca su solidificación prematura ya que aunque se cuenta con un alimentador con líquido remanente, este no logra abastecer la demanda volumínica en la pieza problema, debido a que el cuello solidifica, generando un defecto considerable para futuras aplicaciones en la pieza de estudio.

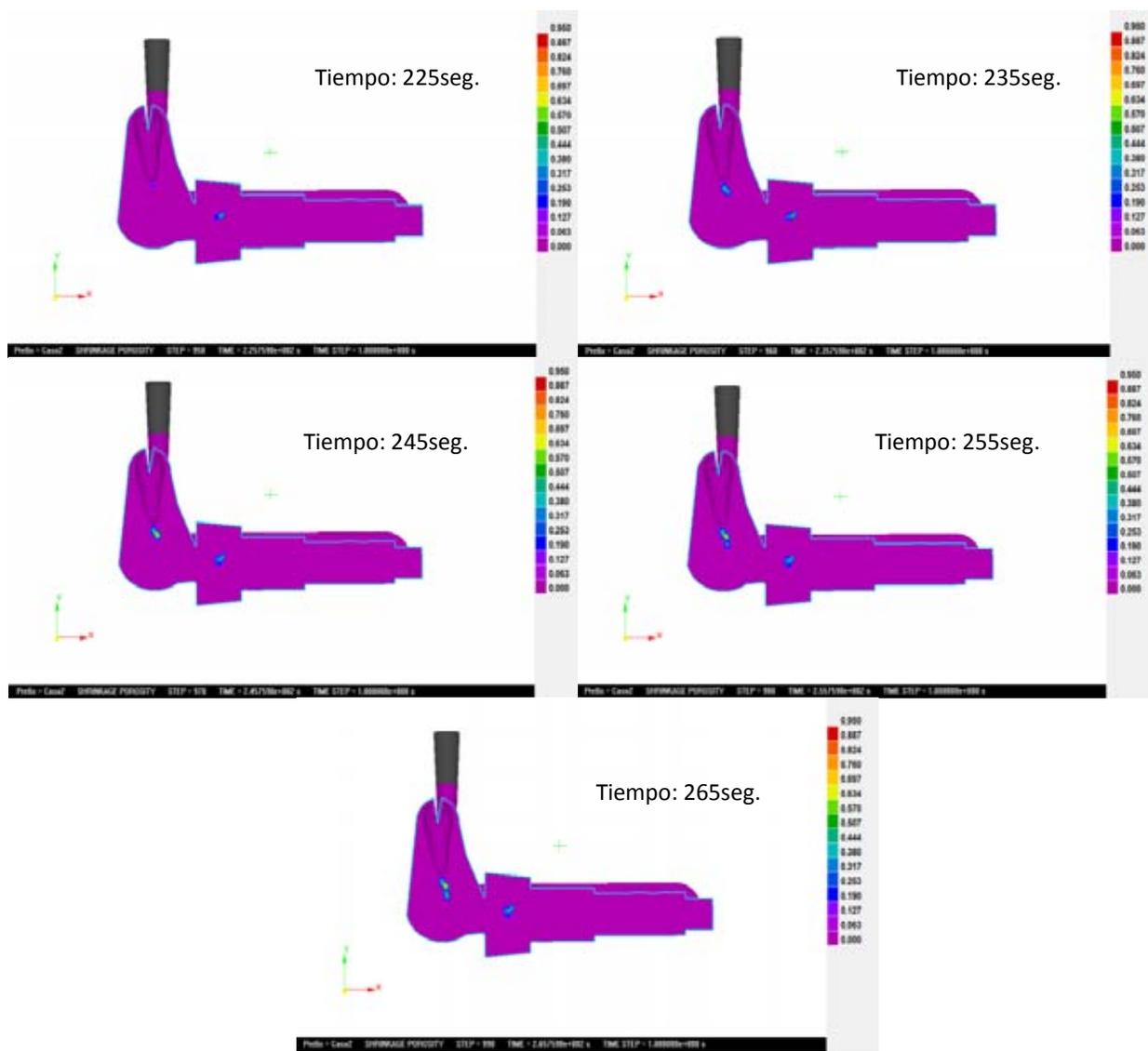


Figura 5.10. Secuencia cronológica de la generación y evolución de un defecto por contracción (rechupe) en un sistema de alimentación construido sin seguir la secuencia de cálculos recomendados.

Para corroborar si se cumple o no la regla de las contracciones se tomará la medida del alimentador comprobando que es más pequeño que la demanda requerida para abastecer a la pieza problema.

Esto parte de la ecuación 27, vista en el capítulo 1 la cual menciona que el volumen del alimentador tiene que ser mayor a una constante de contracción multiplicada el factor de contracción del mismo y por el volumen de la pieza . Traducido numéricamente se resume en:

$$V_a > k' r V_p$$

$$r = R/100$$

El valor de R se obtiene mediante la tabla 2, también presentada en el capítulo 1 a continuación y además depende del sobrecalentamiento.

Para determinar el D_0 se parte de la figura 5.11 la cual dimensiona al alimentador a partir de este dato. Como la altura total del alimentador es el doble de D_0 con la figura 5.11 se puede saber que el diámetro inicial es de 67 mm (6.7cm).

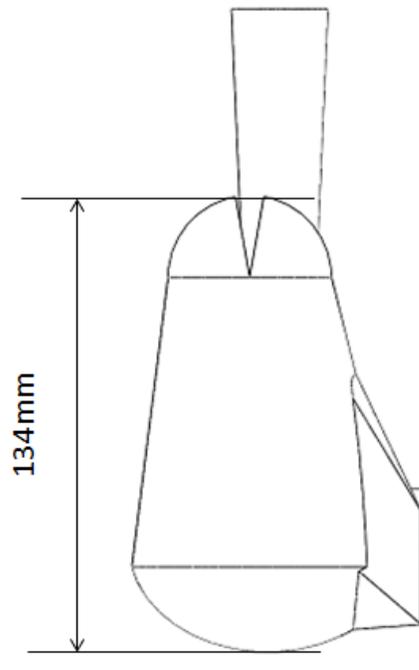


Figura 5.11. Altura del alimentador para el caso 2.

Con las propiedades de la aleación y los factores de contracción se sabe que:

$$V_a > 6 \left(\frac{5.5}{100} \right) * 564.08 \text{ cm}^3$$

$$V_a > 186.1464 \text{ cm}^3$$

Si se obtiene el volumen de un cilindro con $D_0 = 6.7 \text{ cm}$ y una altura semejante se obtiene:

$$V = \pi(3.35 \text{ cm})^2 * 6.7 \text{ cm} = \mathbf{236.21 \text{ cm}^3}$$

Por tanto:

$236.21 \text{ cm}^3 > 157.74 \text{ cm}^3$ Se cumple la regla de las contracciones.

Al saber que esta regla es válida para las dimensiones del alimentador, se procede a estudiar el cuello de unión entre éste y la pieza problema, zona que se ve afectada en la secuencia de la figura 5.8 de la evolución de la fracción sólida.

Es de notar que el cuello del alimentador se encuentra relacionado con el diámetro inicial en un intervalo de proporción de 0.35 a 0.5 y la longitud del cuello con una proporción $0.15 D_0$. Esto se traduce a:

$0.5 * 6.7 \text{ cm} = 3.35 \text{ cm}$ Longitud de la entrada del cuello del alimentador a la pieza.

$0.12 * 6.7 \text{ cm} = 0.8 \text{ cm}$ Distancia entre el alimentador y la pieza problema unida por el cuello del alimentador.

Se tiene un volumen requerido del alimentador que cumple con la regla de las contracciones, aunque, en el siguiente caso se compararán las dimensiones, para el caso en el cual la metodología se lleve a cabo siguiendo la secuencia de cálculos sugeridos, y poder dar una conclusión válida.

- Caso 3. Sistema de colada y alimentación calculado con la metodología requerida.

3.1 Fracción sólida

En este caso el sistema de alimentación es calculado con la metodología recomendada con una temperatura de vaciado de 1600°C. Se observa que la fracción sólida de la figura 5.12 presenta un perfil de avance que deja ver que el cuello funciona correctamente ya que solidifica hasta después de que solidifica la pieza, después de casi 4.58 minutos aunque se necesitan más análisis para predecir la aparición de una pieza libre de defectos.

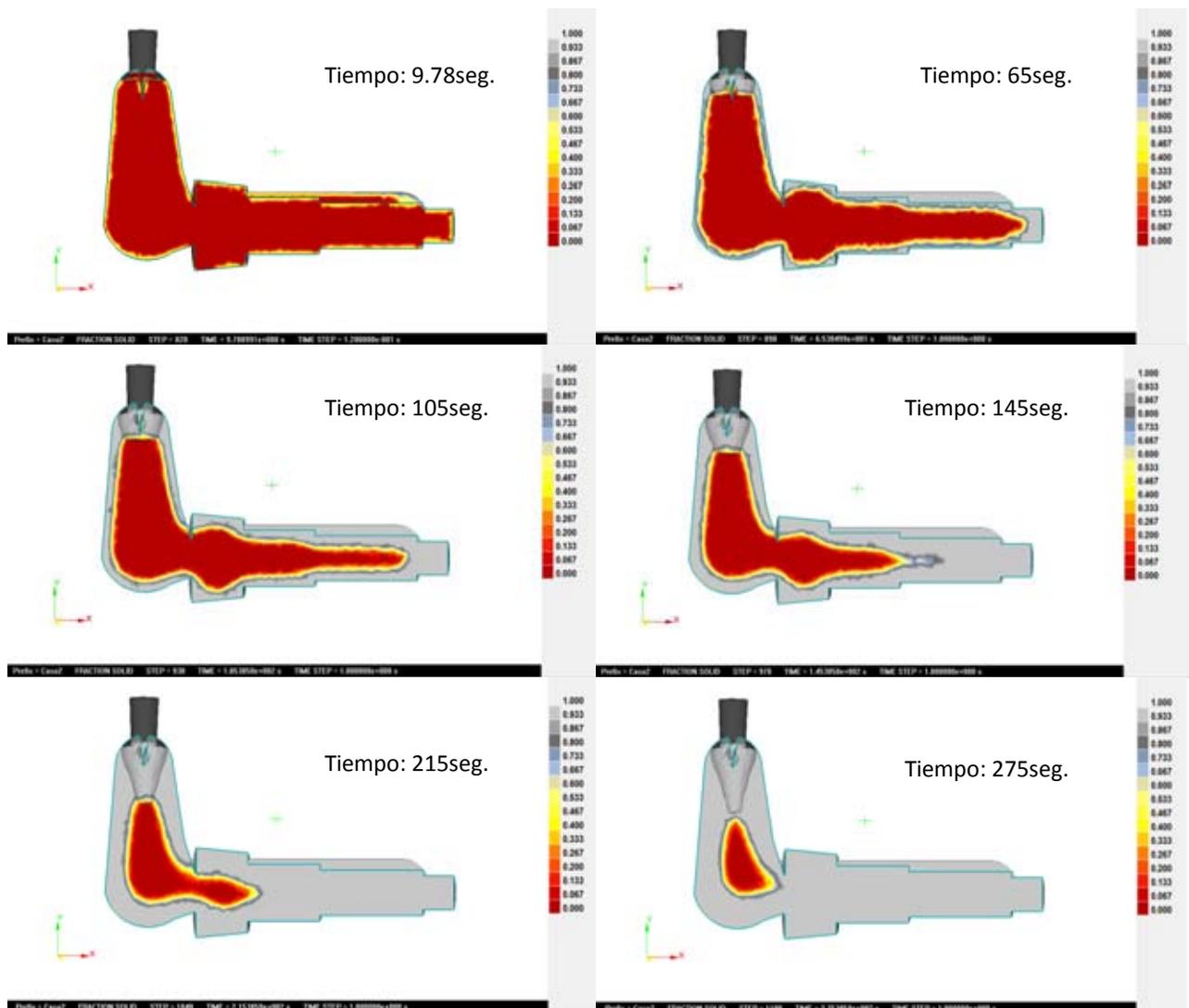


Figura 5.12. Referencia esquemática de la fracción sólida en función del tiempo (segundos) de la pieza problema con un sistema de alimentación correcto respetando las 3 reglas fundamentales.

3.2 Tiempo de solidificación.

El tiempo de solidificación para este caso se ve reducido en la zona de alimentación comparado con los casos anteriores, también para este caso (figura 5.13) la pieza tiene un intervalo de solidificación entre los 17 y 85 segundos (0.28 a 1.41 minutos) después de haber vaciado el metal líquido al molde, mientras que la zona de alimentación presenta tiempos de 100 a 130 segundos (1.66 a 2.16 minutos) después, factor que resulta importante para prevenir los defectos por contracción, se puede observar de nuevo un punto caliente entre el cuello de la pieza problema y el alimentador, una zona que tarda más de 140 segundos en solidificar, y que puede permitir aun el paso de material cuando sea requerido. Observando estos tiempos en la escala cromática también se puede predecir que la pieza quedará sin rechupes aunque existe la herramienta para corroborar este efecto.

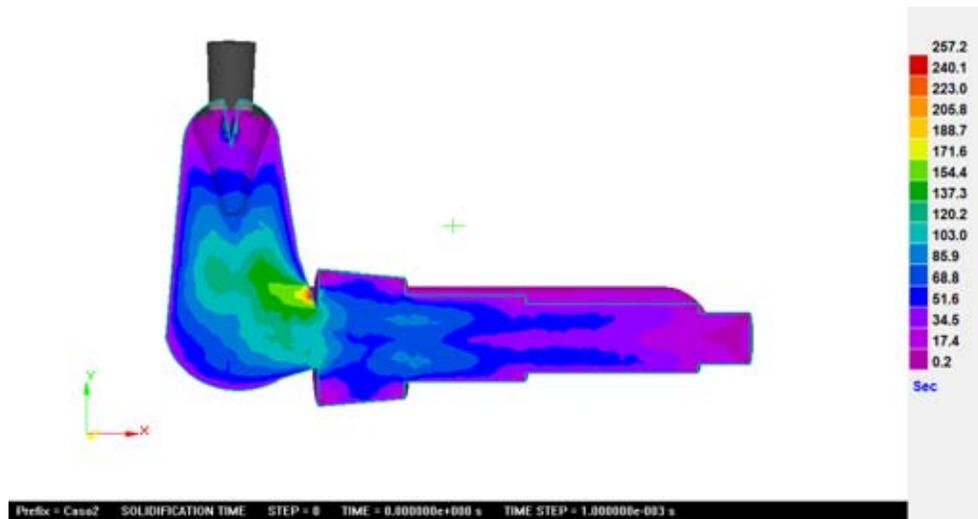


Figura 5.13. Referencia cromática del tiempo de solidificación en segundos de la pieza problema con un sistema de alimentación adecuado.

3.3. Defectos por contracción (rechupes).

Como se predijo anteriormente con las herramientas del software, la pieza queda libre de defectos debido a la presencia del alimentador, el cual abastece de manera correcta la demanda en la contracción térmica. Este caso está basado en la metodología del cálculo recomendado y cumple con las tres reglas de la alimentación: en primer lugar con la regla

de los módulos, ya que establece la posición del alimentador en la zona de mayor demanda; es decir, donde el módulo de solidificación (M_p) es mayor y también la cumple en el cuello, que solidifica después de que lo hace la pieza. Por otra parte el sistema cumple con la regla de las contracciones debido que tiene un sobrecalentamiento adecuado, apenas 80 grados por encima de la temperatura de líquidus (fusión) de un acero con bajo contenido de carbono. Y por último, el sistema cumple con la regla de los radios de acción, porque, establece tanto el número de alimentadores, como el volumen requerido para que la pieza sea libre de defectos (un alimentador es suficiente).

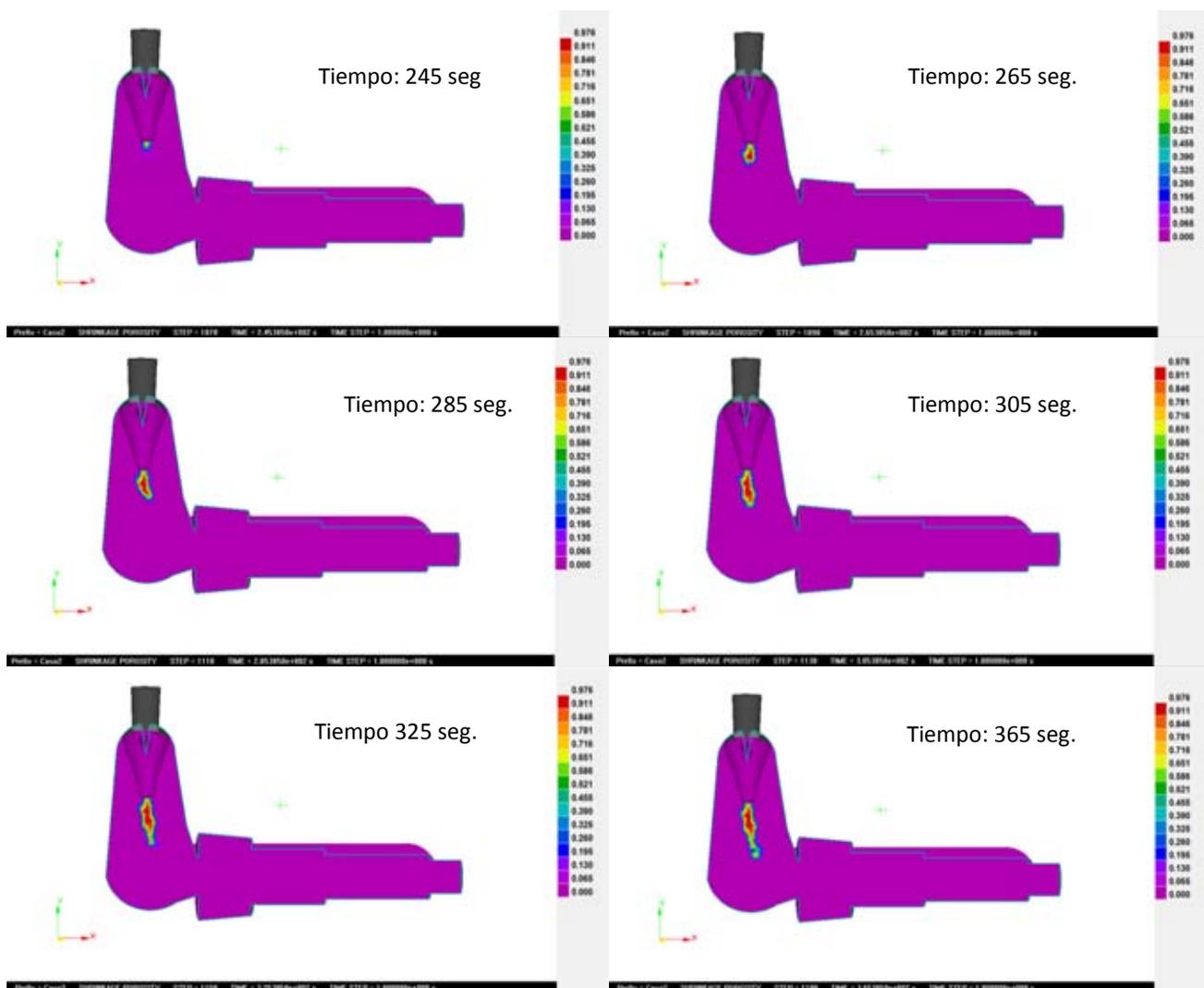


Figura 5.14. Secuencia cronológica de la generación y evolución de un defecto por contracción (rechupe) en un sistema de alimentación construido sin seguir la secuencia de cálculos recomendados.

La pregunta que surge es ¿por qué este sistema si funcionó y el caso 2 falló? La respuesta se encuentra, por una parte, en que el alimentador del caso 2 estaba sub dimensionado lo que provocó que se le asociara un cuello cuyas dimensiones para el caso bajo estudio provocaron su solidificación prematura, aun tomando el límite superior para su dimensionamiento. Por otra parte y como se mencionó en capítulos anteriores las reglas de diseño de alimentadores y sus cuellos presentan la posibilidad de dimensionamiento mediante intervalos que deben ser probados experimentalmente (buscando siempre el límite inferior por economía o bien el superior por seguridad en el funcionamiento del sistema) .En el caso 3 se eligió el límite superior para dimensionar al alimentador y su cuello y el software predijo la ausencia de defectos, aunque las predicciones deberán siempre ser cotejadas con la realidad experimental. Concretamente a continuación se muestran las diferencias entre las dimensiones de los cuellos de los casos 2 (fallido) y 3 (exitoso según ProCAST)

$0.5 * 6.7cm = 3.35cm$ Longitud de la entrada del cuello del alimentador a la pieza en el caso 2.

$0.5 * 7.059cm = 3.525cm$ Longitud de la entrada del cuello del alimentador a la pieza en el caso 3.

Aunque es mínima la diferencia de dimensiones se puede notar en las simulaciones, la obtención de una pieza libre de defectos, debido también a la violación de la regla de los radios de acción, ya que el alimentador no abastece las zonas de interés, resultado generado por no partir de una secuencia de solidificación correcta y usar un valor de diámetro del alimentador no fundamentado por la metodología recomendada.

- Caso 4. Sistema de colada y alimentación calculado con la metodología requerida y con un sobre calentamiento hasta 1700°C.

4.1 Fracción sólida.

Este último caso se presenta un sistema de alimentación adecuado a los cálculos recomendados aunque con una temperatura de vaciado de 1700°C, un sobrecalentamiento 100°C mayor a los presentados en casos anteriores. Uno de los aspectos importantes en este estudio es que el alimentador cumple con solidificar al final de la pieza problema (figura 5.15), y que el cuello del alimentador no se ve afectado en lo absoluto. Con este análisis se puede predecir que la pieza problema no contendrá defectos por contracción.

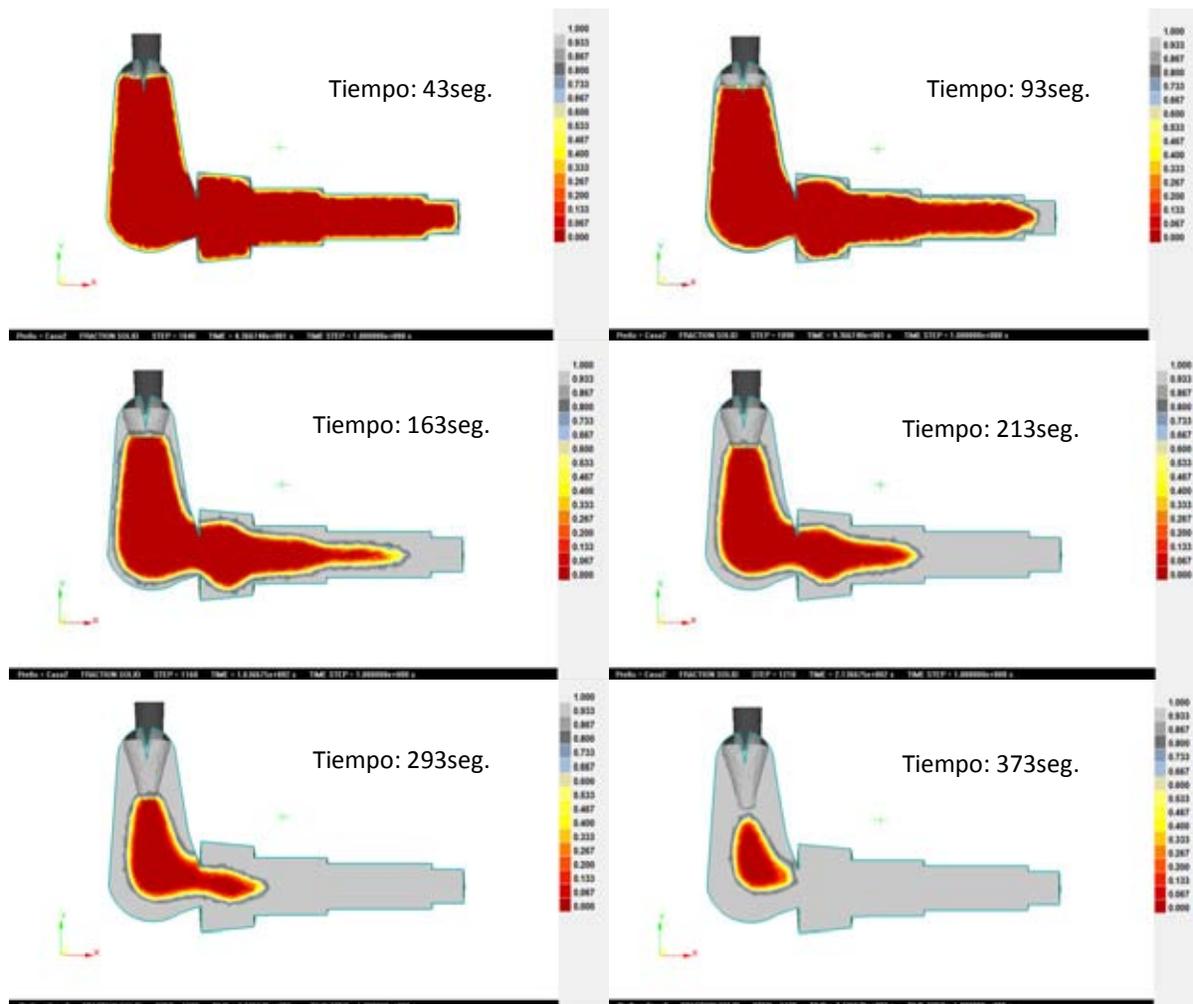


Figura 5.15. Referencia cromática del tiempo de solidificación en segundos de la pieza problema con un sistema de alimentación correcto y un sobrecalentamiento hasta 1700°C.

4.2 Tiempo de solidificación.

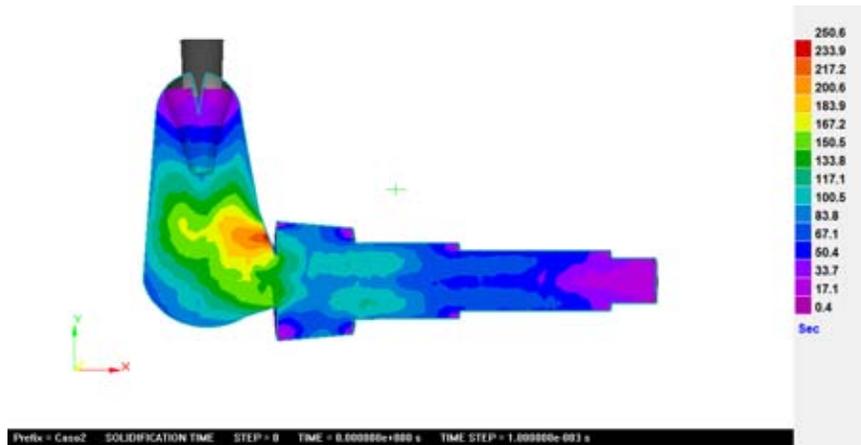


Figura 5.16. Referencia cromática del tiempo de solidificación en segundos de la pieza problema con un sistema de alimentación adecuado y un sobrecalentamiento hasta 1700°C.

En el análisis térmico referente al caso, representado en la figura 5.16, se puede apreciar un comportamiento estable en toda la pieza con un intervalo de solidificación abierto entre 50 y 100 segundos (0.83 a 1.66 minutos) para la mayoría de la pieza, se observa también al alimentador funcionando correctamente ya que el tiempo en que se cerrará el paso de metal requerido rondará entre los 130 a 170 segundos (2.16 a 2.83 minutos) después de haber vaciado el metal al molde, otro indicio de que el sistema de alimentación funciona correctamente.

4.3 Defectos por contracción (rechupes).

Como era de esperar, los defectos por contracción se presentan en el alimentador de la figura 5.17, es decir existió un transporte de metal líquido a la demanda de la pieza en la contracción térmica a la hora de solidificar, además de que se generó el defecto en el alimentador, dando como muestra la eficiencia del sistema propuesto mediante los cálculos sugeridos. Este caso puede ser ideal, aunque se puede decir que una temperatura de colada como se planteó resulta en ciertos aspectos inadecuada por los problemas que causa un metal demasiado sobrecalentado. En el ámbito ingenieril, al momento de solidificar se presentará un crecimiento de grano mayor al esperado, además

de un posible cambio en la microestructura, el rango de solidificación no respeta a la regla de las contracciones, por lo tanto el sistema de alimentación, aunque funcione, no corrobora la calidad ni las características establecidas de la pieza final.

Dado que se tienen que cubrir las posibles causas y efectos de un sistema de alimentación y colada, estudiando este caso en el aspecto económico, resultaría un fracaso calentar de más el horno para vaciar el metal líquido en el molde, ya que representa mayor inversión de energía que se traduce en gastos monetarios para la empresa y entonces no se cumpliría uno de los objetivos de la simulación, el cual es la reducción de costos de producción.

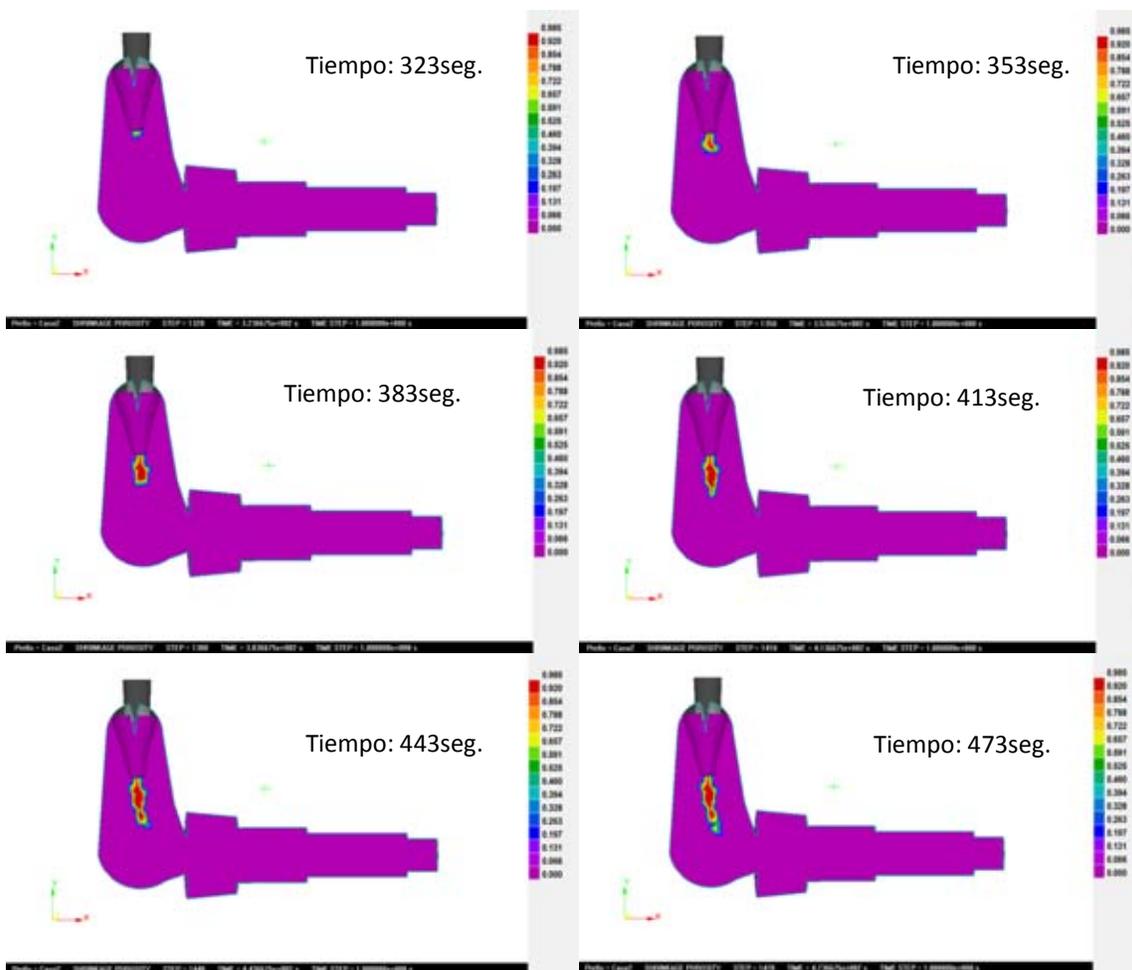


Figura 5.17. Secuencia cronológica de la generación y evolución de un defecto por contracción (rechepe) en un sistema de alimentación construido mediante los cálculos adecuados, con una temperatura de colada de 1700°C.

CONCLUSIONES.

1. Se realizó la construcción del modelo 3D y simulación de un proceso de llenado solidificación y formación de rechupes en una pieza simple de acero colado en molde de arena de zirconio y provisto de un sistema de alimentación, mediante una secuencia de cálculos sugeridos.
2. Se evaluó el efecto de la carencia de un sistema de alimentación para una pieza problema con las mismas propiedades de proceso y material. En este caso la consecuencia predicha por el software fue la aparición de defectos por contracción, mejor conocidos en el ámbito metalúrgico como rechupes.
3. Se construyó un modelo con un sistema de alimentación sin seguir la secuencia de cálculos correcta, lo cual dio como resultado una pieza con un rechupe interno. Esto corrobora la efectividad y necesidad de aplicar los conocimientos necesarios para cumplir con las reglas de la alimentación.
4. Se construyó un modelo con un sistema de alimentación siguiendo la secuencia de cálculos y la metodología correctas, lo cual, según las predicciones del software, dio como resultado una pieza sana
5. Los resultados obtenidos, a pesar de ser solamente predicciones respaldadas por el software CFD y un algoritmo correcto en los cálculos para la determinación de un sistema de alimentación, puede resumir la importancia de las tres reglas básicas de la alimentación, ya que al violar al menos una de ellas, se comprobó que la pieza bajo estudio presentó defectos por contracción.
6. Se demostró que el sistema de alimentación diseñado pudo funcionar correctamente a pesar de la presencia de un sobrecalentamiento adicional en el vaciado, ya que las predicciones del software sugieren que se generó en este caso una pieza libre de defectos, aunque la efectividad del proceso se ve mermada debido a posibles cambios microestructurales, como crecimiento de grano, que pueden ocasionar fallas, debido a la pérdida de propiedades del material, además de que resulta un gasto energético innecesario el sobrecalentar demasiado al metal previo al vaciado, transformándose estos puntos en probables pérdidas monetarias.

BIBLIOGRAFÍA

1. John Campbell. "Castings Practice. The 10 Rules of Castings", Elseiver Butterworth-Heinemann. Burlington, MA. 2004.
2. John Campbell. "The New Metallurgy of Cast Metals" Elseiver Butterworth-Heinemann. Burlington MA. 2003.
3. Metodología general para el cálculo de alimentación y de colada para piezas fundidas en Aluminio. Tesis de licenciatura (Ingeniero Químico Metalúrgico). UNAM, Facultad de Química, Ariel Martínez Olive, 1991.
4. Matt Lombard. "Solid Works 2010 Bible", Wiley Publishing, Inc. 10475 Crosspoint Boulevard Indianapolis, 2010.
5. Metals Handbook. Volume 15. "Casting". ASM. 1988.
6. ProCAST User Manual. Revised Version 2008.
7. Centre Techniques des Industries de la Fondiere. Division des Pièces moulées en Sable. "Le Remplissage des Empreintes de Moules en Sable". 2eme édition mise a jour et révisée. Juin, 1984.
8. Doru Michael Stefanescu. "Science and Engineering of Casting Solidification" 2nd Edition, Springer Science+Business Media, LLC. Department of Materials Science and Engineering. The Ohio State University. 2009.

ANEXO I. INDICES INFORMATIVOS

1. INDICE DE FIGURAS.

FIGURA 1.1. DIFERENTES TIPOS DE SOLIDIFICACIÓN: A) DIRECCIONAL, B) PROGRESIVA, Y C) AMBAS.....	13
FIGURA 1.2. ILUSTRACIÓN ESQUEMÁTICA DE LOS TRES REGÍMENES DE CONTRACCIÓN: LÍQUIDA, POR SOLIDIFICACIÓN Y SÓLIDA.....	15
FIGURA 1.3. DEFINICIÓN DE LOS DEFECTOS POR CONTRACCIÓN. A) RECHUPE PRIMARIO ABIERTO; B) RECHUPE INTERNO O CIEGO; C) MICROPOROSIDADES O MICRORRECHUPES.....	16
FIGURA 1.4. CURVA DE ENFRIAMIENTO PARA UN METAL PURO DURANTE SU ENFRIAMIENTO Y SOLIDIFICACIÓN.	17
FIGURA 1.5. A) PATRONES DE SOLIDIFICACIÓN PARA EL HIERRO FUNDIDO GRIS EN UNA PIEZA CUADRADA DE 180MM (7PULG). NÓTESE QUE DESPUÉS DE 11 MINUTOS DE ENFRIAMIENTO, LAS DENDRITAS SE ALCANZAN LAS UNAS A LAS OTRAS, PERO LA FUNDICIÓN AÚN ESTÁ BLANDA EN SU TOTALIDAD. SE NECESITAN APROXIMADAMENTE DOS HORAS PARA QUE ESTA PIEZA SOLIDIFIQUE COMPLETAMENTE. B) SOLIDIFICACIÓN DE ACEROS AL CARBONO EN MOLDES DE ARENA Y METAL. NÓTESE LA DIFERENCIA EN LOS PATRONES DE SOLIDIFICACIÓN CONFORME SE VA INCREMENTANDO EL CONTENIDO DE CARBONO.....	18
FIGURA 1.6. DESCRIPCIÓN ESQUEMÁTICA DE LA SOLIDIFICACIÓN DE UNA ALEACIÓN Y DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA TEMPERATURA EN EL METAL EN SOLIDIFICACIÓN.	19
FIGURA 1.7. REPRESENTACION ESQUEMATICA DE LOS 5 MECANISMOS DE UNA SOLIDIFICACION METALICA.	29
FIGURA 1.8. PERFIL DE TEMPERATURA DURANTE EL ENFRIAMIENTO DE UNA FUNDICIÓN EN UN MOLDE. SE MUESTRA EL EFECTO DE LA RESISTENCIA TÉRMICA ADICIONAL QUE CONTROLA LA VELOCIDAD DE PÉRDIDA DE CALOR.	29
FIGURA 1.9. CARACTERIZACIÓN DE UNA PIEZA COMPLEJA EN PIEZAS CON MENOR DIFICULTAD.	35
FIGURA 1.10. DETERMINACIÓN GRÁFICA DEL MÓDULO DE SOLIDIFICACIÓN EN FUNCIÓN DE LA POSICIÓN DEL ALIMENTADOR.....	36
FIGURA 1.11. DETERMINACIÓN DE LA CONSTANTE DE ALIMENTACIÓN PARA OBTENER EL DIÁMETRO Y LA ALTURA DEL ALIMENTADOR. (*EL PUNTO CALIENTE ELEGIDO PARA LA UBICACIÓN DEL ALIMENTADOR ES EL MÁS IMPORTANTE PARA DETERMINAR EL SENTIDO DE ALIMENTACIÓN).....	40
FIGURA 1.12. ESQUEMAS PARA CALCULAR EL CUELLO DE UN ALIMENTADOR. A) APLICACIÓN DE UN ALIMENTADOR PARA FUNDICIONES GRISES, B) APLICACIÓN DE UN ALIMENTADOR PARA FUNDICIONES BLANCAS.	41
FIGURA 1.13. TIEMPOS DE ENFRIAMIENTO PARA LAS FUNDICIONES CON DISTINTAS ALEACIONES Y MOLDES.	42
FIGURA 1.14. SOLIDIFICACIÓN TIPO PLACA QUE PRESENTA FRENTE DE SOLIDIFICACIÓN PARALELOS Y B) SOLIDIFICACIÓN TIPO CUÑA QUE PRESENTA FRENTE DE SOLIDIFICACIÓN CONVERGENTES.....	44
FIGURA 1.15. SOLIDIFICACIÓN DIRECCIONAL EN UNA PIEZA METÁLICA.	45
FIGURA 2.1 DETERMINACIÓN DE LAS VELOCIDADES DE UN FLUJO.	53
FIGURA 2.2. CORRECCIÓN DE LA ALTURA METALOSTÁTICA EN FUNCIÓN DE LA POSICIÓN DE LA PIEZA RESPECTO A LA LÍNEA DE PARTICIÓN.	531
FIGURA 2.3. EFECTOS DE LA VELOCIDAD DEL FLUIDO AL MOLDE EN UNA FUNDICIÓN, (A) CERO, (B) CRÍTICA, Y (C) ALTA.....	555
FIGURA 2.4. GEOMETRÍA RECOMENDADA DE LA BAJADA.....	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.6
FIGURA 2.5. DIFERENTES UNIONES DE BAJADA-CORREDOR UTILIZADOS EN LA ACTUALIDAD.....	577
FIGURA 2.6. ESQUEMA GENERAL DE LOS TRES CORREDORES UTILIZADOS POR CAMPBELL. (A) CC; (B) CR; (C) CT.....	599
FIGURA 2.7. UBICACIÓN DE LOS ATAQUES PARA OBTENER EL FACTOR DE DESCARGA B.....	60
FIGURA 2.8. RECOMENDACIÓN PARA EL TRAZADO DE LOS ÁNGULOS DEL TAZÓN DE COLADA.	61
FIGURA 2.9. DIMENSIONES RECOMENDADAS PARA LOS ÁNGULOS DE LA UNIÓN BAJADA-CORREDOR.	61
FIGURA 2.10 TRAZO DE LOS ÁNGULOS RECOMENDADOS PARA LOS ATAQUES.	62

FIGURA 2.11. NOMOGRAMA DEL TIEMPO DE SOLIDIFICACIÓN EN FUNCIÓN DEL TIPO DE ALEACIÓN Y EL SOBRECALENTAMIENTO A PARTIR DEL MÓDULO SIGNIFICATIVO DE LA PIEZA PROBLEMA.....	64
FIGURA 3.1. ESQUEMA Y DIMENSIONAMIENTO DE LA CAJA DE MOLDEO PARA LA PIEZA PROBLEMA.	65
FIGURA 3.2. UBICACIÓN DE LA PIEZA PROBLEMA EN LA CAJA DE MOLDEO ENDOS VISTAS.....	29
FIGURA 3.3. CORTE DE LA PIEZA PROBLEMA DEBIDAMENTE DIMENSIONADA. ACOTACIONES DADAS EN MM.	66
FIGURA 3.4. PLANO DE LA PIEZA PROBLEMA JUNTO CON LOS MÓDULOS DE SOLIDIFICACIÓN EN LAS ZONAS DE INTERÉS. DIMENSIONES DE LA PIEZA EXPRESADAS EN CENTÍMETROS.	68
FIGURA 3.5. DETERMINACIÓN DE LA POSICIÓN DEL ALIMENTADOR.	70
FIGURA 3.6. DETERMINACIÓN DEL TIPO DE ALIMENTADOR REQUERIDO.....	71
FIGURA 3.7. DIMENSIONES DEL ALIMENTADOR Y CUELLO PARA EL SISTEMA DE COLADA.	72
FIGURA 3.8. DETERMINACIÓN DE LA UBICACIÓN DE LA PIEZA PROBLEMA CON REFERENCIA AL MOLDE. .	74
FIGURA 3.9. DIAGRAMA DE LA BAJADA DE UN SISTEMA DE COLADA PARA DETERMINAR EL DIAMETRO SUPERIOR.	77
FIGURA 3.10. DIAGRAMA DE LA BAJADA RESUELTO PARA EL SISTEMA DE COLADA BAJO ESTUDIO.....	29
FIGURA 3.11. DIAGRAMA DEL CORREDOR Y SUS DIMENSIONES.	78
FIGURA 3.12. DISEÑO DE LOS ATAQUES PARA EL SISTEMA DE COLADA ESTUDIADO.....	79
FIGURA 3.13. ESQUEMA Y DIMENSIONAMIENTO DE LA UNIÓN BAJADA CORREDOR. ACOTACIONES DADAS EN MILIMETROS (MM).	79
FIGURA 4.1. INTERFAZ DE INICIO DE SOLID WORKS 2010.	81
FIGURA 4.2. MENÚ DE OPCIONES PARA DISEÑO EN LA INTERFAZ DE INICIO.	81
FIGURA 4.3. PLANOS DE REFERENCIA PARA EL TRABAJO Y SU ESPACIAMIENTO DIMENSIONAL.	82
FIGURA 4.4. OPERACIÓN DE RECUBRIMIENTO PARA GENERAR LA UNIÓN BAJADA CORREDOR.	82
FIGURA 4.5. EXTRUSIÓN DEL CORREDOR A UNA DISTANCIA DE 270MM.....	83
FIGURA 4.6. OPERACIÓN DE RECUBRIMIENTO PARA GENERAR LA BAJADA DEL SISTEMA DE COLADA.....	83
FIGURA 4.7. GENERACIÓN DE LOS ATAQUES POR MEDIO DE UNA OPERACIÓN DE EXTRUSIÓN Y LA GENERACIÓN DE UN PLANO ADYACENTE AL CORREDOR.	84
FIGURA 4.8. GENERACIÓN DE LA PIEZA PROBLEMA A PARTIR DE LA OPERACIÓN REVOLUCIÓN <i>BASE/SALIENTE</i>	85
FIGURA 4.9. EXTRUSIÓN DE LA UNIÓN CORREDOR-PIEZA PROBLEMA.	85
FIGURA 4.10. PRIMERA PARTE DE LA GENERACIÓN DEL ALIMENTADOR CON LAS DIMENSIONES REQUERIDAS Y UNA OPERACIÓN DE RECUBRIMIENTO.	86
FIGURA 4.11. SEGUNDA OPERACIÓN PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL ALIMENTADOR.....	86
FIGURA 4.12. TERCERA OPERACIÓN PARA LA CREACIÓN COMPLETA DEL ALIMENTADOR.	87
FIGURA 4.13. OPERACIÓN DE RECUBRIMIENTO PARA UNIR A LA PIEZA PROBLEMA CON EL ALIMENTADOR.....	87
FIGURA 4.14. VISTAS DE LA PIEZA PROBLEMA EN EL VISUALIZADOR DE IMÁGENES DE SOLID WORKS 2010.....	88
FIGURA 4.15. INTERFAZ DE INICIO DE PROCAST 2008.....	90
FIGURA 4.16. PIEZA PROBLEMA EN EL MÓDULO MESHCAST.....	90
FIGURA 4.17. DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA SECUENCIA DE ARREGLOS ANTES DE CORRER LAS SIMULACIONES DEL SISTEMA BAJO ESTUDIO	921
FIGURA 4.18. DIAGRAMA DE FLUJO DE LA METODOLOGÍA DEL MÓDULO PRECAST	93
FIGURA 4.19. PIEZA PROBLEMA EN EL MÓDULO PRECAST.	933
FIGURA 4.20. AVANCE DE RESULTADOS EN DATACAST Y REVISIÓN DEL CASO EN VIEWCAST.	93
FIGURA 4.21. SECUENCIA DE PASOS PARA GNERAR UN MODELO EN EL SOFTWARE PROCAST	93
FIGURA 4.22. EVOLUCIÓN DE LOS VECTORES DE VELOCIDAD AL LLENAR EL MOLDE Y LAS MAGNITUDES EXPRESADAS GRÁFICAMENTE EN FLECHAS BLANCAS.....	95
FIGURA 4.23. PRESIÓN DE LLENADO PARA UNA PIEZA PROBLEMA, LA ESCALA CROMÁTICA REFLEJA LA MAGNITUD DE ESTA PROPIEDAD EN UNIDADES BAR.	96
FIGURA 4.24. ESCALA CROMÁTICA DEL TIEMPO DE LLENADO, LA ESCALA PARTE DE MORADO PARA TIEMPOS DE 0 SEGUNDOS HASTA ROJO QUE ES EL TIEMPO DE LLENADO PROPUESTO DE 7.5 SEGUNDOS.....	97
FIGURA 4.25. REALIZACIÓN DE CORTE NORMAL AL PLANO Z.	98
FIGURA 4.26. SECUENCIA DE ENFRIAMIENTO DE UNA PIEZA PROBLEMA EN PROCAST.	98
FIGURA 4.27. EVOLUCIÓN DE LA DIRECCIÓN Y PROCESO DE SOLIDIFICACIÓN PREDICHO POR EL SOFTWARE CFD.	99

FIGURA 4.28. TIEMPO DE SOLIDIFICACIÓN PRESENTADO POR ESCALA CROMÁTICA EN UNIDADES DE SEGUNDOS (TIEMPO).	100
FIGURA 4.29. DETECCIÓN DE DEFECTOS POR CONTRACCIÓN EN EL SOFTWARE CFD.	100
FIGURA 5.1. CAMPO SUPERFICIAL DE TEMPERATURAS EN EL LLENADO Y SOLIDIFICACIÓN DE UN SISTEMA DE COLADA SIN LA PRESENCIA DE UN SISTEMA DE ALIMENTACIÓN	102
FIGURA 5.2. CAMPO SUPERFICIAL DE TEMPERATURAS EN EL LLENADO Y SOLIDIFICACIÓN DE UN SISTEMA DE COLADA PROVISTO DE UN SISTEMA DE ALIMENTACIÓN MAL CALCULADO.....	103
FIGURA 5.3. CAMPO SUPERFICIAL DE TEMPERATURAS EN EL LLENADO Y SOLIDIFICACIÓN DE UN SISTEMA DE COLADA Y ALIMENTACIÓN CALCULADO SEGÚN LA SECUENCIA LÓGICA	104
FIGURA 5.4. CAMPO SUPERFICIAL DE TEMPERATURAS EN EL LLENADO Y SOLIDIFICACIÓN DE UN SISTEMA DE COLADA Y ALIMENTACIÓN ADECUADO CON UNA TEMPERATURA DE COLADA DE 1700°C.	105
FIGURA 5.5. REFERENCIA CROMÁTICA DEL TIEMPO DE SOLIDIFICACIÓN EN SEGUNDOS DE LA PIEZA MEDIANTE LA ESCALA CROMÁTICA EN EL SISTEMA DE COLADA SIN UN SISTEMA DE ALIMENTACIÓN.	106
FIGURA 5.6. SECUENCIA CRONOLÓGICA DE LA SOLIDIFICACIÓN DE UN SISTEMA DE COLADA DESPROVISTO DE UN SISTEMA DE ALIMENTACIÓN.	107
FIGURA 5.7. SECUENCIA CRONOLÓGICA DE LA GENERACIÓN Y EVOLUCIÓN DE UN DEFECTO POR CONTRACCIÓN (RECHUPE) EN UN SISTEMA DE COLADA DESPROVISTA DE UN SISTEMA DE ALIMENTACIÓN.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
FIGURA 5.8. SECUENCIA CRONOLÓGICA DE LA SOLIDIFICACIÓN DE UN SISTEMA DE COLADA CON UN SISTEMA DE ALIMENTACIÓN CONSTRUIDO SIN LAS RECOMENDACIONES Y CÁLCULOS RECOMENDADOS.	109
FIGURA 5.9. REFERENCIA CROMÁTICA DEL TIEMPO DE SOLIDIFICACIÓN EN SEGUNDOS DE LA PIEZA PROBLEMA SIN UN SISTEMA DE ALIMENTACIÓN.....	110
FIGURA 5.10. SECUENCIA CRONOLÓGICA DE LA GENERACIÓN Y EVOLUCIÓN DE UN DEFECTO POR CONTRACCIÓN (RECHUPE) EN UN SISTEMA DE ALIMENTACIÓN CONSTRUIDO SIN SEGUIR LA SECUENCIA DE CÁLCULOS RECOMENDADOS.	111
FIGURA 5.11. ALTURA DEL ALIMENTADOR PARA EL CASO 2.....	112
FIGURA 5.12 REFERENCIA CROMÁTICA DE LA FRACCIÓN SÓLIDA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO (SEGUNDOS) DE LA PIEZA PROBLEMA CON UN SISTEMA DE ALIMENTACIÓN CORRECTO RESPETANDO LAS 3 REGLAS FUNDAMENTALES.....	114
FIGURA 5.13. REFERENCIA CROMÁTICA DEL TIEMPO DE SOLIDIFICACIÓN EN SEGUNDOS DE LA PIEZA PROBLEMA CON UN SISTEMA DE ALIMENTACIÓN ADECUADO.	115
FIGURA 5.14 SECUENCIA CRONOLÓGICA DE LA GENERACIÓN Y EVOLUCIÓN DE UN DEFECTO POR CONTRACCIÓN (RECHUPE) EN UN SISTEMA DE ALIMENTACIÓN CONSTRUIDO SIN SEGUIR LA SECUENCIA DE CÁLCULOS RECOMENDADOS.	116
FIGURA 5.15. REFERENCIA CROMÁTICA DEL TIEMPO DE SOLIDIFICACIÓN EN SEGUNDOS DE LA PIEZA PROBLEMA CON UN SISTEMA DE ALIMENTACIÓN CORRECTO Y UN SOBRECALENTAMIENTO HASTA 1700°C.....	118
FIGURA 5.16. REFERENCIA CROMÁTICA DEL TIEMPO DE SOLIDIFICACIÓN EN SEGUNDOS DE LA PIEZA PROBLEMA CON UN SISTEMA DE ALIMENTACIÓN ADECUADO Y UN SOBRECALENTAMIENTO HASTA 1700°C.....	1199
FIGURA 5.17 SECUENCIA CRONOLÓGICA DE LA GENERACIÓN Y EVOLUCIÓN DE UN DEFECTO POR CONTRACCIÓN (RECHUPE) EN UN SISTEMA DE ALIMENTACIÓN CONSTRUIDO MEDIANTE LOS CÁLCULOS ADECUADOS, CON UNA TEMPERATURA DE COLADA DE 1700°C	120

1. INDICE DE ECUACIONES.

ECUACIÓN 1. RANGO DE SOLIDIFICACIÓN EN FUNCIÓN DE LA DIFERENCIA DE TEMPERATURAS.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
ECUACIÓN 2. FUNCIÓN DE POISSEUILLE PARA QUE UN FLUIDO PASE POR EFECTO DE CAPILARIDAD.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
ECUACIÓN 3. FUNCIÓN DE POISSEUILLE PARA UN CONJUNTO DE N CAPILARIDADES Y SU TAMAÑO.	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
ECUACIÓN 4. DESCENSO DE TEMPERATURA A TRAVÉS DEL METAL SOLIDIFICADO SIN ALTERAR LA INTERCARA METAL-MOLDE.	30
ECUACIÓN 5. OBTENCIÓN DEL FLUX DE CALOR A PARTIR DE LA CAÍDA DE TEMPERATURA DEL METAL AL SOLIDIFICAR.	30
ECUACIÓN 6 OBTENCIÓN DEL FLUX DE CALOR CON LA DIFUSIVIDAD TÉRMICA IMPLICITA.	31
ECUACIÓN 7 EVOLUCIÓN DEL CALOR LATENTE POR UNIDAD DE ÁREA.	31
ECUACIÓN 8. RAZÓN PARA ENCONTRAR LA VELOCIDAD A LA CUAL LA INTERCARA AVANZA HACIA EL LÍQUIDO.	31
ECUACIÓN 9 INTEGRACIÓN DE LA RAZÓN PARA ENCONTRAR LA VELOCIDAD A LA CUAL LA INTERCARA AVANZA HACIA EL LÍQUIDO.	31
ECUACIÓN 10 GENERALIZACIÓN DE LA ECUACIÓN 9 PARA UN ÁREA SUPERFICIAL CONOCIDA.	33
ECUACIÓN 11 DESCRIPCIÓN NUMÉRICA DE LA SOLIDIFICACIÓN DE UNA PIEZA METÁLICA.	33
ECUACIÓN 12 OBTENCIÓN DEL TIEMPO DE SOLIDIFICACIÓN EN TÉRMINOS DE SU RAZÓN VOLUMEN A SUPERFICIE. REGLA DE CHVORINOV.	33
ECUACIÓN 13 DESCRIPCIÓN MATEMÁTICA DE LA CONSTANTE DE CHVORINOV.	33
ECUACIÓN 14 SIMPLIFICACIÓN DE LA REGLA DE CHVORINOV CON EL CONCEPTO DEL MÓDULO DE SOLIDIFICACIÓN.	34
ECUACIÓN 15 DESCRIPCIÓN DEL MÓDULO DE SOLIDIFICACIÓN.	34
ECUACIÓN 16 RESTRICCIÓN PARA EL CUMPLIMIENTO DE LA REGLA DE LOS MÓDULOS.	34
ECUACIÓN 17 REPRESENTACIÓN DEL MÓDULO GEOMÉTRICO AL TABAJAR CON PIEZAS MENOS COMPLEJAS.	35
ECUACIÓN 18 REPRESENTACIÓN DEL MÓDULO GEOMÉTRICO EN FUNCIÓN DE LA POSICIÓN DEL ALIMENTADOR.	35
ECUACIÓN 19 DEFINICIÓN MATEMÁTICA DEL MÓDULO DE ENFRIAMIENTO.	36
ECUACIÓN 20 MÓDULO DE ENFRIAMIENTO RELACIONADO CON EL ESPESOR EQUIVALENTE.	36
ECUACIÓN 21 DESCRIPCIÓN DEL FACTOR DE FORMA PARA CORRECCIÓN DEL ESPESOR EQUIVALENTE.	39
ECUACIÓN 22 A) Y B). CÁLCULO DE LA ALTURA DEL ALIMENTADOR A PARTIR DE SU DIÁMETRO DO.	40
ECUACIÓN 23 VALIDACIÓN DE LA REGLA DE LAS CONTRACCIONES.	42
ECUACIÓN 24 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE REYNOLDS.	46
ECUACIÓN 25 IDENTIFICACIÓN DEL FLUJO VOLUMÍNICO PARA LA ECUACIÓN DE CONTINUIDAD.	47
ECUACIÓN 26 TEOREMA DE BERNOULLI PARA CARACTERIZAR EL COMPORTAMIENTO DEL METAL LIQUIDO DURANTE EL LLENADO DEL MOLDE.	47
ECUACIÓN 27 FUNCIÓN DE BERNOULLI CONSIDERANDO EFECTOS DE LA VELOCIDAD LINEAL EN LA CAÍDA DE FLUJO METÁLICO.	48
ECUACIÓN 28 RELACIÓN DE LA VELOCIDAD A PARTIR DE LA ECUACIÓN DE BERNOULLI.	48
ECUACIÓN 29 DETERMINACIÓN DE LAS DIMENSIONES DE LA BAJADA DEL SISTEMA DE COLADA.	48
ECUACIÓN 30 DEFINICIÓN DEL GASTO VOLUMÉTRICO PROMEDIO.	48
ECUACIÓN 31 DEFINICIÓN DEL VOLUMEN DEL METAL EN TÉRMINOS BÁSICOS.	48
ECUACIÓN 32 SUSTITUCIÓN DEL GASTO VOLUMÉTRICO PROMEDIO EN TÉRMINOS DE VOLUMEN DE METAL.	49
ECUACIÓN 33 DEFINICIÓN BÁSICA DEL TÉRMINO DE VELOCIDAD.	49
ECUACIÓN 34 DEFINICIÓN DEL GASTO VOLUMÉTRICO PROMEDIO A PARTIR DEL TÉRMINO DE LA VELOCIDAD.	49
ECUACIÓN 35 GASTO VOLUMÉTRICO EN FUNCIÓN DE LA ALTURA.	49
ECUACIÓN 36 GASTO VOLUMÉTRICO PROMEDIO CONSIDERANDO EL ÁREA DE ESTRANGULAMIENTO Y LA ALTURA METALOSTÁTICA EFECTIVA H.	49
ECUACIÓN 37 DEFINICIÓN BÁSICA PARA EL GASTO PROMEDIO.	49
ECUACIÓN 38 DETERMINACIÓN DEL ÁREA DE ESTRANGULAMIENTO.	50
ECUACIÓN 39 RELACIÓN DEL GASTO VOLUMÉTRICO PROMEDIO INCLUYENDO EL PESO Y DENSIDAD DEL METAL.	50
ECUACIÓN 40 GASTO VOLUMÉTRICO PROMEDIO EN FUNCIONES DE LA ALTURA METALOSTÁTICA EFECTIVA, FACTOR DE FRICCIÓN Y FACTOR DE FLUIDEZ.	51
ECUACIÓN 41 ÁREA DE ESTRANGULAMIENTO BASADA EN LAS CARACTERÍSTICAS DEL GASTO VOLUMÉTRICO PROMEDIO.	51
ECUACIÓN 42. OBTENCIÓN DEL MÓDULO DEL ALIMENTADOR.	70

ECUACIÓN 43. MÓDULO DEL ALIMENTADOR EN FUNCIÓN DEL ESPESOR EQUIVALENTE E'	70
ECUACIÓN 44. OBTENCIÓN DEL DIÁMETRO DEL ALIMENTADOR D_0	71
ECUACIÓN 45. RESTRICCIÓN PARA EL CUMPLIMIENTO DE LA REGLA DE LAS CONTRACCIONES.	73
ECUACIÓN 46. RELACIÓN PARA LA CONTRACCIÓN DEL ALIMENTADOR BAJO ESTUDIO.	73

1. INDICE DE TALBAS DE REFERENCIA.

TABLA 1. FACTORES DE FORMA PARA GEOMETRÍAS EQUIVALENTES. PARTE 1 D E 3.	37
TABLA 1. FACTORES DE FORMA PARA GEOMETRÍAS EQUIVALENTES. PARTE 2 D E 3.	37
TABLA 1. FACTORES DE FORMA PARA GEOMETRÍAS EQUIVALENTES. PARTE 3 D E 3.	37
TABLA 2. VALOR DE “R” PARA RESPETAR LA REGLA DE LAS CONTRACCIONES PARA DISTINTOS TIPOS DE ALEACIONES Y SOBREAUMENTOS EN EL LÍQUIDO.	43
TABLA 3. VALORES DEL FACTOR DE DESCARGA B PARA UN SISTEMA DE COLADA DE RELACIÓN 1:2:1.	50
TABLA 4. RELACIONES DE COLADA CON UN FUNCIONAMIENTO ADECUADO EN EL REARTO DE METAL LIQUIDO.	53
TABLA 5. TIEMPOS CRÍTICOS DE APARICIÓN DE DEFECTOS SUPERFICIALES EN MOLDES DE ARENA. ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
TABLA 6. PROPORCIONES DEL MÓDULO DE SOLIDIFICACIÓN EN FUNCIÓN DEL VOLUMEN DE LA PIEZA TOTAL.	69
TABLA 6. PROPIEDADES FÍSICAS DEL SISTEMA DE COLADA Y ALIMENTACIÓN.	74