

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**SIMULACIÓN MEDIANTE EL PROGRAMA “VULCAN” DE LA
FUNDICIÓN DE TRES DIFERENTES GEOMETRIAS EN ALUMINIO**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO**

ESTEBAN DAVID HUACA DELGADO

esteban_huaca@yahoo.com

DIRECTOR: ING. FAUSTO OVIEDO

fausto.oviedo@epn.edu.ec

Quito, Octubre 2011

DECLARACIÓN

Yo, Esteban David Huaca Delgado bajo juramento que el presente trabajo es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado de calificación profesional; y que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mi derecho de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Esteban David Huaca Delgado

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por el Sr. Esteban David Huaca Delgado, bajo mi supervisión.

Ing. Fausto Oviedo
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por haberme bendecido en cada momento de mi vida, y por haberme puesto a mi lado a las personas más increíbles de este mundo, mis padres. Gracias a mis padres por todo su apoyo incondicional. A mi madre por haberme enseñado a buscar siempre alcanzar los mejores lugares y a mi padre por el ejemplo de esfuerzo, responsabilidad y trabajo en cada cosa que se propone. Sin ustedes, llegar hasta este punto hubiera sido imposible.

Esteban

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo a:

Mis padres Marcia y Henry que fueron quienes estuvieron siempre apoyándome y motivándome en todo momento durante toda mi carrera Universitaria. Y a mis hermanos Henry y André a quienes amo mucho.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS METALURGICOS	1
1.1 INTRODUCCION.....	1
1.2 PROPIEDADES DE LAS FUNDICIONES	2
1.2.1 FLUIDEZ	2
1.2.2 VISCOSIDAD	3
1.2.3 TENSIÓN SUPERFICIAL	3
1.2.4 CONTRACCIÓN	3
1.2.5 SEGREGACIÓN	4
1.3 SOLIDIFICACION DE PIEZAS FUNDIDAS	6
1.3.1 NUCLEACIÓN HOMOGÉNEA.....	7
1.3.2 NUCLEACIÓN HETEROGÉNEA.....	7
1.3.3 CRECIMIENTO DE NUCLEOS	7
1.4 DEFECTOS EN LAS PIEZAS FUNDIDAS	9
1.4.1 DEFECTOS DEBIDO A LA CONTRACCIÓN	9
1.4.1.1 Rechupes.....	9
1.4.1.2 Tensiones Internas, Grietas Y Deformaciones	12
1.4.2 DEFECTOS DEBIDOS A LOS GASES	14
1.4.2.1 Sopladuras, porosidad y ampollas.....	14
1.4.3 INCLUSIONES.....	16
1.4.4 SEGREGACIONES.....	16
1.4.5 DEFECTOS DEBIDOS A LA COLABILIDAD.....	17
1.4.6 DEFECTOS DEBIDOS A LA ALEACIÓN FRÍA	17
CAPITULO 2. METODO DE ELEMENTOS FINITOS	18
2.1 GENERALIDADES DEL MÉTODO	18
2.2 PROCEDIMIENTO GENERAL PARA EL ANÁLISIS MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS	20
2.2.1 PREPROCESO.....	20
2.2.2 SOLUCIÓN	21

2.3	SOLUCIÓN DE PROBLEMAS MEDIANTE SOFTWARE DE ELEMENTOS FINITOS	22
2.3.1	DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA	22
2.3.2	MALLADO DE LA GEOMETRÍA.....	22
2.3.3	DEFINICIONES DE LOS PARÁMETROS DEL MATERIAL Y DEL PROCESO	23
2.3.4	SIMULACIÓN.....	24
2.3.5	EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS	24
CAPITULO 3	PROCESO DE SIMULACIÓN EN VULCAN	25
3.1	DEFINICION DE PARAMETROS.....	25
3.1.1	DIMENSIONES DE LA GEOMETRÍA.....	25
3.2	PRE PROCESO.....	25
3.2.1	CREACIÓN DE LA ETRÍA.....	26
3.2.2	IMPORTACIÓN DE LA GEOMETRIA EN VULCAN.....	27
3.2.3	TRATAMIENTO DE LA GEOMETRIA.....	28
3.2.3.1	Área De Ingreso De Material.....	32
3.2.3.2	Generación De Volumen.....	32
3.2.4	MALLADO.....	34
3.2.5	DEFINICION DEL PROCESO	38
3.2.6	DEFINICIÓN DE LOS COMPONENTES DE FUNDICIÓN.....	40
3.2.7	DEFINICION DE LAS OPERACIONES.....	41
3.2.7.1	Operación de llenado (Filling)	41
3.2.7.2	Operación de Solidificación (Thermal Solidification)	44
3.2.8	CALCULO.....	47
3.3	POST PROCESO.....	48
3.3.1	ETAPA DE LLENADO.....	51
3.3.1.1	Ingreso del Metal Líquido en el Molde.....	51
3.3.1.2	Evolución De Temperatura.....	54

3.3.1.3 Velocidad De Llenado.	57
3.3.1.4 Última Zona En Llenar.	60
3.3.1.5 Encuentro de frentes.	61
3.3.1.6 Tiempo de Llenado.....	62
3.3.2 ETAPA DE SOLIDIFICACION.....	65
3.3.2.1 Evolución De Temperatura en la etapa de solidificación.....	66
3.3.2.2 Fracción Sólida.....	68
3.3.2.3 Modulo De Solidificación.....	71
3.3.2.4 Tiempo De Solidificación.....	72
3.3.2.5 DEFECTO NIYAMA.....	73
3.3.3 ETAPA DE ENFRIAMIENTO (Thermo-Mechanical).....	75
3.3.3.1 DESPLAZAMIENTOS.....	75
3.3.3.2 ESFUERZOS RESIDUALES.....	77
3.4 RESULTADOS OBTENIDOS.....	79
3.4.1 PRISMA.....	79
3.4.1.1 Primer Modelo.....	79
3.4.1.2 Segundo Molde	82
3.4.2 ESFERA.....	92
3.4.2.1 Primer Molde.....	92
3.4.2.2 SEGUNDO MOLDE.....	95
3.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	103
3.5.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL CILINDRO.....	103
3.5.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL PRISMA.....	104
3.5.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA ESFERA.....	106
3.5.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS GLOBAL.....	108

CAPITULO 4. FUNDICION DE ELEMENTOS SIMULADOS	110
4.1 ETAPA DE MOLDEO.....	110
4.1.1 MATERIALES DE MOLDEO.....	110
4.1.2 HERRAMIENTAS DE MOLDEO.....	110
4.1.3 PROCEDIMIENTO.....	111
4.2 ETAPA DE COLADO.....	114
4.2.1 PROCEDIMIENTO.....	114
4.3 ANÁLISIS DE LAS PIEZAS OBTENIDAS.....	115
4.3.1 ANÁLISIS DIMENSIONAL.....	115
4.3.2 ANÁLISIS METALOGRÁFICO.....	117
CAPITULO 5. CONCLUSIONES RECOMENDACIONES Y BIBLIOGRAFIA	122
5.1 CONCLUSIONES.....	122
5.2 RECOMENDACIONES.	123
5.3 BIBLIOGRAFÍA.....	124
ANEXOS	125

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Dimensiones Establecidas Para Cada Geometría.....	25
Tabla 3-2 Resumen de resultados obtenidos para cada una de las geometrías.....	108
Tabla 4-1 Análisis dimensional de las piezas obtenidas.....	116
Tabla 4-2 Resultados de tamaño y cantidad de poros y microrechupes en el interior de las piezas.....	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Variación del volumen con la temperatura. a) Para un	4
Figura 1.2 Proceso de solidificación metálico.....	6
Figura 1.3 Desarrollo de la estructura de grano columnar	8
Figura 1.4 Crecimiento dendrítico.....	8
Figura 1.5 Regla de los círculos inscritos	10
Figura 1.6 Regla de los círculos inscritos y espesores progresivos	10
Figura 1.7 Ejemplos de cómo unir paredes de espesor desigual en prolongación	11
Figura 1.8 Ejemplos de cómo unir dos paredes de diferente espesor que forman cierto ángulo	12
Figura 1.9 Ejemplos de cómo se puede corregir la formación grietas y deformación en las piezas	13
Figura 2.1 Representación de cualquier sistema a analizar por elementos finitos.	19
Figura 2.2 Diagrama esquemático de los pasos para la resolución	21
Figura 3.1 Barra de procesos.....	26
Figura 3.2 Geometría en formato *.iges importada desde Autodesk Inventor.....	27
Figura 3.3 Ventana administrador de capas.....	28
Figura 3.4 Ubicación del botón de capas en la barra de herramientas.....	29
Figura 3.5 Cambio de nombre para las capas.	29
Figura 3.6 Botones de colapsar entidades.	30
Figura 3.7 Visualización de la geometría colapsada.....	31
Figura 3.8 Creación de las superficies superior e inferior.....	31
Figura 3.9 Icono para la creación de un agujero sobre una superficie.....	32
Figura 3.10 Creación de agujero para el ingreso de la colada sobre.....	32
Figura 3.11 Geometría con volumen de molde y pieza generado.....	33
Figura 3.12 Geometría lista para la siguiente fase.....	34
Figura 3.13 Preferencias de mallado.....	35
Figura 3.14 Tamaño de malla.....	35
Figura 3.15 Submenú del botón de mallado.	37
Figura 3.16 Definición del tamaño de los elementos generados en la malla.....	37
Figura 3.17 Icono para visualizar la geometría mallada.....	38

Figura 3.18 Geometría mallada.....	38
Figura 3.19 Definición del tipo de proceso.....	39
Figura 3.20 Configuración de parámetros: constante de gravedad, temperatura ambiente, unidades de trabajo y dirección de gravedad.....	39
Figura 3.21 Definición de los componentes de fundición.....	40
Figura 3.22 Ventana Definición de Operaciones.....	42
Figura 3.23 Añadir proceso.....	42
Figura 3.24 Valores establecidos para la operación de llenado (Filling1) en la ventana Strategy.....	43
Figura 3.25 Parámetros de configuración para la pestaña Contactos.....	43
Figura 3.26 HTC-Env.....	44
Figura 3.27 Parámetros pestaña Strategy. Operación de Solidificación.....	45
Figura 3.28 Parámetros pestaña Contacts. Operación de Solidificación.....	46
Figura 3.29 Parámetros pestaña HTC-Env. Operación de Solidificación.....	46
Figura 3.30 Parámetros pestaña Special Output. Operación de Solidificación.....	47
Figura 3.31 Parámetros de configuración en fase de cálculo.....	48
Figura 3.32 Ventana de Finalización de cálculo.....	48
Figura 3.33 Icono para cambiar entre pre y postproceso.....	49
Figura 3.34. Cargar resultados. Etapa de Post-proceso.....	50
Figura 3.35 Barra de resultados.....	50
Figura 3.36 Ventana para cargar resultados.....	50
Figura 3.37 Configuración de animación del proceso de llenado.....	51
Figura 3.38 Evolución del metal líquido a través del molde en la fase de llenado. Modelo 1.....	52
3.39 Evolución del metal líquido a través del molde en la fase de llenado. Modelo 2.....	53
Figura 3.40 Configuración de animación para la evolución de temperaturas.....	54
Figura 3.41 Evolución de temperaturas en la operación de llenado. Modelo 1.....	55
Figura 3.42 Evolución de temperaturas en la operación de llenado. Modelo 2.....	56
Figura 3.43 Herramienta para visualizar perfil de vector velocidades.....	57
Figura 3.44 Vectores de velocidad durante la operación de llenado. Modelo 1.....	58
Figura 3.45 Vectores de velocidad durante la operación de llenado. Modelo 2.....	59

Figura 3.46 Ultima zona en llenar. Modelo 1.....	60
Figura 3.47 Ultima zona en llenar. Modelo 2.....	60
Figura 3.48 Encuentro de frentes del metal liquido. Modelo 1.....	61
Figura 3.49 Encuentro de frentes del metal liquido. Modelo 2.....	62
Figura 3.50 Tiempo de llenado del metal liquido en el molde. Modelo 1.....	63
Figura 3.51 Tiempo de llenado del metal líquido en el molde. Modelo 2.	64
Figura 3.52 Carga de los resultados para la operación de solidificación.....	65
Figura 3.53 Barra de resultados. Agrupación de botones según el proceso.....	65
Figura 3.54 Evolución de temperaturas en la operación de solidificación. Modelo 1	67
Figura 3.55 Evolución de temperaturas en la operación de solidificación. Modelo 2	68
Figura 3.56 Resultados de Fracción Sólida. Modelo 1.....	69
Figura 3.57 Resultados de fracción solida. Modelo 2.....	70
Figura 3.58 Resultado del Módulo de solidificación. Modelo 1.....	71
Figura 3.59 Resultado del Módulo de solidificación. Modelo 2.....	71
Figura 3.60 Resultados del tiempo de solidificación. Modelo 1.....	72
Figura 3.61 Resultados del tiempo de solidificación en corte longitudinal. Modelo 1.	72
Figura 3.62 Resultados del tiempo de solidificación para el cilindro. Modelo 2.....	73
Figura 3.63 Resultados Defectos Niyama. Modelo 1	74
Figura 3.64 Resultados Niyama. Modelo 2.....	74
Figura 3.65 Carga de resultados para la operación de Enfriamiento.....	75
Figura 3.66 Resultados de desplazamiento y deformación en la pieza solidificada. Modelo 1.....	76
Figura 3.67 Resultados de desplazamiento. Pieza y molde. Modelo 1.....	77
Figura 3.68 Resultados de desplazamiento. Modelo 2.....	77
Figura 3.69 Resultados J2- Stresses. Modelo 1.....	78
Figura 3.70 Resultados J2- Stresses. Modelo 2.....	78
Figura 3.71 Resultados de fracción solida para el prisma. Modelo 1.....	80
Figura 3.72 Resultados de evolución de temperaturas en la etapa de solidificación. Modelo 1.....	81

Figura 3.73 Resultados de la Fracción Solida para el prisma.....	83
Figura 3.74 Evolución de Temperaturas en la etapa de solidificación para el prisma.....	84
Figura 3.75 Resultados de velocidades en la fase de llenado al interior del molde	85
Figura 3.76 Evolución de temperaturas en la fase de ingreso al molde.....	86
Figura 3.77 Resultados de la última zona en llenarse de metal líquido.....	87
Figura 3.78 Resultados del tiempo de llenado de metal liquido en el molde.....	88
Figura 3.79 Resultado del Modulo de Solidificación.....	88
Figura 3.80 Resultado del Modulo de Solidificación en corte longitudinal.	89
Figura 3.81 Resultados del Tiempo de Solidificación para el prisma.....	89
Figura 3.82 Resultados del Tiempo de Solidificación en corte longitudinal	90
Figura 3.83 Resultado de Defecto Niyama.....	90
Figura 3.84 Resultados de los desplazamientos provocados en la etapa de solidificación.....	91
Figura 3.85 Resultados de los esfuerzos provocados en la etapa de solidificación.....	91
Figura 3.86 Resultados de la fracción solida de solidificación. Modelo 1.....	93
Figura 3.87 Resultados de la evolución de temperaturas en la etapa de solidificación. Modelo 1.....	94
Figura 3.88 Resultados de Fracción Solida para la esfera hueca. Modelo 2.....	96
Figura 3.89 Resultados de evolución de temperatura en la etapa de solidificación. Modelo 2.....	97
Figura 3.90 Resultados de Temperaturas en la etapa de llenado. Modelo 2.....	98
Figura 3.91 Resultados de la evolución de velocidades en la fase de ingreso.....	99
Figura 3.92 Resultado de las últimas zonas en llenarse.....	99
Figura 3.93 Resultados del tiempo de llenado. Modelo 2.....	100
Figura 3.94 Resultado del Modulo de Solidificación para la esfera.....	101
Figura 3.95 Resultados del Defecto Niyama.....	101
Figura 3.96 Resultados de desplazamientos ocasionados en la etapa de enfriamiento.....	102
Figura 3.97 Resultados de los Esfuerzos Residuales ocasionados en la etapa de enfriamiento.....	102

Figura 4.1 Moldeo de la parte inferior del modelo.....	112
Figura 4.2 Moldeo de la parte superior del modelo.....	112
Figura 4.3 Eliminación de humedad del molde.....	113
Figura 4.4 Molde superior para el prisma y l cilindro	113
Figura 4.5 Molde inferior para el prisma y l cilindro	114
Figura 4.6 Colado del metal fundido.....	115
Figura 4.7 Esquema de la geometría de las piezas con sus dimensiones.....	115
Figura 4.8 Cilindro obtenido de la fundición.....	116
Figura 4.9 Prisma obtenido de la fundición.....	117
Figura 4.10 Esfera obtenida de la fundición.....	117
Figura 4.11 Identificación de la muestras en la sección transversal del sistema mazarota-cilindro.....	118
Figura 4.12 Micrografía (10x) de identificación y dimensiones de porosidades y microrechupes para el cilindro en un área de 1cm ² . (Muestra C1 izquierda y muestra C2 derecha).....	118
Figura 4.13 Identificación de la muestras en la sección transversal del sistema mazarota-esfera.....	119
Figura 4.14 Micrografía (10x) de identificación y dimensiones de porosidades y microrechupes para la esfera en un área de 1cm ² . (Muestra E1 izquierda y muestra E2 derecha).....	119
Figura 4.15 Identificación de la muestras en la sección transversal del sistema mazarota-prisma.....	120
Figura 4.16 Micrografía (10x) de identificación y dimensiones de porosidades y microrechupes para el prisma en un área de 1cm ² . (Muestra P1 izquierda y muestra P2 Derecha).....	120

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTOS METALURGICOS

Este capítulo describe principios metalúrgicos relacionados con los principales defectos microestructurales que se generan en el proceso de fundición.

1.1 INTRODUCCION

La fundición es una de las principales formas de producción de piezas industriales. En comparación con otros métodos de elaboración de piezas brutas para máquinas (laminado, forja, soldado), la fundición permite obtener piezas de compleja configuración, con un sobre espesor para el maquinado y buenas propiedades mecánicas. En muchos casos los logros de la ciencia moderna permiten efectuar un cambio básico en el proceso tecnológico, elevar considerablemente la productividad del trabajo, crear máquinas automáticas nuevas para fundición y, como resultado, mejorar la calidad de los artículos y elevar la eficacia de la producción.

Los principales procesos en la producción de piezas moldeadas son la fusión del metal, la elaboración de moldes, el llenado del metal, el enfriamiento, el desmolde, la limpieza, el desbarbado, el tratamiento térmico y el control de la calidad de las piezas.

Se fabrican piezas fundidas de aleaciones férreas, (acero, fundición gris y nodular), como también de metales no ferrosos y aleaciones (cobre, aluminio, magnesio).

El método principal de fabricación de piezas fundidas es el vaciado en moldes de arena en los que se obtiene cerca de un 80 % de la cantidad total de artículos fundidos. Sin embargo, la precisión y la rugosidad de la superficie de las piezas, obtenidas en moldes de arena, en muchos casos no satisfacen las exigencias de la industria de construcción de maquinaria. A consecuencia de ello cada vez más se emplean métodos de colada especiales: en moldes metálicos (coquillas), a presión, colada a la cera perdida, centrífuga, en cáscaras, que permiten obtener

piezas de precisión elevada, con pequeña rugosidad de la superficie y un volumen mínimo para el labrado por corte.

1.2 PROPIEDADES DE LAS FUNDICIONES

Se considera como propiedades tecnológicas de los metales aquellas que se muestran durante el llenado del molde, la cristalización y el posterior enfriamiento. Las propiedades tecnológicas de la fundición más importantes son: la fluidez, la contracción (volumétrica y lineal), disposición a la segregación, la creación de grietas calientes, la absorción de gases y creación porosidades.

Las propiedades tecnológicas de fundición más importantes son la fluidez, viscosidad, la contracción (volumétrica y lineal), la tendencia de las aleaciones a la segregación, a la creación de grietas en caliente, a la absorción de gases y creación de porosidades de gas.

1.2.1 FLUIDEZ

Esta es la propiedad de los metales en estado líquido de llenar una cavidad del molde y reproducir con exactitud los contornos de la moldura. Una buena fluidez del metal, asegura fundiciones compactas, detalladas y de alta calidad. Esta depende de las propiedades físicas del metal como la viscosidad u la tensión superficial. Además, sobre la fluidez ejerce influencia el contenido de impurezas en el metal o aleación, la tendencia a la oxidación y la capacidad de extracción del calor el molde de fundición. Casi en todos los metales y aleaciones cuanto mayor es la viscosidad, tanto menor es la fluidez.

También las características del molde influyen en la fluidez del material ya que al llenar el molde las paredes extraen calor de la masa fundida. La facultad del molde de extraer el calor de la masa fundida se determina por su capacidad de acumulación de calor. El molde de arena extrae el calor lentamente y la masa fundida lo llena mejor que el molde de metal, puesto que el molde metálico enfría con más intensidad el metal fundido en movimiento.

1.2.2 VISCOSIDAD

Es una propiedad dinámica de las fundiciones que se caracteriza por el frotamiento recíproco de las partículas durante el movimiento. Esta depende de algunos factores como la temperatura, la composición y la existencia de inclusiones. Una alta viscosidad del metal fundido con frecuencia es motivo de defectos en la pieza final, debido a que produce un llenado incompleto.

1.2.3 TENSION SUPERFICIAL

La tensión superficial es una característica muy importante de la aleación líquida. Al aumentar la tensión superficial empeora la fluidez, especialmente al llenar canales delgados.

1.2.4 CONTRACCIÓN

Esta es una propiedad de los metales que consiste en reducir su volumen durante la solidificación y el enfriamiento. Es común diferenciar las contracciones lineal y volumétrica que no se suelen expresar en valores relativos si no en porcentajes.

Para un metal puro, la variación más importante de volumen se produce en el punto de transformación de líquido a sólido. En cambio para una aleación, la variación más importante se produce en el intervalo de solidificación. Las siguientes figuras exponen esta variación:

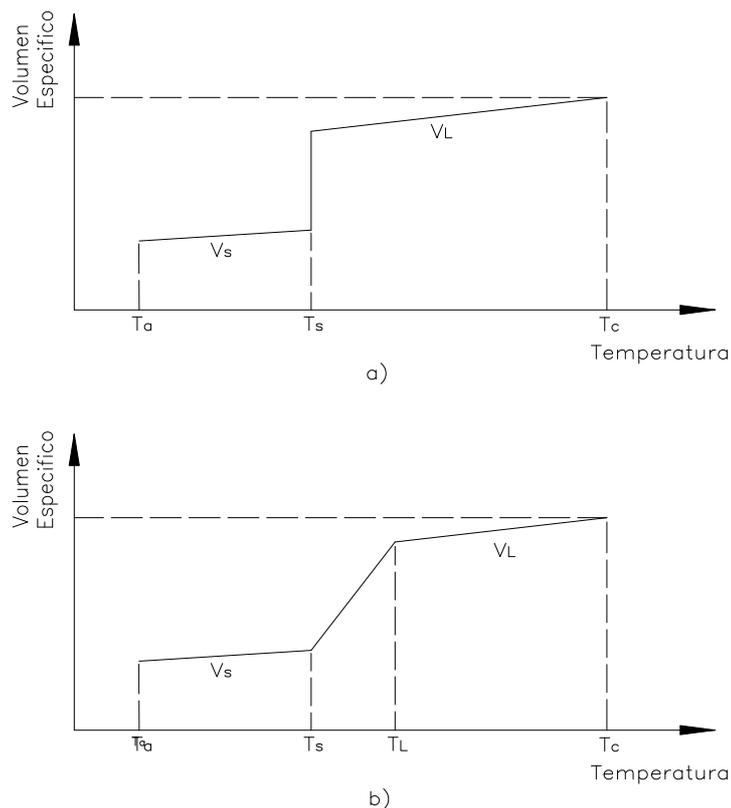


Figura 1.1 Variación del volumen con la temperatura. a) Para un Metal puro b) para una aleación

Donde, T_a es la temperatura ambiente, T_s la de sólidos, T_L la de líquidos, y T_c la temperatura de colada.

Para corregir la contracción debida a la solidificación es necesario crear un depósito de alimentación al que se lo conoce como mazarota, el cual se sitúa generalmente en la parte superior del molde y se llena de metal líquido juntamente con la pieza. Esta mazarota debe ser diseñada para que solidifique después de la pieza.

1.2.5 SEGREGACIÓN

La segregación es la heterogeneidad de la composición química de la aleación en diferentes partes de la pieza o lingote. La segregación surge en el proceso de solidificación de la pieza. El motivo de la segregación consiste en la distinta

solubilidad de los diversos componentes de la aleación en sus fases sólida y líquida. Cuanto mayor es esta diferencia, tanto más heterogénea es la distribución de la impureza por la sección de la pieza y tanto mayor es la segregación de la impureza. En las aleaciones hierro carbono es considerable la segregación del azufre, fósforo y carbono. La segregación provoca la heterogeneidad de las propiedades mecánicas en las distintas partes de la pieza, lo que provoca la rotura de las piezas durante la el posterior mecanizado. Se distingue la segregación dendrítica y zonal.

La segregación dendrítica es la heterogeneidad química de algunas dendritas de la aleación. Esta surge a consecuencia del proceso de "cristalización selectiva". Es decir los ejes de las dendritas que crecen en primer lugar contienen menos cantidad de impurezas que la aleación inicial, y la aleación líquida restante se enriquece con impurezas. Como resultado, en los espacios interaxiales de las dendritas se acumulan las impurezas, y surge la segregación dentro de las dendritas.

La segregación zonal es la heterogeneidad de la aleación en las distintas partes de la pieza que se solidifica. En este tipo de segregación tiene gran importancia la cristalización selectiva, y además los procesos que provocan el desplazamiento de los elementos segregados de una parte de la pieza a la otra durante la cristalización. Estos pueden ser la difusión de las impurezas de la zona de dos fases de la pieza que se cristaliza en el volumen de la aleación líquida que no se ha solidificado, las corrientes de convección en la parte líquida de la aleación, la emulsión de los volúmenes impregnados de impurezas a consecuencia de su menor densidad en comparación con la aleación básica, la acción de fuerzas centrifugas, etc.

Para eliminar el fenómeno de la segregación dendrítica las piezas se someten a un recocido, en cuyo proceso se nivela el contenido de impurezas en los límites de diversas dendritas. Mediante el tratamiento térmico es imposible eliminar la segregación zonal. Por eso, para disminuir la segregación zonal es necesario igualar el espesor de las paredes de la pieza evitando la creación de bloques

macizos en los cuales es difícil lograr la solidificación uniforme de la pieza y evitar la acumulación de segregados. Otra manera de disminuir la segregación zonal es emplear el suministro descentralizado de metal al molde, de las distintas partes de la pieza; aumentar la velocidad de enfriamiento de la pieza empleando mezclas de moldeo con elevada capacidad de acumulación térmica. Las aleaciones propensas a la segregación zonal se deben vaciar con un recalentamiento mínimo sobre la temperatura del liquidus.

1.3 SOLIDIFICACION DE PIEZAS FUNDIDAS

La solidificación es el proceso en donde ocurre la transformación de la fase líquida a la fase sólida. Para que esta transformación se dé inicio es necesario tener un cambio de energía libre negativo. Al existir este cambio de energía la solidificación se produce por un proceso de nucleación y crecimiento. Donde la nucleación consiste en el agrupamiento de átomos dispuestos en el orden de la nueva fase para formar pequeños núcleos en la fase anterior. El crecimiento consiste en que los núcleos estables inicialmente formados crecen de tamaño por transporte o movimiento y reordenamiento de átomos, también conocido como difusión.

Al intervenir en este proceso la difusión, implica que depende de la temperatura y de un proceso de cambio térmicamente activado.

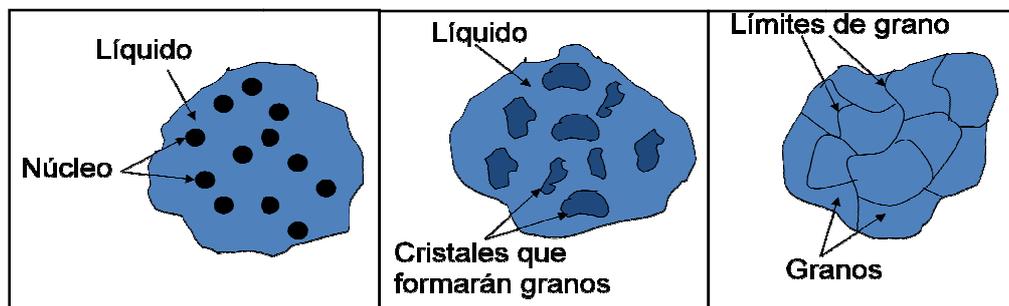


Figura 1.2 Proceso de solidificación metálica

1.3.1 NUCLEACIÓN HOMOGÉNEA

La nucleación homogénea se da cuando la probabilidad de formar un núcleo es la misma en todas las partes del metal fundido. Sin embargo es muy difícil encontrar este tipo de nucleación. En la mayoría de los casos prácticos, siempre hay lugares en el sistema donde se produce preferentemente la nucleación que en otros, porque la energía de activación es menor en esos lugares.

1.3.2 NUCLEACIÓN HETEROGÉNEA

Es la nucleación que tiene lugar en un líquido sobre la superficie del recipiente que lo contiene, impurezas insolubles, u otros materiales estructurales que disminuyan la energía libre requerida para formar un núcleo estable. Al verter el metal fundido en el molde que se encuentra a una temperatura menor que la del líquido derretido, la parte del líquido que entra en contacto con la superficie del molde adquiere rápidamente un sub-enfriamiento necesario, por lo que en la superficie se tendrá una zona preferente donde se iniciará la nucleación. La fase líquida casi siempre contiene partículas de impurezas en suspensión o inclusiones no metálicas que también dan lugar a la nucleación.

La energía libre volumétrica necesaria para iniciar un núcleo estable es mucho menor en el caso heterogéneo. Lo que significa un sub-enfriamiento menor y, por tanto, una nucleación más fácil.

1.3.3 CRECIMIENTO DE NUCLEOS

De los numerosos núcleos que se forman inicialmente en las paredes del molde, solo unos pocos crecen de las paredes hacia el interior del líquido. La transformación del líquido en sólido presenta típicamente una estructura semejante a un árbol como se muestra en la figura 1.4. Las estructuras que se forman reciben el nombre de dendritas, y se caracterizan por un largo tallo con ramas cortas que se extienden a partir de un tallo largo. Al tallo largo se la conoce como dendrita primaria, y a las ramas se las llama dendritas secundarias. La dendrita primaria es una de los núcleos de la pared del molde que creció

favorablemente en dirección perpendicular a la pared del molde y opuesta a la dirección de extracción de calor de la misma pared. El tamaño de las dendritas primarias y la separación entre ellas, así como el de las dendritas secundarias y su separación, se pueden controlar mediante la velocidad de enfriamiento. Cuando se enfrían con mayor velocidad, crecen más núcleos y la separación y el tamaño de las dendritas disminuye

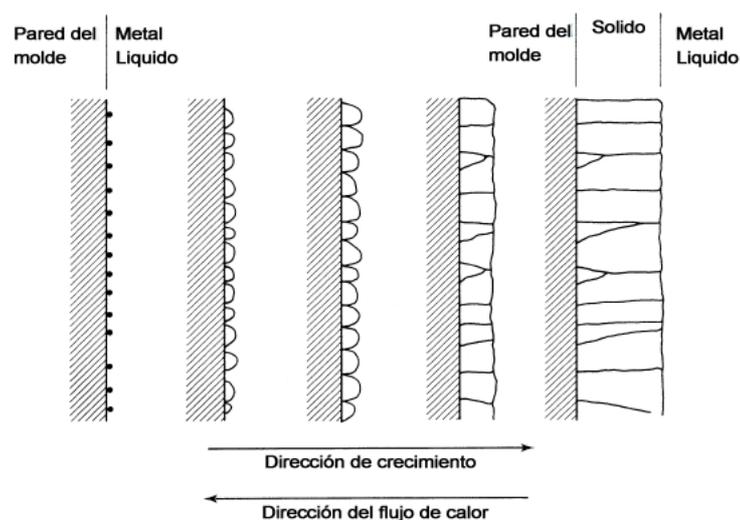


Figura 1.3 Desarrollo de la estructura de grano columnar

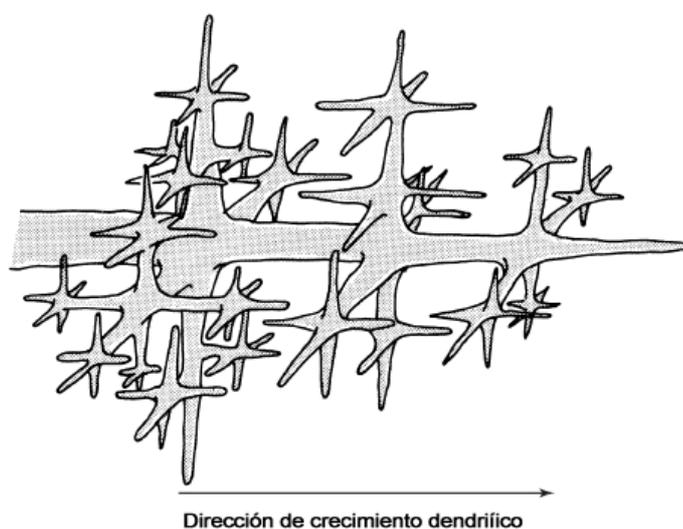


Figura 1.4 Crecimiento dendrítico

1.4 DEFECTOS EN LAS PIEZAS FUNDIDAS

A continuación se explican los defectos más destacados, tratando de conocer sus posibles causas y la forma de corregirlos. Para facilitar su estudio, están agrupados según las causas capaces de producirlos.

1.4.1 DEFECTOS DEBIDO A LA CONTRACCIÓN

La contracción excesiva implica que las dimensiones de la pieza diferirán de las esperadas, esta disminución de volumen que experimenta la aleación puede dar paso a los siguientes defectos.

1.4.1.1 Rechupes

Un rechupe es una cavidad asimétrica o área esponjosa, limitada por una bella superficie de cristales dendríticos. Un rechupe resulta de los distintos valores de la contracción, mientras el metal pasa del estado líquido al sólido.

Una de las formas para evitar la aparición de rechupes es con el uso de mazarotas o la solidificación dirigida. A continuación se explican las normas a que debe ajustarse el diseño de las piezas, con el objeto de eliminar las acumulaciones de masa o puntos calientes que, por solidificar en último lugar, pueden dar origen a rechupes.

En el diseño de las piezas se deben seguir las siguientes reglas:

1. Hay que evitar las concentraciones locales de masas, o lo que es igual, conseguir que los espesores se mantengan tan uniformes como sea posible en toda la pieza. Esto queda resumido en la regla de los círculos inscritos, según la cual, los diámetros de los círculos inscritos en las distintas secciones rectas de la pieza deben ser iguales o muy poco diferentes. En la figura 1.5 vemos algunos ejemplos de esta regla.

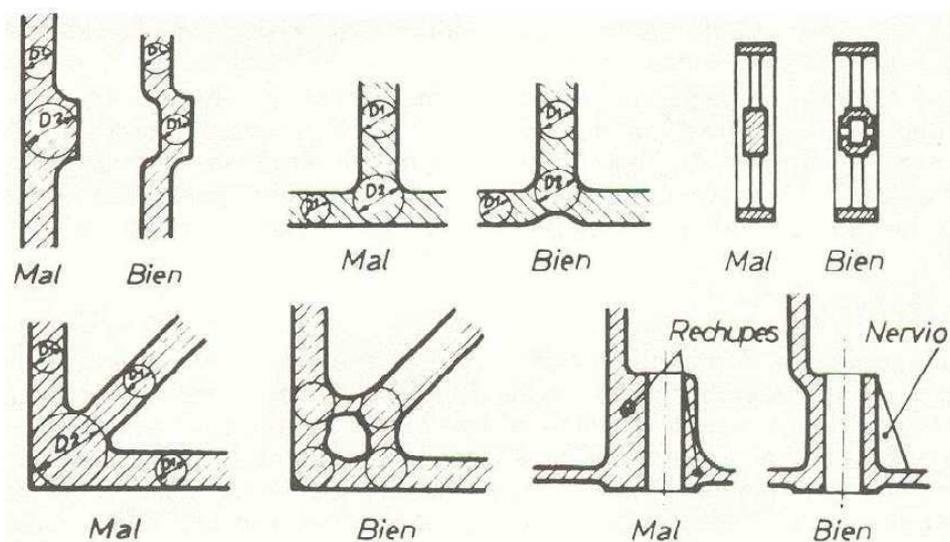


Figura 1.5 Regla de los círculos inscritos

2. En los casos en que sea imposible mantener la uniformidad de los espesores hay que procurar que, estando la pieza en posición de colada, las secciones transversales vayan aumentando de espesor en función de la altura. Esta condición queda resumida en la segunda regla de los círculos inscritos, según la cual: Si no es posible mantener los espesores constantes, se procurará que su aumento sea progresivo de abajo hacia arriba en la posición de moldeo, o bien, los diámetros de los círculos inscritos en las secciones rectas de la pieza deben crecer lentamente desde la sección más baja de la pieza, en la posición del molde hacia arriba. Adoptando este trazado, se consigue una solidificación dirigida de abajo a arriba, que hace el efecto de una mazarota. En la figura 1.6 se indican algunos ejemplos de esta regla.

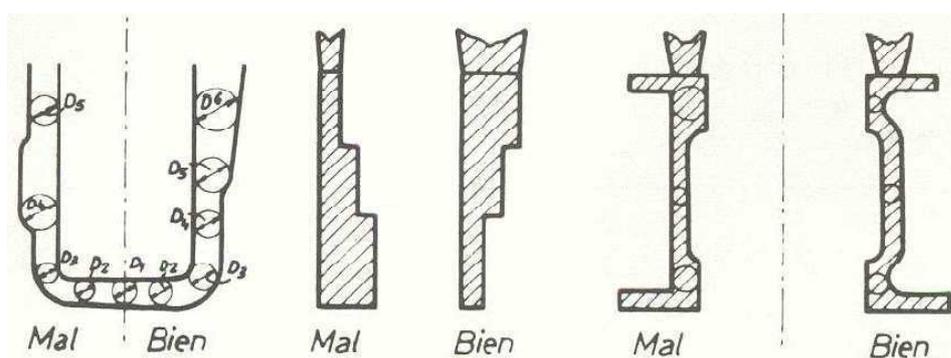


Figura 1.6 Regla de los círculos inscritos y espesores progresivos

3. Evitar los efectos de los ángulos. Cuando una pieza presenta ángulos, la velocidad de solidificación en los vértices de los ángulos salientes, es mayor que la de las zonas adyacentes. El fenómeno es debido a que un volumen de metal situado en el vértice tiene mayor superficie de contacto con el molde y, por tanto, mayor velocidad de enfriamiento que otro volumen igual más alejado de él. El efecto es más intenso cuanto más agudo es el ángulo.

En los ángulos entrantes sucede todo lo contrario, es decir, que la velocidad de solidificación es mucho menor en el vértice que en las zonas adyacentes. La explicación del fenómeno es bien sencilla, ya que, según solidifica la pieza, un volumen de metal líquido situado en el vértice, no tiene prácticamente superficie de contacto con el molde, por tanto, su velocidad de enfriamiento será muy inferior a la de otro volumen igual situado en una zona más alejada. Aquí también el efecto es más intenso cuanto más agudo es el ángulo. En consecuencia, en las piezas con ángulos agudos entrantes, se originan zonas calientes que pueden producir rechupes y grietas, por tanto, dichos ángulos deben evitarse a toda costa en las piezas moldeadas.

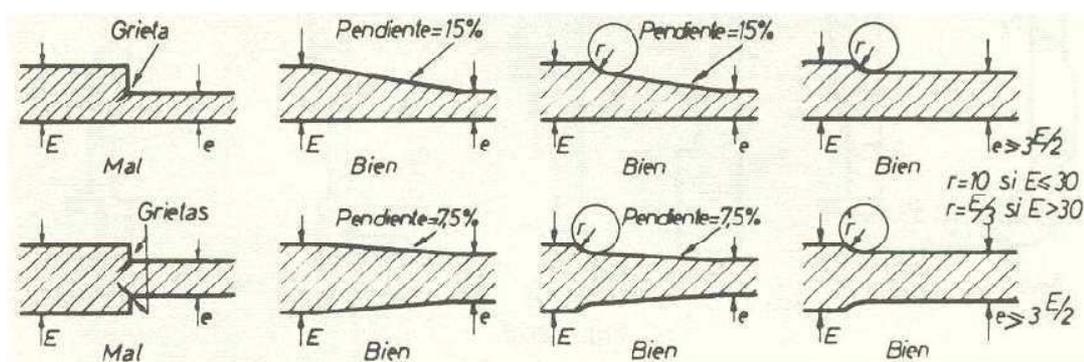


Figura 1.7 Ejemplos de cómo unir paredes de espesor desigual en prolongación

Estos efectos se pueden evitar en parte empleando diseños adecuados de las piezas, en los que se supriman los cambios bruscos de sección (ángulos agudos entrantes), sustituyéndolos por radios de unión adecuados o uniones progresivas. A continuación se muestran diferentes uniones a modo de ejemplo, para evitar estos efectos.

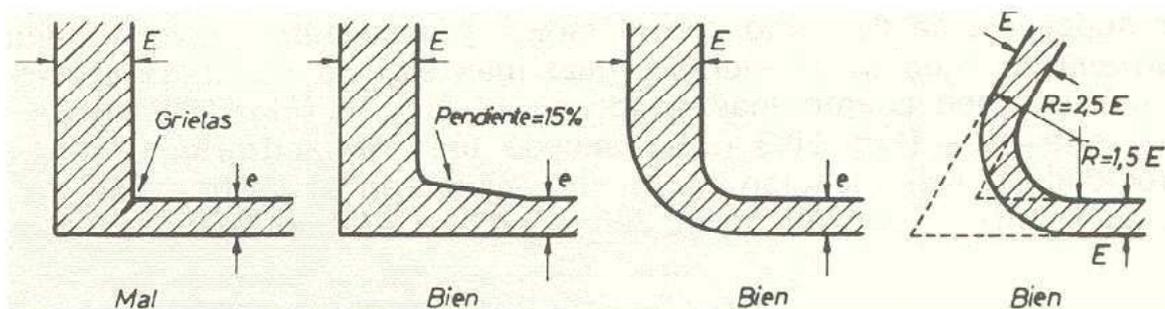


Figura 1.8 Ejemplos de cómo unir dos paredes de diferente espesor que forman cierto ángulo

1.4.1.2 Tensiones Internas, Grietas Y Deformaciones

En las piezas fundidas durante su solidificación y enfriamiento, se genera una contracción del metal lo que provoca que surjan tensiones internas. La aparición de tensiones internas en la pieza fundida, puede llegar a provocar deformación de la pieza, y a veces el surgimiento de grietas, las cuales se producen en el frenado de la contracción por el molde. Durante la contracción, la pieza fundida presiona con sus partes salientes el macho o el molde. Al mismo tiempo el molde obstaculiza la contracción provocando las tensiones en la pieza fundida. La magnitud de estas tensiones depende de la compresibilidad del molde y de los machos. A mayor compresibilidad menor es la tensión provocada y disminuye la probabilidad del surgimiento de grietas. Para que una pieza moldeada esté exenta de tensiones internas, tanto durante su enfriamiento como después del mismo, es necesario, en primer lugar, que toda su masa se conserve isotérmica, desde el final de la solidificación hasta que alcance la temperatura ambiente. Para conseguirlo se deben utilizar sistemas de alimentación que no generen grandes diferencias de temperatura en las distintas zonas de las piezas; al mismo tiempo los moldes se deben construir de forma que no impidan la libre contracción.

Cuando se producen tensiones internas, los esfuerzos resultantes son capaces de producir roturas, grietas y deformaciones (Figura 1.9). Este fenómeno es especialmente intenso cuando el metal está aún en estado pastoso (dendritas y líquido) o inmediatamente después de la solidificación, cuando su resistencia es todavía muy baja. Las grietas pueden ser superficiales o internas.

Una grieta o rajadura formada durante el enfriamiento de la pieza tiene generalmente la superficie de rotura decolorada, pudiendo variar de azulada a rojiza.

Una fractura limpia o recién hecha indica una grieta originada por causas mecánicas o tensiones externas, una vez se ha enfriado completamente la pieza.

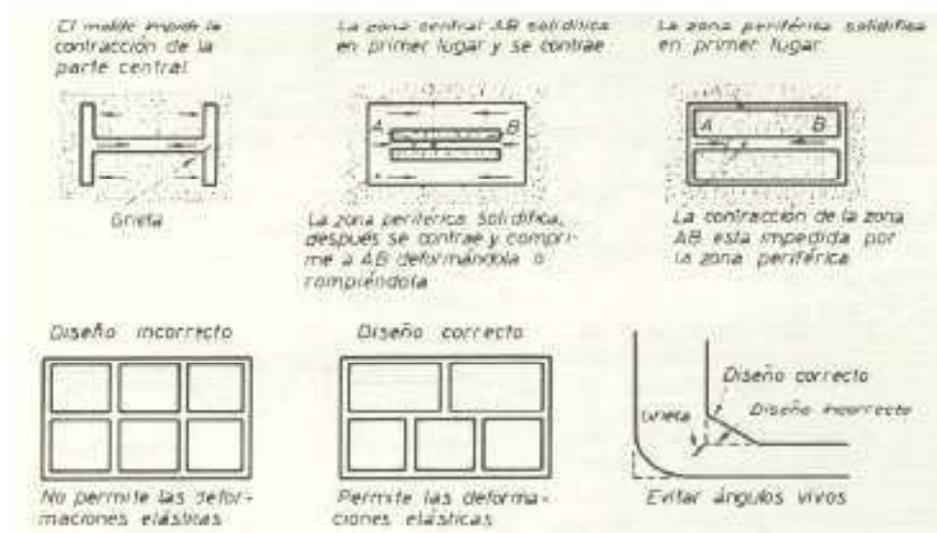


Figura 1.9 Ejemplos de cómo se puede corregir la formación de grietas y deformación en las piezas

Estos efectos pueden evitarse, en cierto modo, si se tienen en cuenta las siguientes reglas:

1. Diseñar las piezas de forma que se mantengan los espesores constantes y se supriman los cambios bruscos de sección (ángulos agudos entrantes) sustituyéndolos por radios de unión adecuada o uniones progresivas (Figuras 6.3, 6.4 y 6.5).
2. Comenzar el llenado del molde por las partes más delgadas y acelerar el enfriamiento de las más voluminosas con enfriadores externos o internos.
3. Emplear molde y machos lo suficientemente deformables para que cedan a la contracción. Contener travesaños de la caja de moldear extendidos dentro de profundas bolsas del molde, que no permiten la correcta contracción de la pieza fundida.

4. Adoptar sistemas para que las piezas puedan deformarse libremente, con el fin de que no generen ninguna rigidez local. Aunque se tomen las debidas precauciones, la mayor parte de las piezas fundidas, después de frías, están sometidas a tensiones internas, que pueden originar roturas o deformaciones en servicio. Cuando las piezas son de precisión (bancadas de máquinas-herramientas, camisas de motores, mármoles, carros, deslizadera, etc.) deben conservar perfectamente su forma y dimensiones durante su vida de servicio; para ello es necesario que estas piezas estén exentas de tensiones internas. Para conseguirlo, las piezas son sometidas antes del mecanizado, a un tratamiento de estabilización o recocido contra tensiones, el cual consiste en calentarlas lentamente hasta una temperatura adecuada, en función del material, durante cuatro o cinco horas, seguido de un enfriamiento muy lento. En las piezas de calidad muy eleva, se suele realizar un segundo tratamiento de estabilización, después del mecanizado principal y antes del acabado final.

1.4.2 DEFECTOS DEBIDOS A LOS GASES

Durante el vaciado de la colada en el molde, se producen gases procedentes tanto del metal líquido como de los materiales empleados en el molde y machos:

- Del metal, que como cualquier otro líquido, disuelve gases y vapor de agua en cantidad limitada, dependiente de la temperatura y presión. Estos gases los absorbe la atmósfera del horno durante la fusión y los desprende durante la solidificación. Los más frecuentes son: H_2 , O_2 , N_2 , CO , CO_2 , CH_4 , SO_2 .
- De los materiales empleados en la confección del molde y de los machos. Cuando la evacuación de los gases no se completa, algunos pueden quedar aprisionados en la aleación después de solidificar, en forma de porosidades o sopladuras.

1.4.2.1 Sopladuras, porosidad y ampollas

Son pequeñas cavidades vacías que se forman en la pieza fundida durante el proceso de solidificación del metal a causa de los gases que se hallan disueltos

junto con el metal fundido, en forma de soluciones o composiciones químicas, que al intentar salir a la atmósfera producen las porosidades. Estas reducen la resistencia del material y por ello son inadmisibles.

Las sopladuras producidas por burbujas de gas encerradas en el metal se encuentran rara vez en la superficie inferior de la pieza. Pueden presentarse como una lisa y uniforme depresión sobre los lados o en la parte superior, o bien como una serie de desiguales e irregulares depresiones en la parte alta de la pieza, especialmente cuando se trata de piezas que tienen superficies planas en dicha zona.

Las sopladuras de machos se muestran generalmente sobre la superficie en contacto con los machos o cerca de ella. La porosidad es producida por el vapor o gas que atraviesa el metal en estado líquido, y puede ir acompañada de lodo, sedimentos o tierra (escoria del molde). A pesar de todo, es un defecto que se clasifica como sopladura, aunque a veces parezca un rechupe y como tal sea considerado.

Estos defectos pueden evitarse siguiendo las siguientes indicaciones:

- Disponiendo la colada de forma que los gases puedan ascender libremente y salir a través de la mazarota.
- Realizando pequeños agujeros en lugares adecuados del molde.
- Atacando la arena del molde de forma que la permeabilidad sea máxima.
- Colocando los machos de forma que sus conductos de evacuación estén en comunicación con el exterior.
- Empleando una temperatura de colada lo más baja posible y dejando la aleación en reposo durante un cierto tiempo, para que se desprenda la mayor cantidad de gases.
- Efectuando la fusión y la colada en vacío.

1.4.3 INCLUSIONES

Son partículas no metálicas de materiales mezclados en la aleación, que inevitablemente se encuentran en el metal fundido en el momento de la colada, y que accidentalmente pueden incorporarse durante ella. Si estas inclusiones están en la superficie de la pieza, quedan generalmente separadas durante la limpieza de la misma, dejando tan sólo los huecos.

Estas inclusiones producen discontinuidades en la masa metálica, con lo cual afectan a las características mecánicas de la pieza. A las procedentes del metal se les denomina naturales o endógenas y a las otras, accidentales o exógenas. Las primeras suelen estar formadas por óxidos, silicatos y sulfuros, mientras que las segundas están constituidas por trozos de material refractario, escorias, arena, óxidos y partículas metálicas, procedente de las paredes del molde.

1.4.4 SEGREGACIONES

Como consecuencia del proceso de solidificación, las aleaciones en el estado sólido presentan cierta heterogeneidad en su composición química, que se conoce con el nombre de segregación. Este fenómeno provoca que ciertos elementos de la aleación o las impurezas, se concentren en determinadas regiones de las piezas fundidas.

Este fenómeno se da especialmente con las aleaciones que contienen grafito. Se pueden considerar tres tipos fundamentales de segregación:

Centrípeta o directa.- Formada por las impurezas que rebajan el punto de solidificación y que se concentran en la zona líquida que solidifica en último lugar.

Inversa.- Formada en las zonas exteriores por los elementos que disminuyen la temperatura de fusión.

Vertical.- Este tipo de segregación aparece en las aleaciones (Pb-Sb) que tienen una diferencia de densidad apreciable entre las fases líquida y sólida. Se forman primeramente unos cristales de Sb que, por ser menos densos que el líquido, tienden a subir a la superficie.

1.4.5 DEFECTOS DEBIDOS A LA COLABILIDAD

La colabilidad se define como la mayor o menor capacidad de una aleación para llenar un molde. El exceso de colabilidad es perjudicial, porque la aleación puede infiltrarse entre los granos de arena, o por las juntas del molde y de los machos. En cambio la falta de colabilidad puede dar lugar a la falta de llenado del molde, sobre todo en las partes delgadas. Para evitar esto habrá que calcular la temperatura óptima de colada, en función del material.

1.4.6 DEFECTOS DEBIDOS A LA ALEACIÓN FRÍA

Cuando la aleación en el momento de colada está demasiado fría, o cuando los conductos de alimentación no se han dispuesto convenientemente, existe el peligro de que el molde no se llene totalmente y la pieza salga incompleta. Los pliegues y arrugas que presentan en la superficie algunas piezas, son también a causa de la aleación fría. Si se interrumpe el llenado del molde y acto seguido se continúa, existe el peligro de que la parte que penetra primero en el molde solidifique y no se una con la segunda, dando lugar a una unión fría.

CAPITULO II

METODO DE ELEMENTOS FINITOS

Este capítulo se describe las características generales del método de elementos finitos y los métodos que existen para la solución de problemas complejos mediante la discretización de la geometría. Se explica las etapas que todo software de elementos finitos posee y su aplicación específica con el programa *Vulcan*.

2.1 GENERALIDADES DEL MÉTODO

El análisis mediante elementos finitos es una técnica poderosa para obtener solución aproximada a problemas complejos, pero con una buena exactitud este método ha adquirido una gran importancia en la solución de problemas ingenieriles, ya que permite resolver casos que hasta hace poco tiempo eran prácticamente imposibles de resolver por métodos matemáticos tradicionales.

El método de elementos finitos es una de las herramientas más utilizadas por el sistema CAE (Computer Aided Design) utilizado por muchos de los programas de simulación que podemos encontrar hoy en día. El programa *Vulcan* utiliza este sistema como base de cálculo debido a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos ya sea en dos o tres dimensiones. El método de los elementos finitos es un método de aproximación de problemas continuos, que se caracteriza por lo siguiente:

- El problema continuo se divide en un número finito de partes, “elementos”, cuyo comportamiento se especifica mediante un número finito de parámetros asociados a ciertos puntos característicos denominados “nodos”. Estos nodos son los puntos de unión de cada elemento con sus adyacentes.
- La solución del sistema completo sigue las reglas de los parámetros discretos. Donde el sistema completo se forma por ensamblaje de los elementos finitos.
- Las incógnitas del problema dejan de ser funciones matemáticas y pasan a ser el valor de estas funciones en los nodos.

- El comportamiento en el interior de cada elemento queda definido a partir del comportamiento de los nodos mediante las adecuadas funciones de interpolación o funciones de forma.

La idea general del método de los elementos finitos es la división del problema en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos. Las ecuaciones que rigen el comportamiento del continuo regirán también el del elemento. De esta forma se consigue pasar de un sistema continuo (infinitos grados de libertad), que es regido por una ecuación diferencial o un sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número de grados de libertad finito cuyo comportamiento se modela por un sistema de ecuaciones, polinómicas.

En cualquier sistema a analizar por elementos finitos podemos distinguir entre:

- Dominio. Espacio geométrico donde se va analizar el sistema.
- Condiciones de contorno. Variables conocidas y que condicionan el cambio del sistema: cargas, desplazamientos, temperaturas, voltaje, etc.
- Incógnitas. Variables del sistema que deseamos conocer después de que las condiciones de contorno han actuado sobre el sistema: desplazamientos, tensiones, temperaturas, etc.

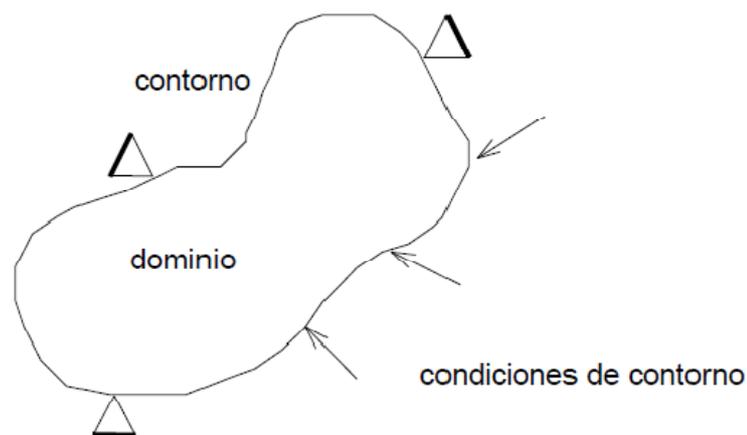


Figura 2.1 Representación de cualquier sistema a analizar por elementos finitos

El método de los elementos finitos supone, para solucionar el problema, el dominio discretizado en subdominios denominados elementos. El dominio se divide mediante puntos (en el caso lineal), mediante líneas (en el caso bidimensional) o superficies (en el tridimensional) imaginarias, de forma que el dominio total en estudio se aproxime mediante el conjunto de porciones (elementos) en que se subdivide. Los elementos se definen por un número discreto de puntos, llamados nodos, que conectan entre si los elementos. Sobre estos nodos se materializan las incógnitas fundamentales del problema. A estas incógnitas se les denomina grados de libertad de cada nodo del modelo. Los grados de libertad de un nodo son las variables que nos determinan el estado y/o posición del nodo.

A grandes rasgos el método de elementos finitos se puede resumir en las siguientes etapas:

- Definición de las ecuaciones que definen el problema
- Discretización del dominio, mallado y numeración de nodos
- Ensamblaje de las ecuaciones de los elementos
- Imposición de las condiciones de contorno
- Resolución de las ecuaciones
- Posproceso de la solución

2.2 PROCEDIMIENTO GENERAL PARA EL ANÁLISIS MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS

Ciertos pasos en el análisis con elementos finitos son comunes para la resolución de un problema.

2.2.1 PREPROCESO

Esta etapa es un proceso muy crítico crucial e importante en la resolución del problema porque en ningún caso se debe introducir información incorrecta o inapropiada, ya que los resultados obtenidos serán erróneos. En esta etapa se describe el problema y se define el modelo:

- Definición del dominio geométrico del problema
- Definición del tipo del elemento a ser usado
- Definición de las propiedades del material de los elementos
- Definición de las propiedades geométricas del elemento
- Definición de conectividad de los elementos (mallado)
- Definición de las restricciones físicas (condiciones de borde)
- Definición de las cargas, temperaturas, voltajes, etc.

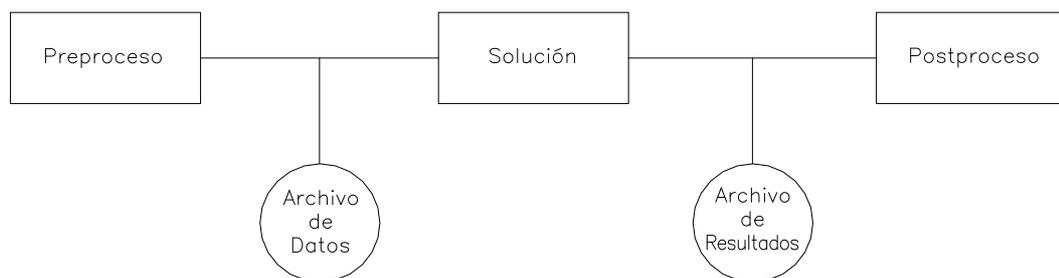


Figura 2.2 Diagrama esquemático de los pasos para la resolución

2.2.2 SOLUCIÓN

Durante esta etapa, el software es quien se encarga de elaborar las ecuaciones algebraicas que gobiernan al sistema propuesto, en una forma matricial y calcula los valores desconocidos de las variables del campo primarias. Una vez obtenidos los valores anteriores, se usan estos para calcular por sustitución, variables adicionales, variables secundarias como fuerzas de la relación, esfuerzos flujos de calor, etc.

2.2.1. POSPROCESO

Esta fase se refiere al análisis y evaluación de los resultados obtenidos. Aquí es donde finalmente se quiere llegar y lograr:

- Verificar factores de seguridad
- Verificar que los valores obtenidos estén en el rango de valores permisibles
- Elaboración de graficas

- Análisis de graficas
- Animaciones dinámicas del probable comportamiento del elemento
- Representación mediante un código de colores las temperaturas, esfuerzos, etc.

El procedimiento se puede descomponer en los siguientes pasos:

1. Definición de la geometría
2. Mallado geométrico
3. Definición de los parámetros del material
4. Proceso, simulación o solución de las ecuaciones de gobierno
5. Finalmente, evaluación de los resultados.

2.3 SOLUCIÓN DE PROBLEMAS MEDIANTE SOFTWARE DE ELEMENTOS FINITOS

2.3.1 DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA

El primer paso en el proceso de modelización es definir la geometría del sistema de fundición. Los programas de simulación de procesos de fundiciones modernos, tienen la capacidad de importar dibujos de CAD de otros programas que están especializados para ello. Es muy importante que durante el modelado de la geometría se incluya todos los elementos del sistema de fundido que puedan tener una influencia significativa en el llenado y la solidificación del material. Como por ejemplo los canales de refrigeración, los canales de entrada del fundido, etc.

2.3.2 MALLADO DE LA GEOMETRÍA

Después de la definición de la geometría del sistema de fundido, esta debe ser dividida en un número discreto de elementos volumétricos segmentados para los subsiguientes cálculos. Los nodos de la malla son los puntos de la geometría donde las ecuaciones resuelven los valores de las variables. Las líneas que conectan los nodos entre sí, son las vías que usan para interpolar las variables principales en función de sus valores en los nodos.

Un punto crítico a tener en cuenta es lo fina o basta que puede ser la malla. Esta característica es básica para conseguir la precisión deseada. Cuando más fina es la malla más precisión se obtiene. Y también se debe comentar que el tiempo de cálculo aumenta a medida que la malla se hace más fina, ya que existen más elementos. Las ecuaciones que rigen la simulación de un proceso de fundición pueden llegar a ser muy complejas y aproximar una solución numérica a estas ecuaciones conlleva usar métodos de análisis muy complicados para calcular. En general se puede decir que para encontrar la simulación óptima, hay que hacer un balance entre la precisión buscada y el tiempo de cálculo que debe ser sacrificado.

2.3.3 DEFINICIONES DE LOS PARÁMETROS DEL MATERIAL Y DEL PROCESO

El siguiente paso de la modelización del sistema, es definir los parámetros del material y del proceso, que son necesarios para resolver las ecuaciones gobernantes del llenado y solidificación del molde. En primer lugar, se definen las propiedades termofísicas de los diversos materiales que están relacionados con el sistema de fundición. Además, las condiciones iniciales para las incógnitas de las ecuaciones también deben de ser especificadas (Ej.: las temperaturas iniciales).

También se tienen que determinar las condiciones de contorno como el coeficiente de transferencia de calor entre los diferentes materiales del sistema. Toda la información relevante para el proceso debe tenerse en cuenta, introduciéndola dentro de las bases de datos del programa.

Es muy importante que se valoren todos los datos que afectan a la simulación de la solidificación o del llenado del molde. Por ejemplo, todas las veces que los canales de enfriamiento están activos o inactivos, el momento en que el fundido se extrae del molde, o bien, el tipo de recubrimiento que hay en la cavidad del molde. Todo puede afectar al balance térmico del molde o del fundido. De hecho, los resultados de la simulación son tan buenos como los son los parámetros introducidos, tanto de los materiales como del proceso. Por esta razón, es muy importante usar los parámetros termofísicos más precisos posibles y especificar el

proceso con el máximo detalle, para así poder obtener el mejor beneficio de la simulación.

2.3.4 SIMULACIÓN

En este paso, las ecuaciones gobernantes del proceso de llenado o de solidificación se solucionan sobre una malla computacional, usando las definiciones del material y de los parámetros del proceso. Los resultados se guardan en distintos momentos para la evaluación del proceso de solidificación o de llenado.

2.3.5 EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS

Esta es la etapa en la cual se enlaza el criterio ingenieril con los resultados mostrados por el programa. Los primeros resultados que se obtienen de la simulación de un llenado o de una solidificación, son los valores de las variables primitivas (temperaturas, presiones, velocidades) que se encuentran en los nodos de la malla creada. Combinando los valores de las variables de maneras que tengan un sentido físico, es posible desarrollar las llamadas funciones de criterio que indican donde se pueden esperar problemas en el desarrollo del proceso de fundición.

En una evolución de los resultados de una solidificación (caso que concierne a este proyecto), interesa investigar el patrón de solidificación del fundido (Ej.: el tiempo en que las diferentes áreas tardan en solidificarse) para así poder ver si la contracción en la solidificación puede ser adecuadamente alimentada. También intentar evaluar las áreas donde pueda haber porosidad o evaluar la estabilidad de la cavidad del molde durante el proceso.

Los resultados de la simulación de los procesos de fundición dan lugar a la investigación de muchas áreas de las piezas y de su evolución, para poder mejorar los procesos reales.

CAPITULO III

PROCESO DE SIMULACIÓN CON VULCAN

En este capítulo se utilizara el software Vulcan para realizar el diseño y la simulación del sistema de alimentación, mazarota y geometría de las tres piezas propuestas para la fundición por gravedad, con la finalidad de identificar las condiciones óptimas de las dimensiones y geometría de cada uno de ellos.

3.1 DEFINICION DE PARAMETROS

3.1.1 DIMENSIONES DE LA GEOMETRÍA

Las dimensiones que se ha designado a cada una de las geometrías han sido determinadas en base a la facilidad de elaboración en la etapa de moldeo, teniendo en cuenta los modelos, las cajas de moldeo, y la cantidad de material a utilizar.

Tabla 3-1 Dimensiones establecidas para cada geometría.

Pieza	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Ancho (mm)	Profundidad (mm)	Volumen (cm ³)
Cilindro	40	100	-	-	126
Esfera	80	-	-	-	268
Paralelepípedo	-	80	50	50	200

3.2 PRE PROCESO.

Parte del desarrollo del pre proceso es necesario entender el uso de la barra de tareas (Figura 3.1) que será la herramienta principal para el desarrollo de la simulación. En esta barra es donde se encuentran todos los botones que servirán para el desarrollo de la simulación del proceso.



Figura 3.1 Barra de procesos

3.2.1 CREACIÓN DE LA GEOMETRÍA

El primer paso a realizar para empezar a trabajar con *Vulcan* es la creación de la geometría, la cual se realizará con un software auxiliar de CAD (Computer Aided Design) más completo, dado que *Vulcan* consta con un sistema de diseño de geometría limitado en comparación a otros programas CAD.

En base a las dimensiones definidas previamente en la tabla 3.1, se utiliza el programa Autodesk Inventor, con el cual se crea la geometría para posteriormente guardar como archivo IGES y poder importarlo en *Vulcan*. Hay que tener en cuenta que existen varios programas que nos permiten crear archivos CAD, con los cuales se puede crear la geometría, el único requisito es que el programa permita guardar archivos con extensión *.IGES. De esta manera se inicia el análisis en *Vulcan* directamente desde la importación de la geometría.

3.2.2 IMPORTACIÓN DE LA GEOMETRÍA EN VULCAN

Una vez creada la geometría de la pieza junto con el sistema de alimentación y mazarotas de acuerdo a las dimensiones establecidas en la primera fase de diseño, corresponde iniciar el proceso de simulación con la importación del archivo *.IGES. Para lo cual se procede de la siguiente manera:

- Click en el menú File / Import / IGES. O directamente haciendo click en el botón de importar archivo en la barra de procesos (Figura 3.1)

Luego se abrirá una ventana en donde se debe seleccionar el archivo previamente creado, que comprende el negativo de la pieza con el sistema de alimentación y el contorno exterior del molde. Finalmente se tiene la geometría exportada en la pantalla de trabajo (Figura 3.2).

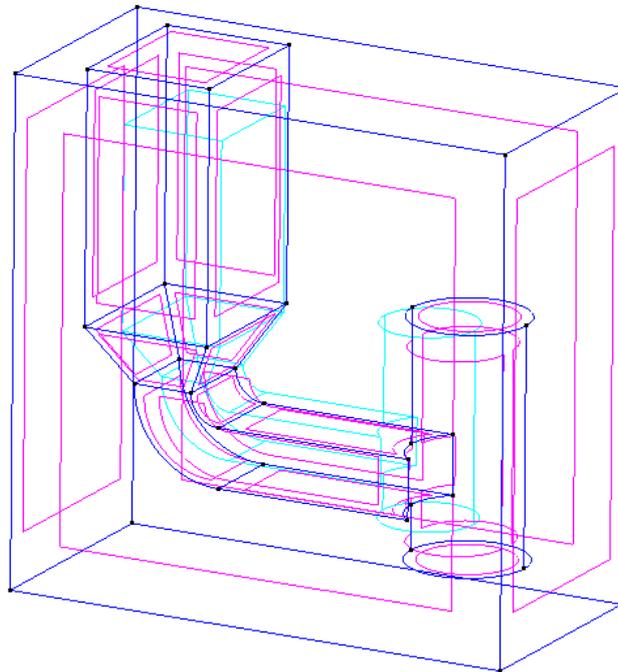


Figura 3.2 Geometría en formato *.iges importada desde Autodesk Inventor

3.2.3 TRATAMIENTO DE LA GEOMETRIA.

Luego de haber importado la geometría, hay que reubicar cada parte de la geometría (molde, pieza, noyo etc.) en una capa diferente, con la finalidad de poder manipular y asignar propiedades fácilmente a cada uno de los elementos.

- Presionando las teclas *Ctrl+L*, o mediante el botón administración de layers (Figura3.4), se abre la ventana de administración de capas o layers (Figura 3.3) que permiten manipular y modificar las capas.

Cuando se obtiene la geometría mediante importación desde otro programa, se generan capas innecesarias que se deben eliminar. Para poder elegir cuales son las capas que deben permanecer y cuáles no; únicamente desactivamos la visibilidad de cada una de las capas. En este caso las capas innecesarias son: *ExtrusionSrf2* y *Sketch1*. Para poder eliminar estas capas se tiene que hacer click sobre cada una de ellas y presionar el botón *Delete* en la ventana de capas. Se debe tener muy en cuenta que si una capa contiene algún tipo de entidad (puntos, líneas, superficies, volúmenes), al intentar eliminarla, el programa no permitirá eliminarla. Es por eso que previo la eliminación de una capa se debe eliminar todas las entidades que pertenezcan a esta.

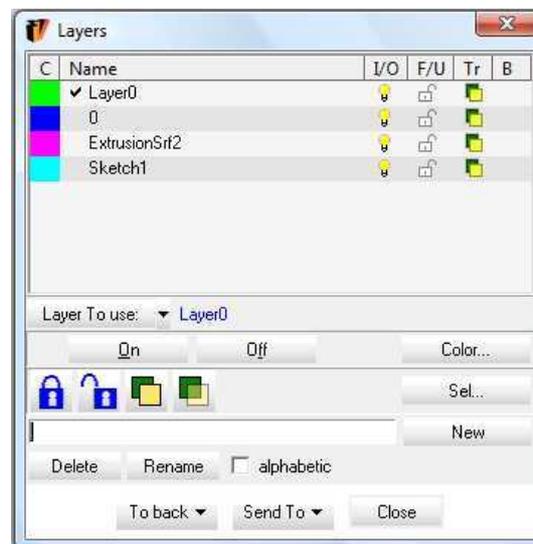


Figura 3.3 Ventana administrador de capas.

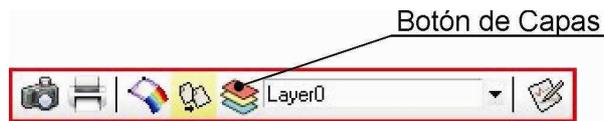


Figura 3.4 Ubicación del botón de capas en la barra de herramientas.

Para poder manipular las capas de una manera más sencilla, se renombra a cada capa. En este caso llamaremos molde a la capa que contiene todo lo que no pertenece a la pieza. Y a todo lo demás se le nombrará como pieza.

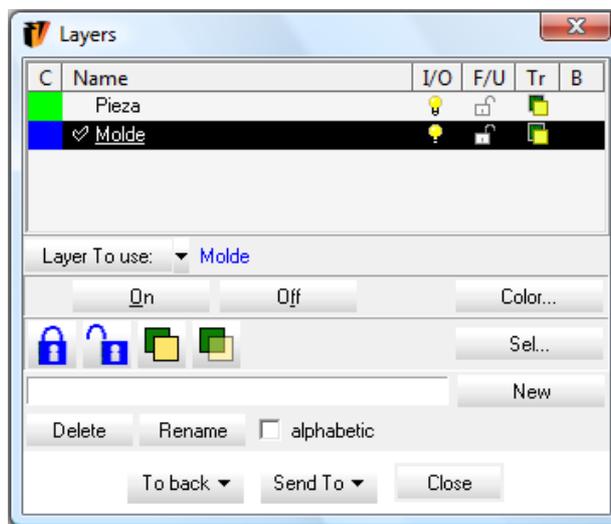


Figura 3.5 Cambio de nombre para las capas.

Una vez reubicada la geometría en sus respectiva capa, hay que comprobar que ninguna línea se encuentre abierta, es decir que todas las líneas estén acopladas a dos líneas más, una en cada extremo. Para comprobar el estado de la geometría se hace uso de la función *colapsar geometría*. De la siguiente manera:

- Click sobre el botón de colapsar ubicado en la barra de procesos (Figura 3.1) / *Colapsar puntos*.
- Seleccionar toda la geometría. Presionar *Esc*.

El mismo procedimiento se lo realiza para colapsar líneas. Luego de haber colapsado todos los puntos y líneas, se tiene que verificar, si la geometría esta lista para el mallado, haciendo uso de la herramienta *Visualizar entidades superiores* (Figura 3.6).

- Click sobre el icono *Visualizar entidades superiores* (Figura 3.5).

La geometría estará lista para continuar con el mallado cuando únicamente tenga como superficie compartida (color amarillo) la sección de ingreso del material. En la Figura 3.7 se muestra la geometría colapsada. Para este caso, aún no se puede continuar con el proceso debido a que existe más de una superficie que no está completamente cerrada. Esto se debe a que en el momento de importar la geometría, ésta no posee todas las superficies acopladas a sus adyacentes. Para solucionar este problema hay que completar y finalizar la geometría, creando dos superficies una superior y otra inferior, con un agujero en la superficie superior para el ingreso de la colada y posteriormente crear el volumen que será parte del molde. Se debe tener en cuenta que para realizar cualquier modificación a la geometría hay que trabajar sobre la capa que la contiene, es decir si se desea modificar al molde hay que seleccionar la capa correspondiente al molde como capa de trabajo. Para solucionar el problema se procede de la siguiente manera:

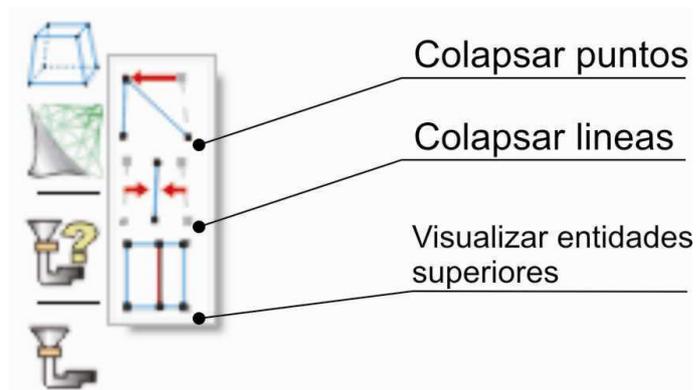


Figura 3.6 Botones de colapsar entidades.

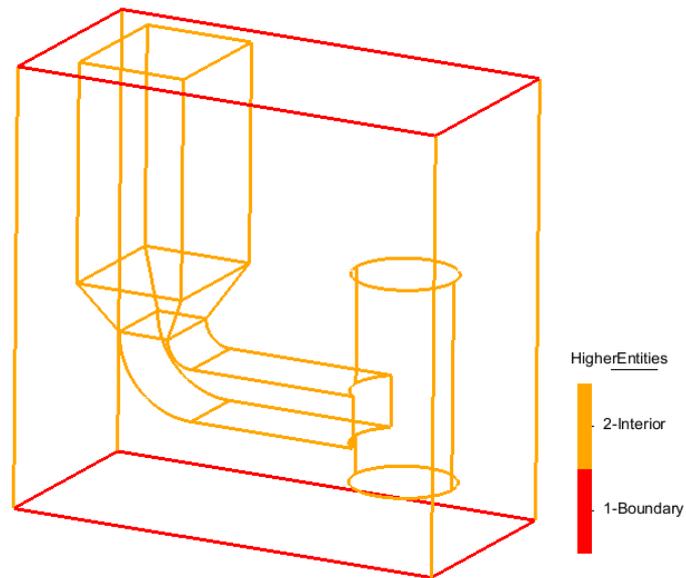


Figura 3.7 Visualización de la geometría colapsada.

- Click en el menú *Geometry / create / NURBS Surface / by contour*. Seleccionar todas las líneas que limitan la superficie y presionar *ESC*. Se hace lo mismo tanto para el área superior como inferior del molde.

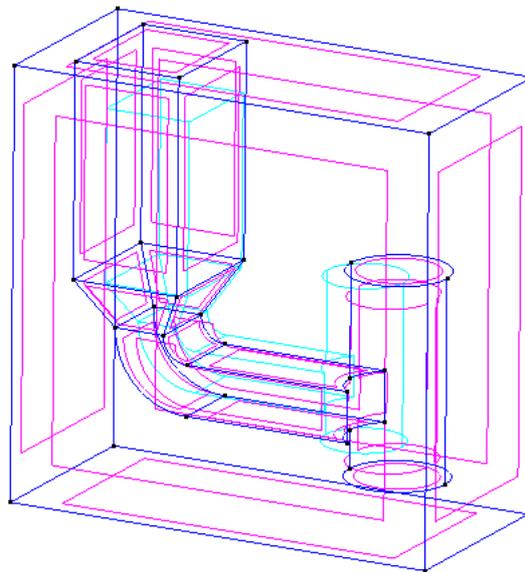


Figura 3.8 Creación de las superficies superior e inferior.

3.2.3.1 Área De Ingreso De Material

Ahora que ya se tiene completamente cerrada la caja del molde, es necesario realizar un agujero por donde ingresará el material. Las dimensiones del agujero serán las de la sección de la mazarota. Para esto realizamos lo siguiente.

- Click sobre el botón de creación de agujero (Figura 3.9) ó haciendo click sobre el menú *Geometry / Edit / Hole NURBS surface*. Primeramente se selecciona el área en donde se desea crear el agujero en este caso la superficie superior; luego seleccionar las líneas que definirán el agujero y finalmente presionar *ESC* para terminar la creación del agujero

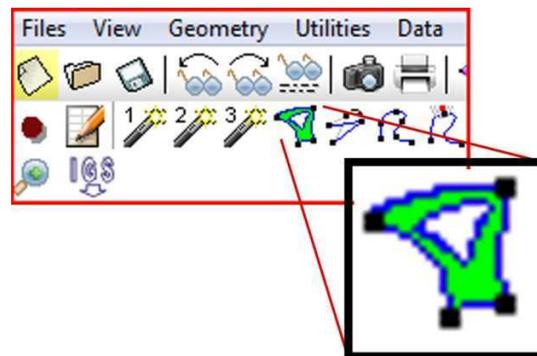


Figura 3.9 Icono para la creación de un agujero sobre una superficie

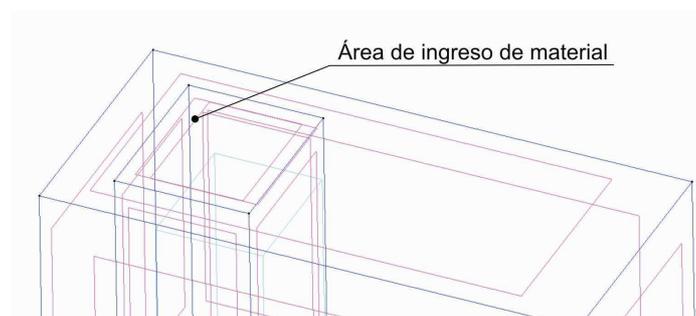


Figura 3.10 Creación de agujero para el ingreso de la colada sobre la superficie superior del molde

3.2.3.2 Generación De Volumen

Finalmente se crea el volumen perteneciente al molde:

- Click en el botón de generar volumen o a su vez click en el menú *Geometry / Create / Volumen / by contour*.

- Seleccionar toda la geometría creada a excepción de la superficie perteneciente al agujero. Para ello se selecciona todas las entidades creadas y luego deseleccionar las entidades correspondientes al área de ingreso del material en el molde, simplemente dando un click sobre ellas.
- Finalmente presionar *ESC* para terminar el proceso.

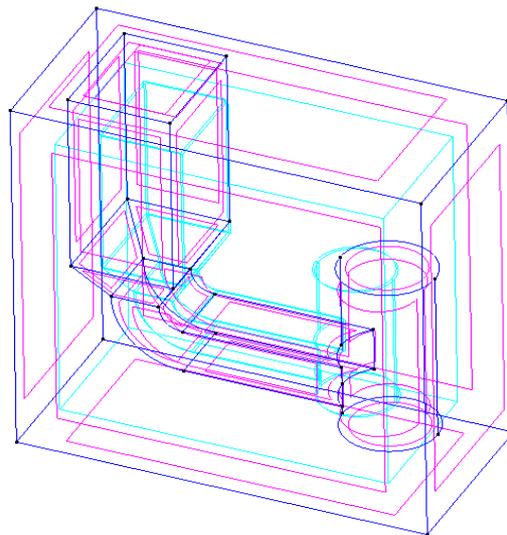


Figura 3.11 Geometría con volumen de molde y pieza generado.

Se debe tener presente que todas estas operaciones tienen que realizarse en la capa perteneciente al molde, caso contrario estas modificaciones se generarán en diferentes capas y ocasionará problemas en la etapa de mallado.

Para poder continuar a la fase de mallado es necesario verificar que toda la geometría está perfectamente lista. De la siguiente manera.

- Click en el botón de *colapsar geometría / Visualizar entidades superiores* (Figura 3.6). En esta ocasión tendremos la totalidad de la geometría de color rojo y únicamente la entrada del material de color amarillo (Figura 3.11).

Esta es la manera correcta que debería tenerse cualquier geometría antes de proceder al mallado.

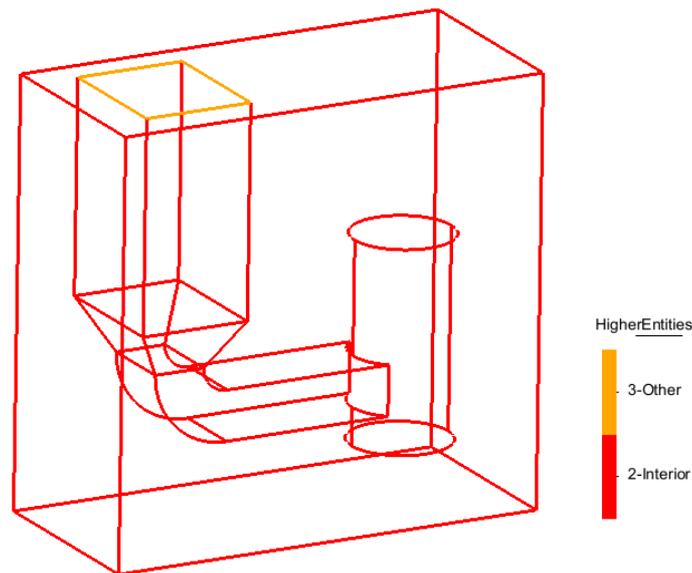


Figura 3.12 Geometría lista para la siguiente fase.

La coloración de líneas en la geometría indica la relación que tienen con otra. Las líneas de color rojo indican que estas pertenecen a una sola superficie. Las líneas de color amarillo indican que estas pertenecen a dos o más superficies. Es por esto que las líneas de la superficie de entrada siempre se mostraran de color amarillo porque deben ser parte tanto del molde como de la pieza.

La geometría que se muestra en la Figura 3.12 indica como debería verse cualquier geometría lista para la siguiente fase del proceso.

3.2.4 MALLADO

Antes de iniciar la generación de mallado, es necesario establecer los parámetros de mallado, como se indica a continuación (Figura 3.13).

- En la barra de menú click en el menú *Utilities / Preferences / Seleccionar la pestaña Meshing*. Establecer todos los parámetros que se muestran en la figura 3.13.
- Click en *Close* para terminar.

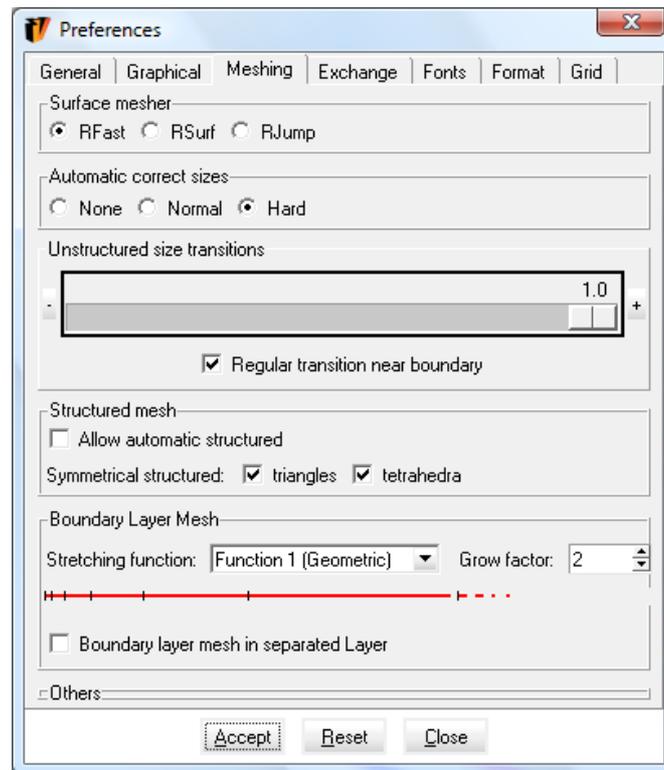


Figura 3.13 Preferencias de mallado

Una vez que se ha generado los parámetros de mallado, se procede a generar la malla de la siguiente manera.

- En la barra de menús, *click sobre el menú Mesh / Generarte Mesh*. Aparecerá una ventana (Figura 3.13) en donde se define el tamaño de los elementos que formaran la malla.

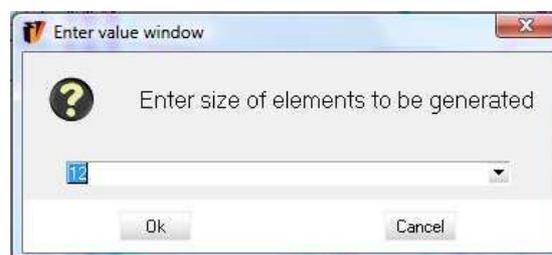


Figura 3.14 Tamaño de malla

Cuanto más pequeño sean los elementos que se generan, más uniforme será la malla y los resultados se acercaran más a la realidad, pero el tiempo que llevará a

cabo en el cálculo será mucho mayor debido a que el cálculo requerirá de mayor cantidad de recursos. Es por esta razón que para agilizar la simulación, la geometría se mallará con tamaños diferentes tanto para el molde como para la pieza. Asignándole a la pieza un mallado mucho más fino que al molde ya que es donde queremos obtener una mejor calidad de resultados. Para ello se procede así:

- Sobre la barra de procesos, click en el botón de “*asignar tamaño de malla a superficies*” (Figura 3.15). Se despliega una ventana en donde indica el tamaño de la malla para las superficies, en este caso se asigna un tamaño mayor (mayor al valor de la pieza), debido a que mallaremos el molde y no necesitamos que tenga una gran precisión de resultados. Para nuestro caso se asigna un valor de 18
- Click en el botón asignar. Y con el cursor seleccionamos únicamente la geometría correspondiente al molde. Para ello se puede hacer uso de la *Ventana de Capas (Figura 3.5)* donde se puede apagar la visibilidad de la geometría que corresponde a la pieza
- Presionamos *ESC* para terminar el proceso. Y nuevamente aparece la ventana de asignar tamaño. Esto es, si se desearía asignar a otras superficies o corregir el valor de malla. Presionamos nuevamente *ESC* para terminar el proceso.

Ahora realizamos lo mismo pero para el volumen del molde.

- En la barra de procesos *click sobre el botón de “asignar tamaño de malla a volúmenes”* (Figura 3.15). Se despliega una ventana en donde indica el tamaño de malla para el volumen, al cual daremos el mismo valor dado a las superficies.
- Este mismo proceso se realiza para la pieza, pero para un tamaño de malla menor que al molde, en este caso designaremos el valor de 7.

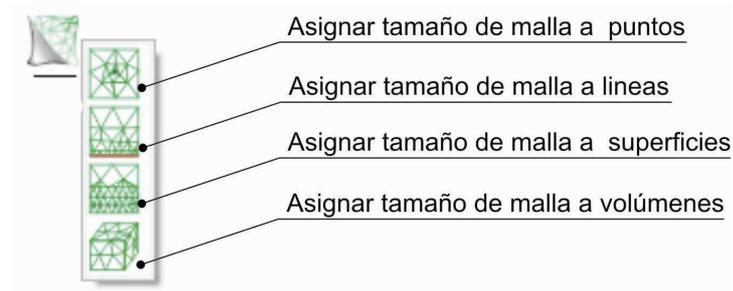


Figura 3.15 Submenú del botón de mallado.

Finalmente se genera la malla de forma general para toda la geometría y aplicar los valores de malla establecidos

- En la barra de menús, *click sobre el menú Mesh / Generarte Mesh (Ctrl+G)*. Aparece la ventana (Figura 3.16) en donde el programa automáticamente establece un valor adecuado para toda la geometría. El valor que se designe en esta parte, se aplicará únicamente a los elementos que no se especificaron otro tamaño de malla, es decir a los puntos y líneas.
- Click sobre en el botón *OK*, para finalizar. Y automáticamente el programa comienza a generar la malla con los parámetros establecidos.

Para poder visualizar la geometría mallada (Figura 3.18), se utiliza el botón *Visualizar geometría mallada* (Figura 3.17) ó *sobre la barra de menú click en Mesh / View Mesh boundary*.

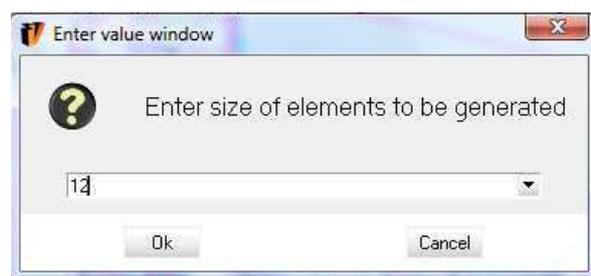


Figura 3.16 Definición del tamaño de los elementos generados en la malla.

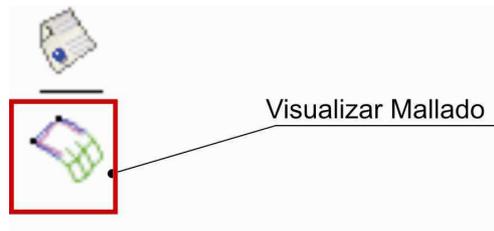


Figura 3.17 Icono para visualizar la geometría mallada.

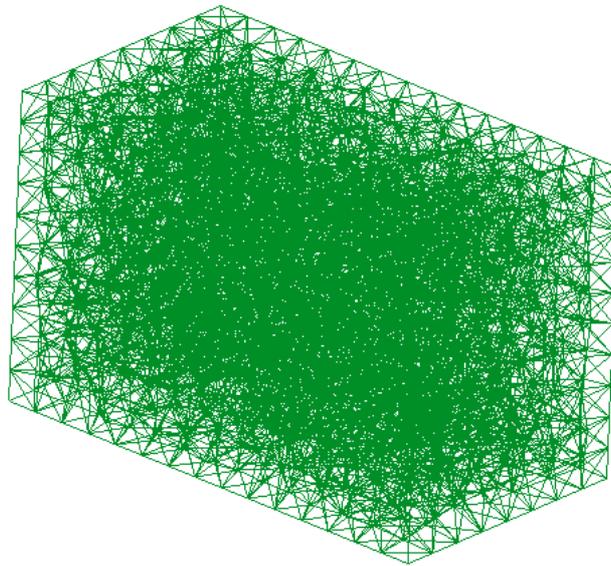


Figura 3.18 Geometría mallada

3.2.5 DEFINICION DEL PROCESO

En esta fase es donde se establece todos los parámetros del proceso que se va a simular, en este caso el proceso es fundición por gravedad. Para ello se procede de la siguiente manera:

- Click sobre el icono *Definir Proceso* (Figura 3.1) ubicado sobre la barra de procesos. Aparece una ventana (Figura 3.19) donde se puede escoger entre los diferentes tipos de problemas disponibles.
- Seleccionar el proceso de gravedad, *Gravity*.

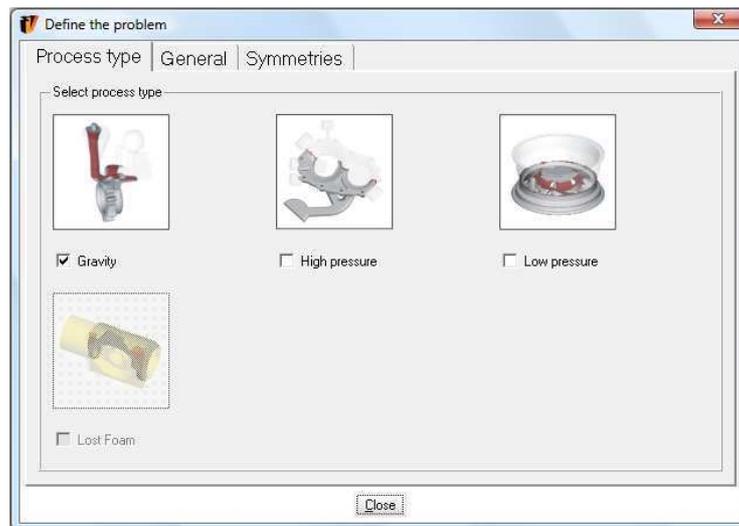


Figura 3.19 Definición del tipo de proceso

La ventana de *Definición del tipo de Proceso* tiene varias pestañas en donde se puede configurar varios parámetros.

En la pestaña *General* se definen: las unidades, la dirección de la gravedad en el sistema de coordenadas interno y la temperatura ambiente. En este caso se usa los valores que se muestran en la figura 3.20.

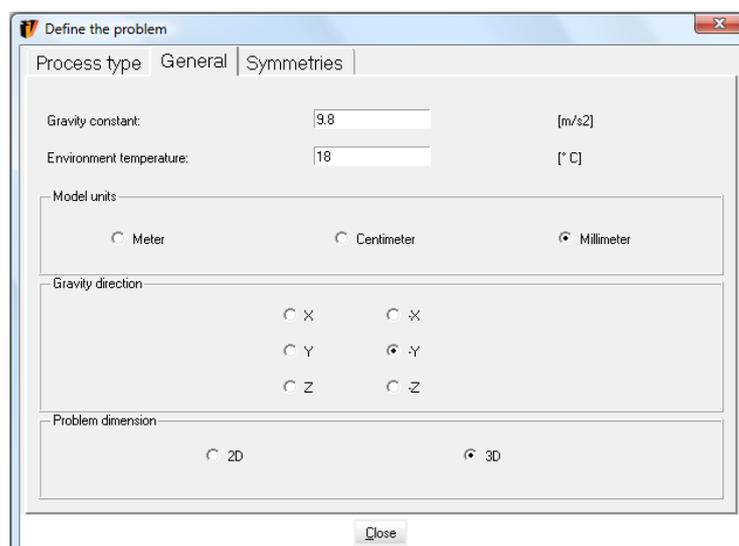


Figura 3.20 Configuración de parámetros: constante de gravedad, temperatura ambiente, unidades de trabajo y dirección de gravedad.

- Finalmente click en *Close* para finalizar la definición de parámetros.

En la pestaña *Simetría* existe los parámetros para configurar y establecer la opción de planos de simetría, si los hubiera. Esta definición ayuda en la rapidez de cálculo al momento de simular.

3.2.6 DEFINICIÓN DE LOS COMPONENTES DE FUNDICIÓN

En esta fase se define todos los componentes que existirán en el proceso, tales como molde, pieza, noyo, etc. Asignándoles a cada uno de ellos el material y sus propiedades, la temperatura de colado o de precalentamiento (en el caso del molde), etc. Para iniciar con la definición de componentes se procede de la siguiente manera:

- En la barra de proceso, click sobre el icono *Definir Componentes del Proceso* (Figura 3.1). Aparece una ventana (Figura 3.21) en donde se seleccionarán los componentes y se añadirán a los diferentes materiales y temperaturas. En la parte izquierda de la ventana existe la lista en el cual muestra todos los componentes de nuestro modelo. A cada uno de ellos, se le debe asignar la capa correspondiente a cada componente.

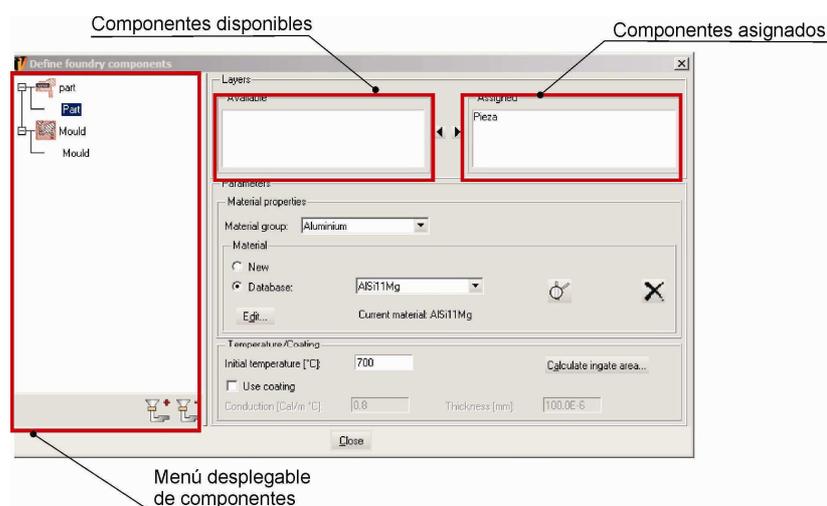


Figura 3.21 Definición de los componentes de fundición.

- Los materiales utilizados son:
Pieza: Aluminio - AlSi7Mg.
Molde: Arena.
- Temperatura de los componentes:
Pieza: 650°C
Molde: 18°C
- Finalmente *Click en Close* para finalizar el proceso

3.2.7 DEFINICION DE LAS OPERACIONES

En esta fase es donde se define que operación se desea simular. El programa ofrece la posibilidad de simular tres operaciones diferentes, como el llenado de material líquido en el molde, la etapa de solidificación y la de enfriamiento. Para iniciar con la etapa de llenado se procede de la siguiente manera:

- En la barra de procesos click sobre el botón de *Definición de Operaciones* (Figura 3.1). Aparece una ventana donde se define las operaciones (Figura 3.22)
- Click sobre el botón de añadir *Nueva Operación*. Se abrirá una nueva ventana (Figura 3.23) en donde se selecciona el tipo de operación que se desea simular. Las operaciones que se puede simular son; llenado del material (filling), solidificación (thermal-solidification) y enfriamiento (thermo-mechanical solidification). Cada una de las operaciones tienen diferentes parámetros para configurar. Se iniciará con la operación de llenado (Filling1)

3.2.7.1 Operación de llenado (Filling)

Luego de haber seleccionado la operación, aparece la ventana donde permite definir los parámetros de la operación seleccionada. En la operación de llenado se tiene algunas pestañas que tienen diferentes parámetros de configuración. Cada una de ellas se explicará a continuación:

Strategy

Dentro de la pestaña *Strategy* se puede configurar la rugosidad del molde, tipo de vertido del metal líquido. Tal como se muestra en la figura 3.24.

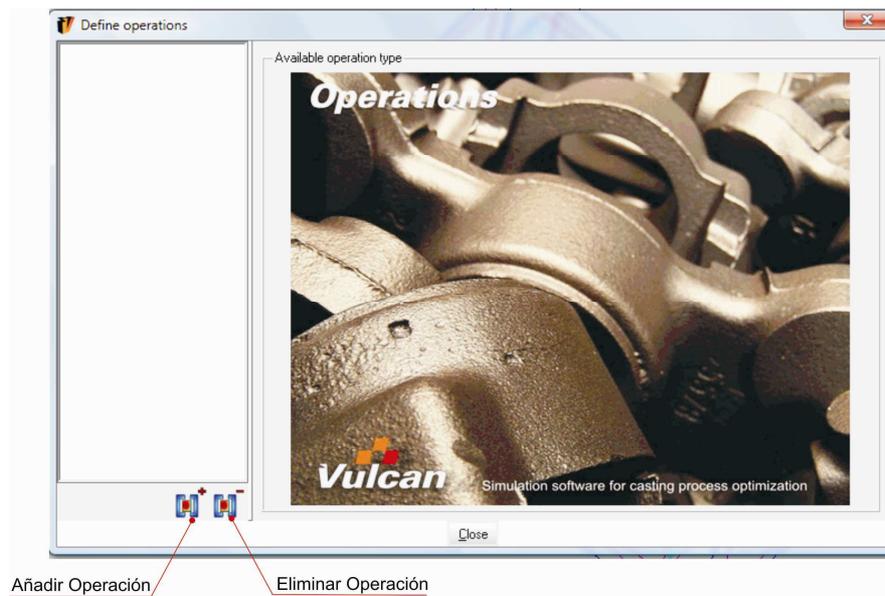


Figura 3.22 Ventana *Definición de Operaciones*

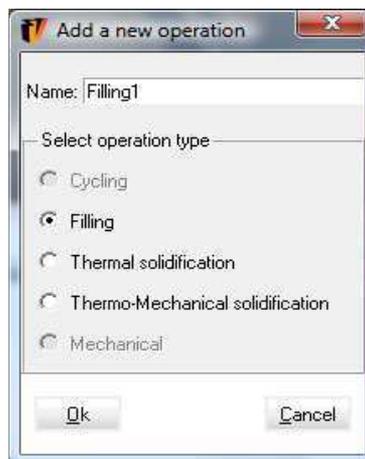


Figura 3.23 Añadir proceso

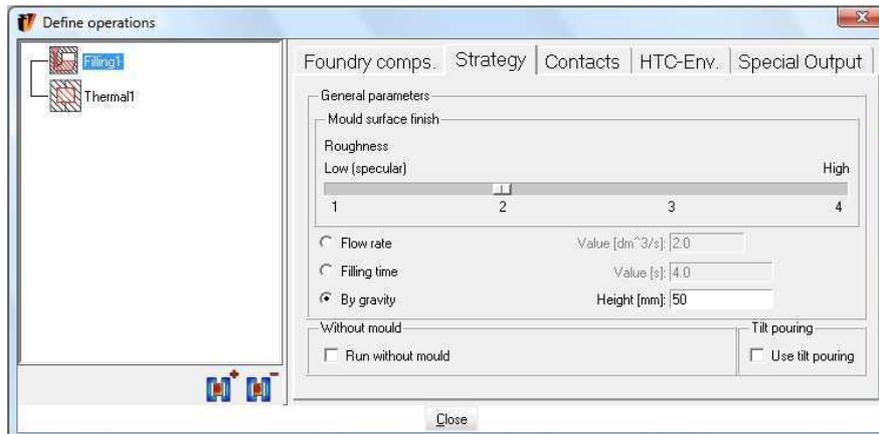


Figura 3.24 Valores establecidos para la operación de llenado (Filling1) en la ventana Strategy.

Contactos

Dentro de la pestaña *Contactos*, se puede configurar los valores de coeficientes de transferencia de calor de contacto (HTC) entre el metal líquido y el molde. Este coeficiente de contacto se establece tanto para convección y conducción. *Vulcan* establece como coeficiente de convección para cuando el material se encuentra en estado líquido y el coeficiente de conducción para cuando el material se encuentra en estado sólido. Mantenemos los valores que nos aplica el programa por defecto (Figura 3.25).

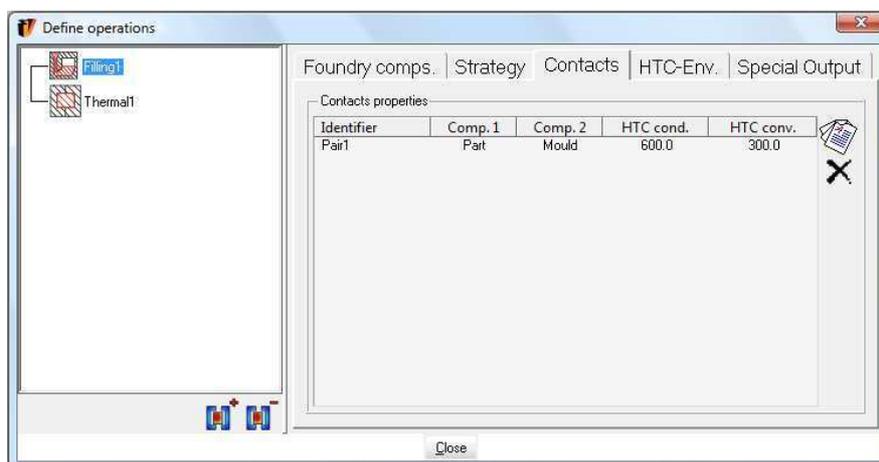


Figura 3.25 Parámetros de configuración para la pestaña Contactos.

HTC-Env.

Continuando con la siguiente pestaña *HTC-Env.* El programa establece los coeficientes de transferencia de calor según el tipo de material a fundir y el medio en donde lo fundimos. En este caso, el medio ambiente es el aire a la temperatura ambiente ya establecida en la fase de definición del problema. Los valores establecidos se muestran en la figura 3.26.

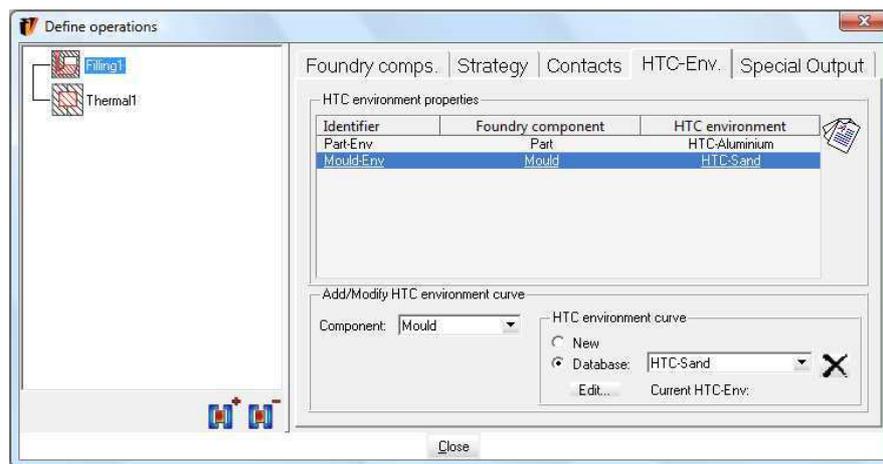


Figura 3.26 HTC-Env.

Special Output

Dentro de la pestaña *Special Output* se define el número de resultados que desea se muestren durante el proceso de cálculo. En este caso establecemos un valor de 2%. Este valor no influye en la exactitud de resultados, simplemente es el registro de datos que se desea aparezcan en la pantalla durante el proceso de cálculo.

3.2.7.2 Operación de Solidificación (Thermal Solidification)

De la misma manera que se estableció los parámetros para la operación de llenado se lo para la operación de solidificación. En esta operación se tendrá resultados de solidificación de la pieza, evolución de temperaturas, evolución de solidificación, etc.

Strategy

En esta pestaña (Figura 3.27) se define los parámetros de desmolde, ya sea que esté controlado por temperatura o por tiempo. En este caso dejaremos que la pieza se enfríe totalmente dentro del molde, es decir hasta que la pieza alcance la temperatura de ambiente.

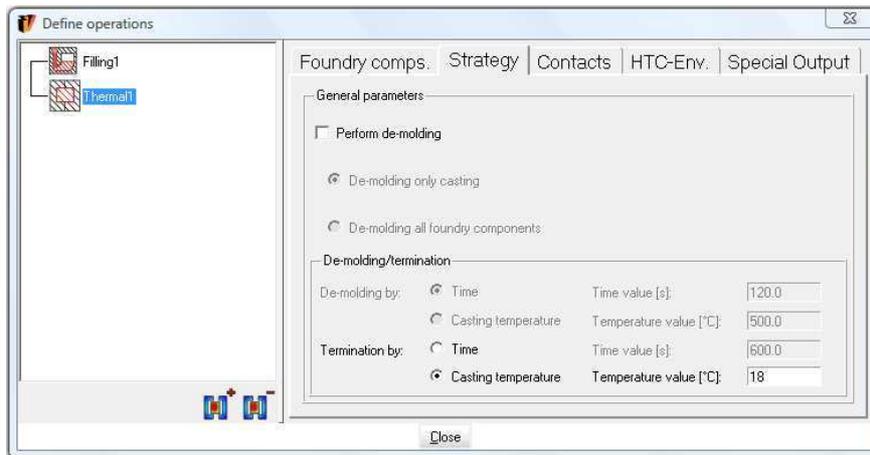


Figura 3.27 Parámetros pestaña *Strategy*. Operación de Solidificación

Contacts:

En la pestaña *Contacts* (Figura 3.28) al igual que en la operación de llenado, se establecen los diferentes valores para los coeficientes de transferencia de calor (HTC) entre el metal fundido y el molde. En este caso dejaremos establecidos los valores que el programa aplica por defecto.

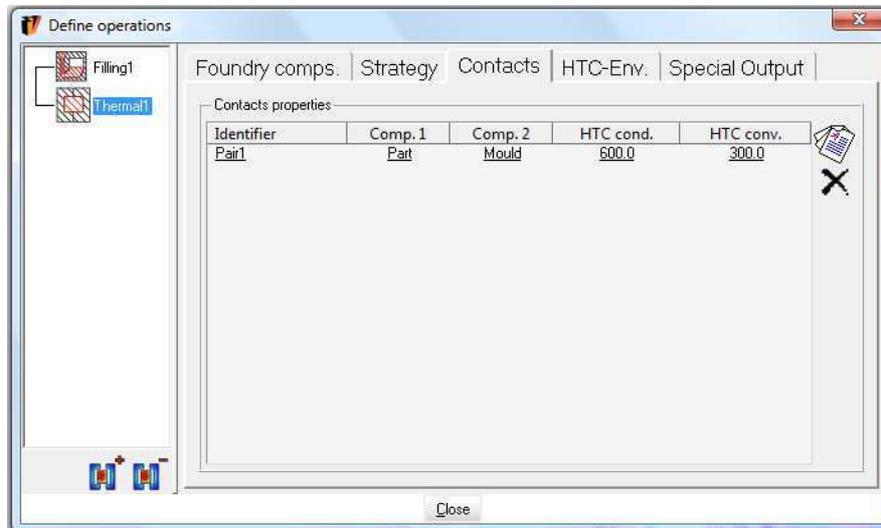


Figura 3.28 Parámetros pestaña *Contacts*. Operación de Solidificación.

HTC-Env.

De la misma manera que en la operación de llenado, en la pestaña *HTC-Env* se establece el valor del coeficiente de transferencia de calor tanto para el molde como para la pieza. Los valores que se establece son los que se indican en la figura 3.29

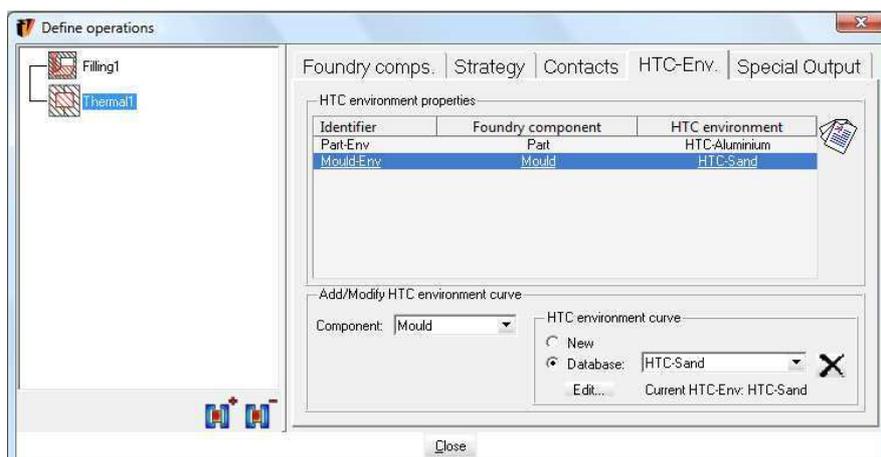


Figura 3.29 Parámetros pestaña *HTC-Env*. Operación de Solidificación.

Special Output

Finalmente en la pestaña, *Special Output* se define el número de resultados que se desea visualizar en el post proceso y el tipo de resultados que se desea obtener. Los valores asignados se indican en la figura 3.30

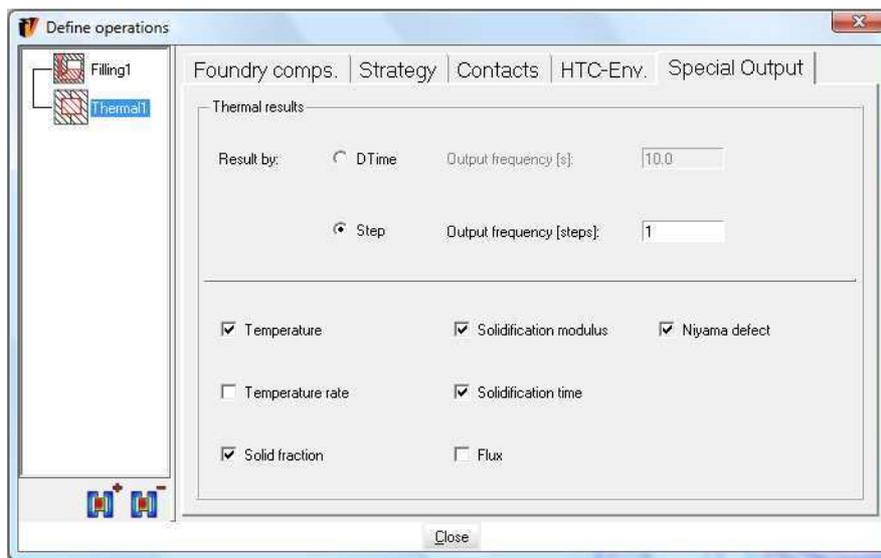


Figura 3.30 Parámetros pestaña *Special Output*. Operación de Solidificación.

3.2.8 CALCULO

Una vez establecidos todos los parámetros y operaciones a simularse se puede pasar a la fase de cálculo, para la obtención de resultados. Para iniciar el cálculo se procede de la siguiente manera:

- En la barra de procesos, click sobre el botón de *Calcular* (Figura 3.1). Aparecerá una ventana en donde se puede establecer los parámetros de precisión de los cálculos y las operaciones que se desea calcular. Se seleccionará una precisión de cálculo media, y calcularemos ambas operaciones, llenado y solidificación, tal como se indica en la figura 3.31.
- Finalmente, para dar inicio a la fase de cálculo, click sobre el botón *Ok*.

De esta manera iniciará el proceso de cálculo, y se concluye con la fase del pre-proceso y de esta manera iniciar con la fase del post-proceso. El tiempo que se

empleará en el proceso de cálculo dependerá de la calidad de la malla, la precisión de los resultados asignada y las características del ordenador. Una vez culminado el proceso aparecerá una ventana indicando que el proceso ha sido completado exitosamente (Figura 3.33)

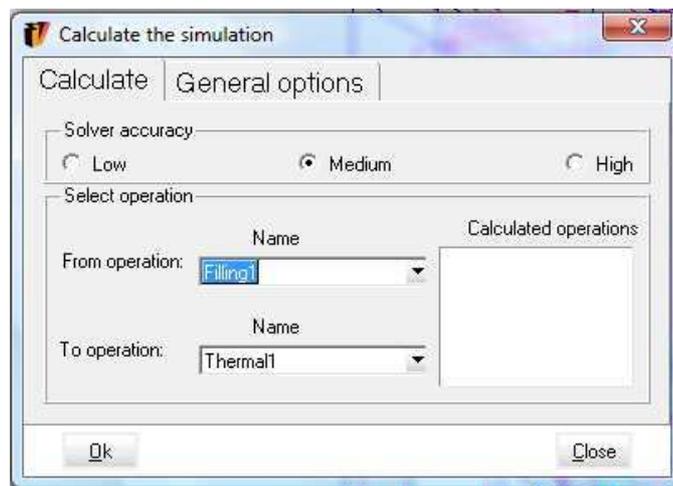


Figura 3.31 Parámetros de configuración en fase de cálculo.

Todas las operaciones que se realizaron en el pre-proceso para el cilindro se las realiza tanto para el prisma rectangular como para la esfera.



Figura 3.32 Ventana de Finalización de cálculo

3.3 POST PROCESO

El postproceso es la fase en donde se muestran los resultados de todas las operaciones definidas en la fase del pre-proceso, como la evolución de llenado, solidificado y enfriamiento de la pieza y su molde.

Es necesario realizar algunas simulaciones con sus respectivas correcciones y variaciones de parámetros y dimensiones hasta poder llegar al diseño adecuado.

En las primeras pruebas, lo que se intenta es encontrar la ubicación correcta del canal de colada, el bebedero para realizar una correcta colada, ya que si su ubicación y dimensiones en el molde no es la adecuada puede producir, que el molde no se llene de forma correcta o que se produzcan defectos como erosiones, choques, rechupes, etc.

Para dar inicio a la fase de post-proceso, lo podemos realizar dando click directamente desde la ventana de finalización de cálculo (Figura 3.32) o a su vez desde el botón *Postproceso* de la siguiente manera.

- Click en el botón *Intercambio entre pre y postproceso* (Fig.3.34) ubicado en la barra estándar.

También es posible acceder desde la barra de menú, de la siguiente manera:

- Click en el menú *Files / Postprocess*.

De esta manera, se accede a la interface de trabajo del postproceso. El espacio de trabajo del postproceso es similar al del preproceso, pero con diferentes barras de herramientas.

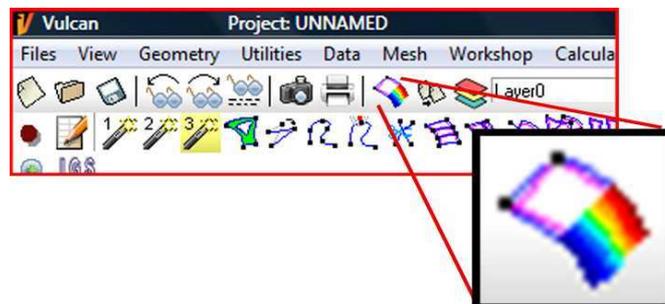


Figura 3.33 Icono para cambiar entre pre y postproceso

En la fase de postproceso, se dispone de tres opciones de resultados: llenado (filling), solidificación (Thermal-solidification) y enfriamiento (thermal-mechanical-solidification). Para cualquier de los resultados, siempre se inicia cargando los resultados, de la siguiente manera:

- En la barra de menú click sobre el menú *Vulcan Results / Load Results* (Figura 3.34).

Aquí se despliega una ventana (Figura 3.35) donde se selecciona los resultados correspondientes al proceso deseado, en este caso se escogerá el proceso de llenado *Filling1*.

- Para finalizar la carga de resultados presionar sobre el botón OK



Figura 3.34. Cargar resultados. Etapa de Post-proceso.

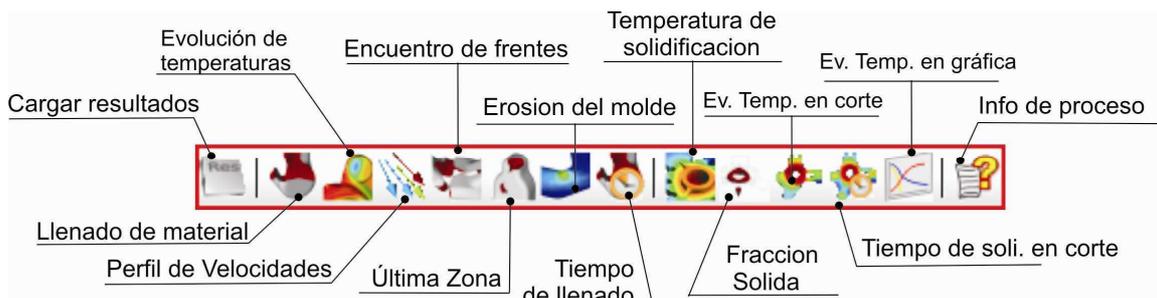


Figura 3.35 Barra de resultados

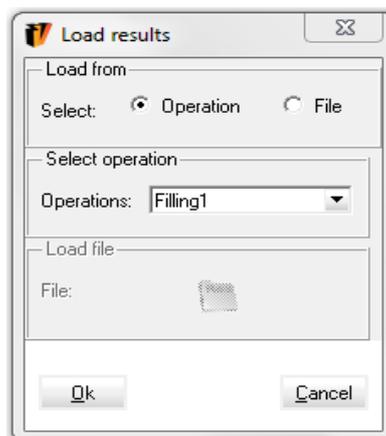


Figura 3.36 Ventana para cargar resultados.

3.3.1 ETAPA DE LLENADO

Dentro del proceso de llenado se tiene algunas opciones de resultados en donde se puede visualizar cómo evoluciona el metal líquido a través del molde inmediatamente luego de haberlo vertido.

3.3.1.1 Ingreso del Metal Líquido en el Molde

El ingreso del metal líquido en el molde es la fase en la cual se muestra cómo será el recorrido del material a través de los canales de alimentación, mazarotas y piezas. Para visualizar este resultado se procede de la siguiente manera:

- En la barra de menús, click sobre el menú *Vulcan Results / Filling Mater*. Aparece una ventana (Figura.3.37) donde se puede configurar los diferentes parámetros para la animación del llenado del molde. Tales como visualización de resultados, repetición interminable de la simulación, velocidad de visualización, captura de fotogramas y almacenamiento en archivo de video.
- Click en el botón *Play* para observar el proceso de llenado del metal líquido en el molde (Figura 3.38, 3.39).

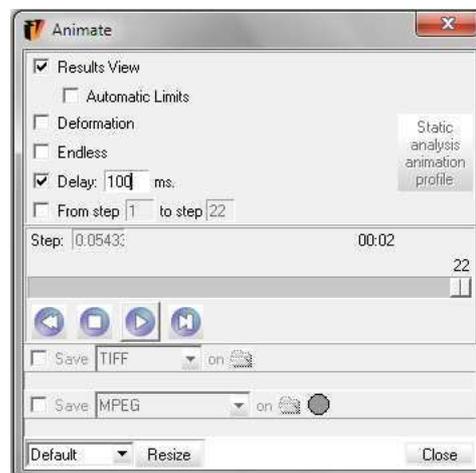


Figura 3.37 Configuración de animación del proceso de llenado.

La ventana que se muestra en la figura 3.37 representa el patrón general para la configuración de parámetros de otros procesos de simulación.

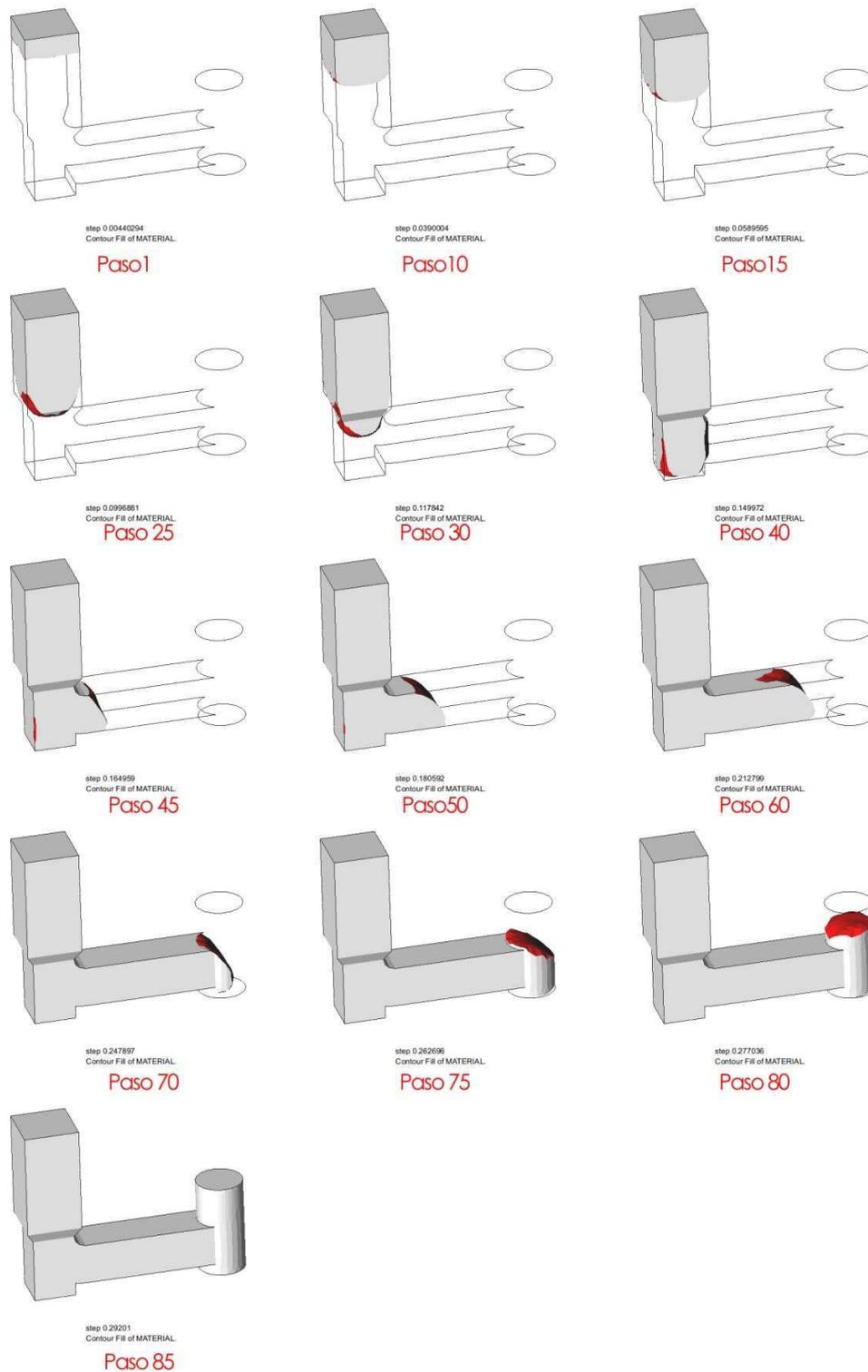
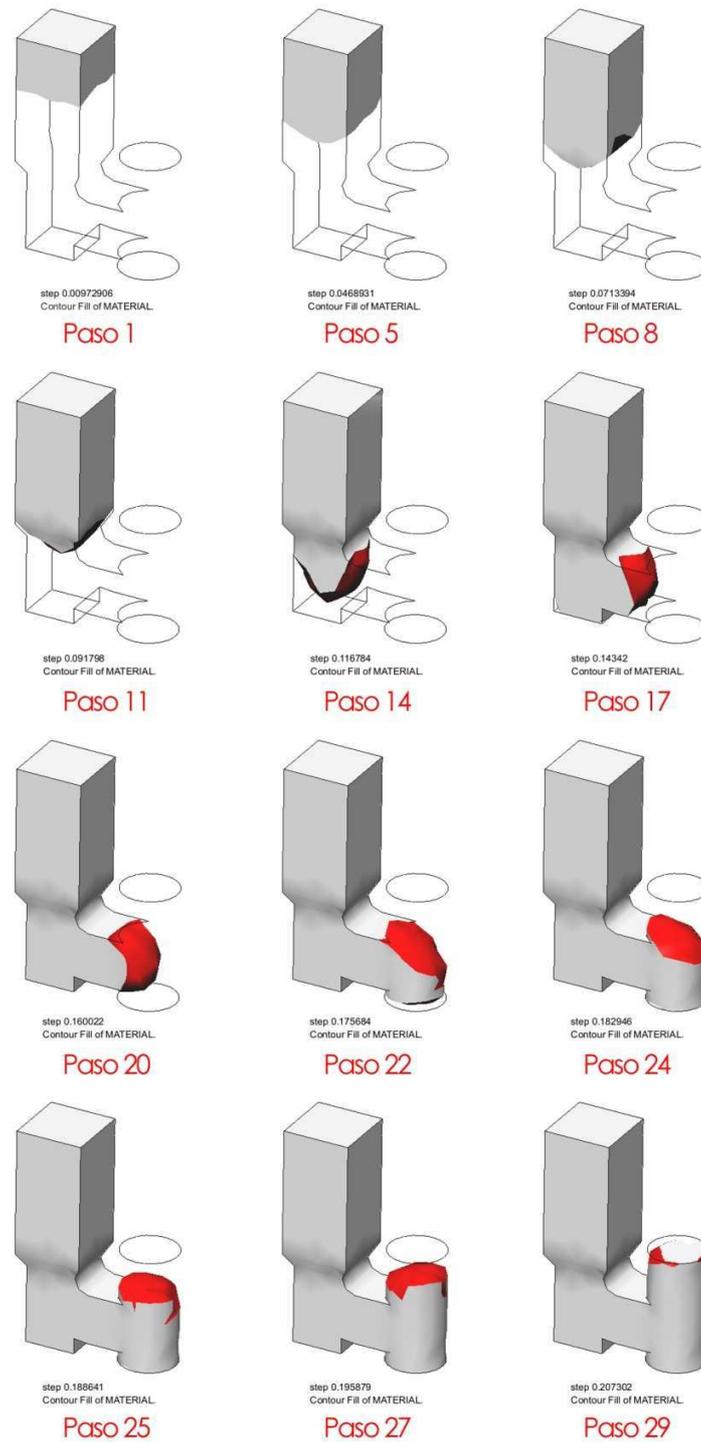


Figura 3.38 Evolución del metal líquido a través del molde en la fase de llenado. Modelo 1



3.39 Evolución del metal líquido a través del molde en la fase de llenado. Modelo 2

3.3.1.2 Evolución De Temperatura

La evolución de la temperatura dentro del molde al momento de verter el metal líquido, revela los valores de temperaturas que se alcanzará en el interior del molde mientras el metal líquido fluye a través de este. Para visualizar el resultado se procede de la siguiente manera:

- En la barra de menús click sobre el menú *Vulcan Results / Temperature evolution*. O sobre la barra de resultados (Figura 3.35) dando click sobre el icono *Evolución de Temperaturas*.

Se muestra una ventana (Figura 3.40) similar a la del proceso de llenado, en donde permite configurar los diferentes parámetros de simulación de la evolución de temperaturas en el llenado.

- Click en el botón *Play* para observar los resultados de cómo evoluciona la temperatura conforme el metal líquido fluye en el molde (Figura 3.37)



Figura 3.40 Configuración de animación para la evolución de temperaturas.

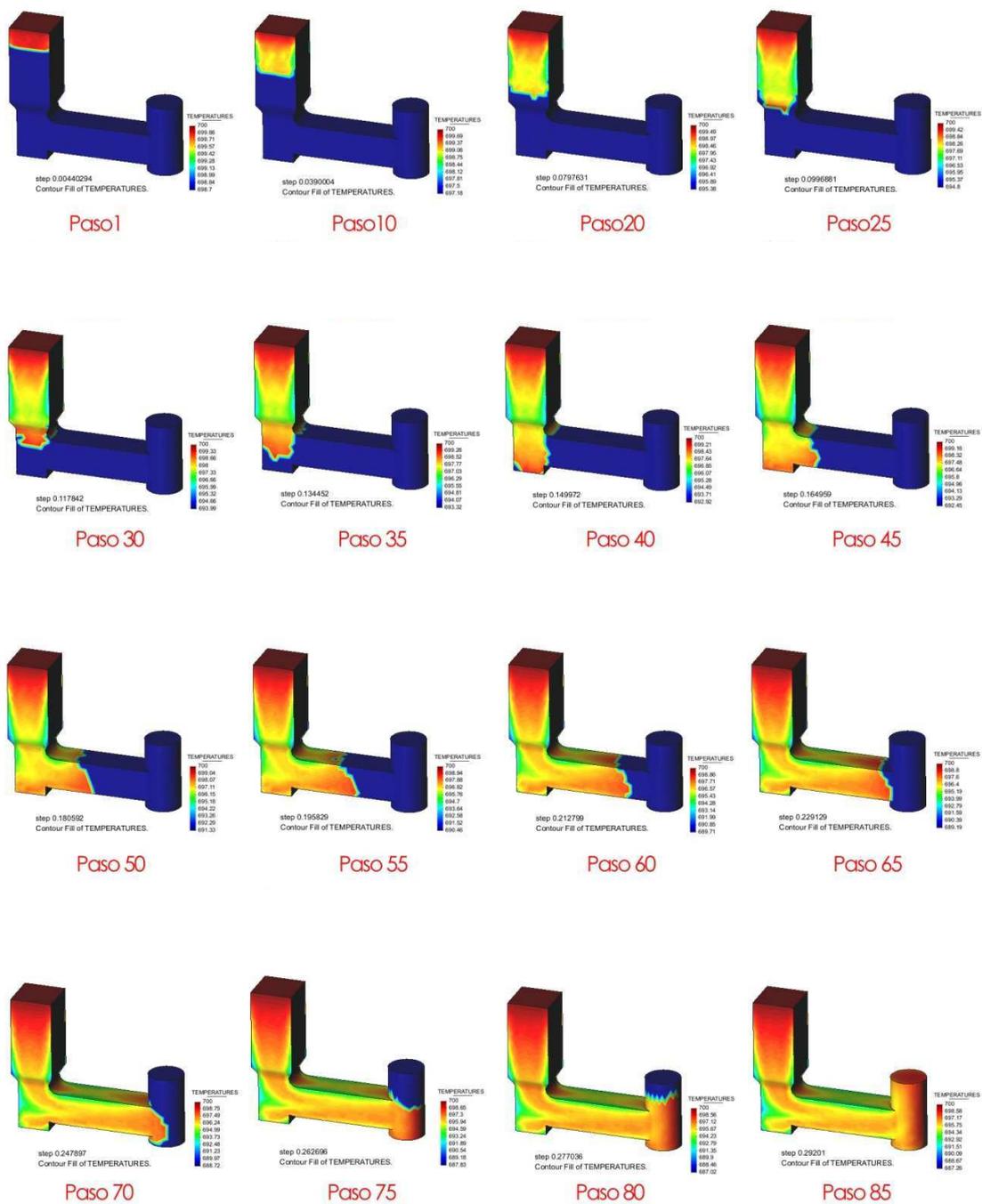


Figura 3.41 Evolución de temperaturas en la operación de llenado. Modelo 1

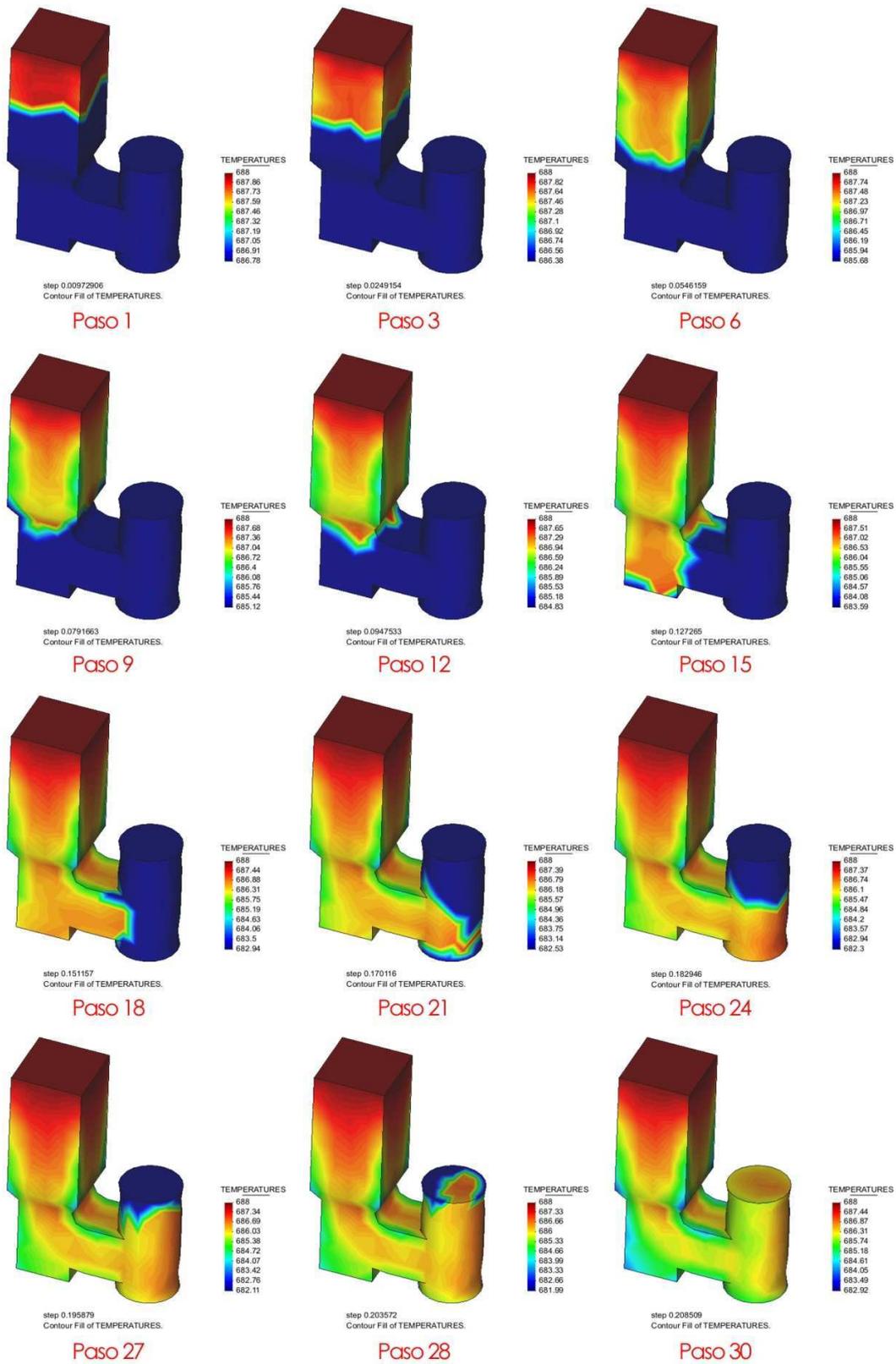


Figura 3.42 Evolución de temperaturas en la operación de llenado. Modelo 2.

3.3.1.3 Velocidad De Llenado.

La velocidad adquirida por el metal líquido en el interior de los canales de alimentación permite determinar la posible presencia de flujos turbulentos que pueden ocasionar defectos de erosión en el interior del molde y la presencia de gases atrapados. El perfil de los vectores de velocidades del metal líquido se lo muestra de la siguiente manera:

- Sobre la barra de resultados (Figura 3.35) click en el icono *Perfil de Velocidades* (Figura 3.43). Se muestra una ventana similar a la del proceso de llenado, en donde se permite configurar los diferentes parámetros de animación (Figura 3.37).

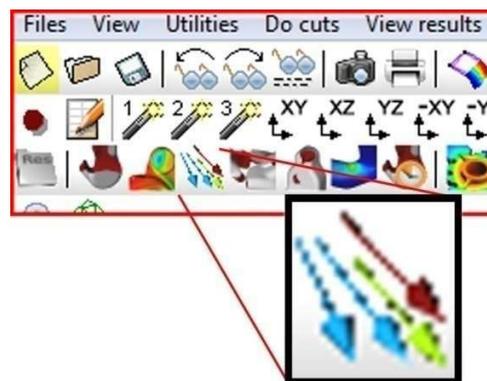


Figura 3.43 Herramienta para visualizar perfil de vector velocidades.

- Click sobre el botón *Play* para observar cómo evoluciona la velocidad del material conforme recorre el molde (Figura 3.44)

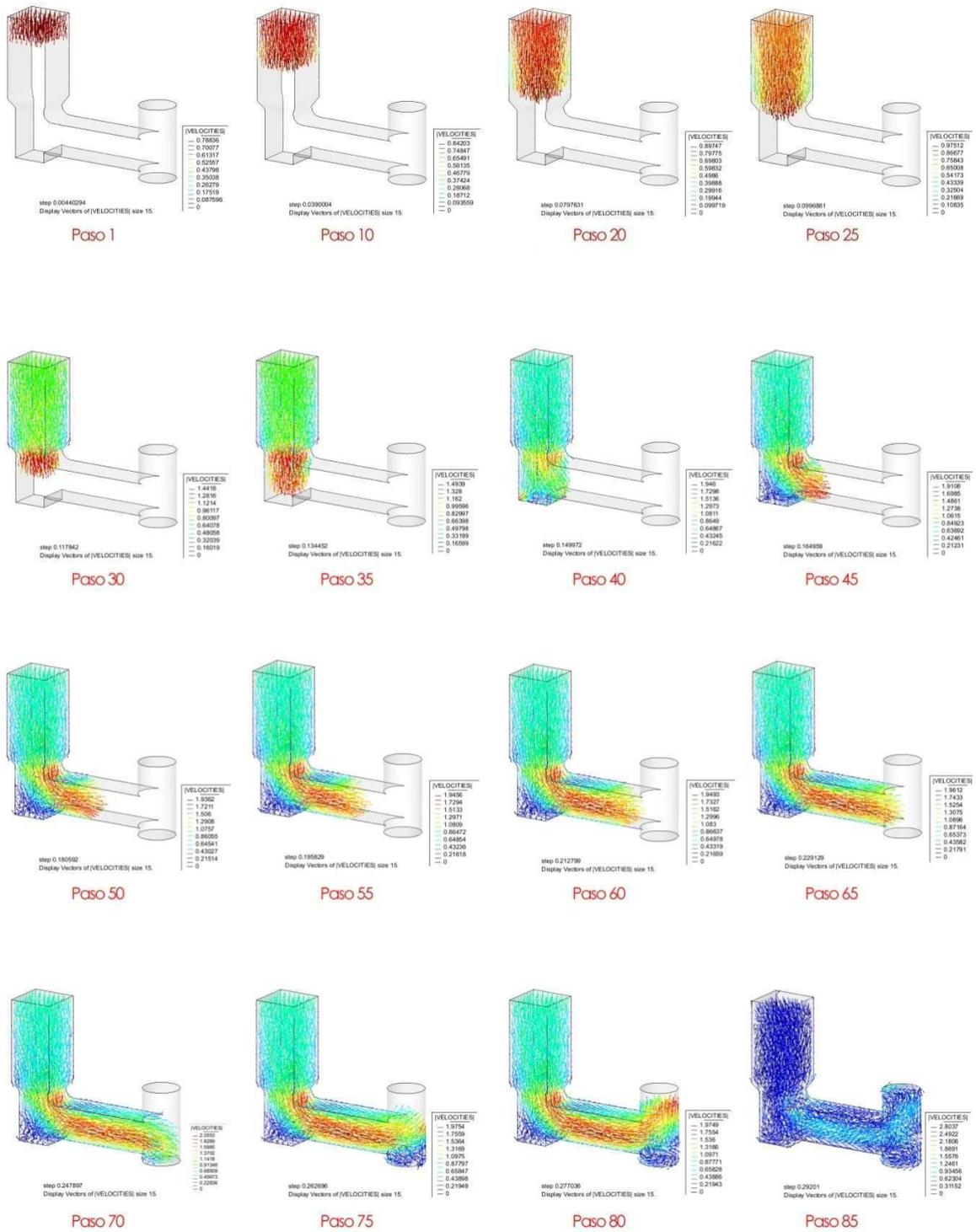


Figura 3.44 Vectores de velocidad durante la operación de llenado. Modelo 1

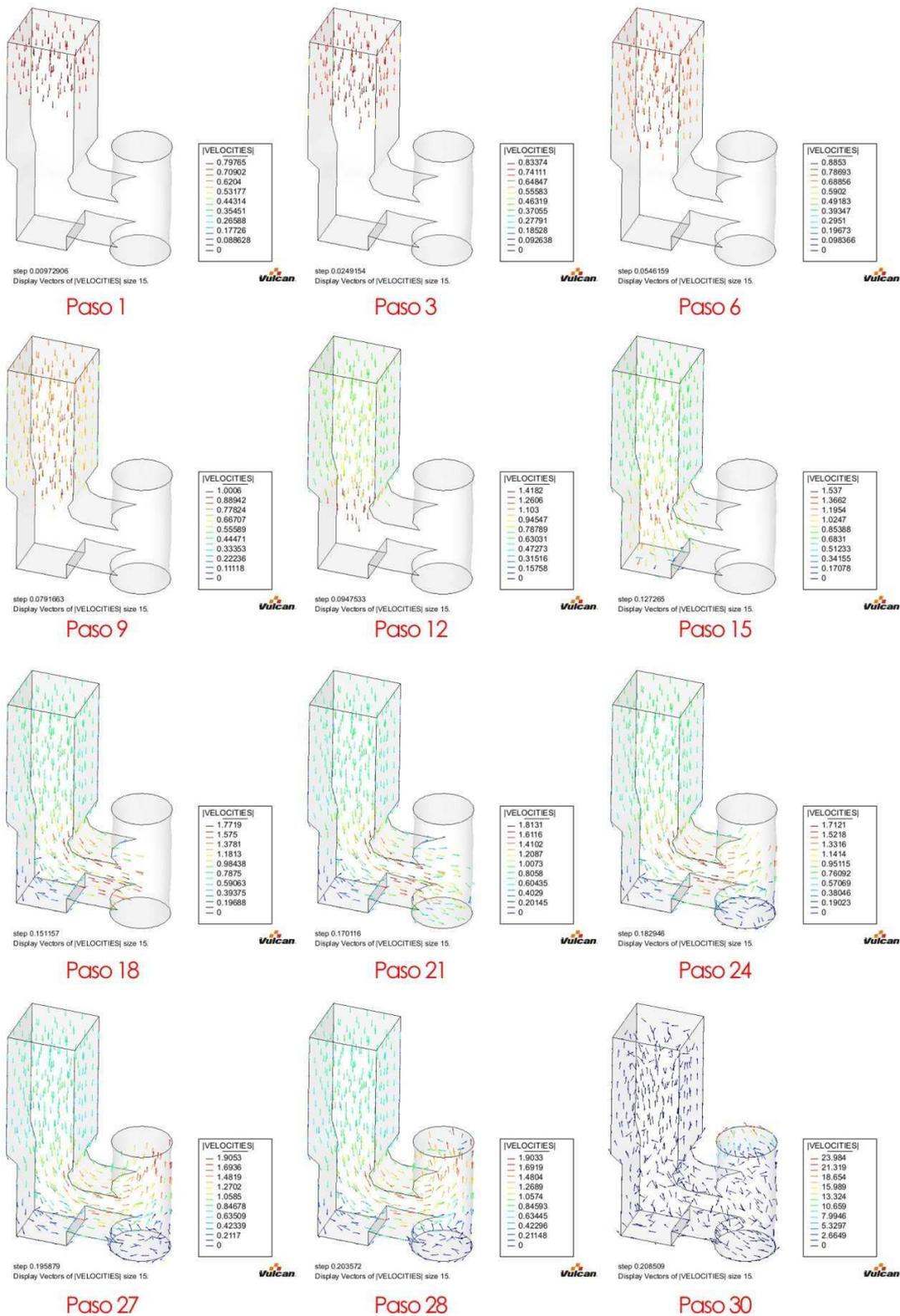


Figura 3.45 Vectores de velocidad durante la operación de llenado. Modelo 2

3.3.1.4 Última Zona En Llenar.

Esta opción permite visualizar la última zona del molde en ser cubierto completamente por el metal líquido. Para visualizar estos resultados se procede de la siguiente manera:

- Click en *View results / Contourfill / Last air* o mediante la opción *Last Air* sobre la barra de resultados(Figura 3.32)

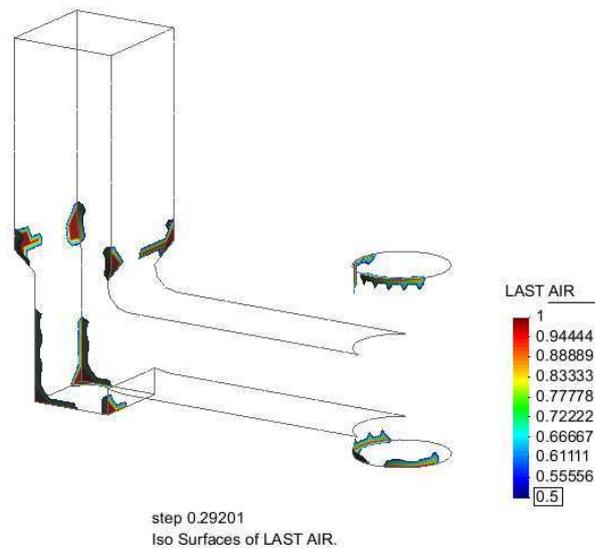


Figura 3.46 Ultima zona en llenar. Modelo 1

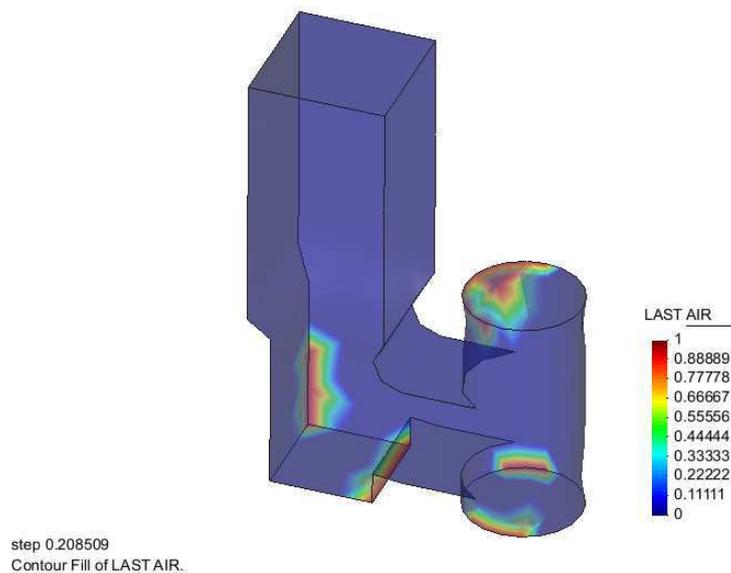


Figura 3.47 Ultima zona en llenar. Modelo 2.

3.3.1.5 Encuentro de frentes.

Esta opción de resultados permite determinar en qué lugares se tendrá circulación del metal líquido en la misma dirección pero sentido opuesto al momento de ingresar el material en el molde. Este resultado es más evidente en piezas con geometrías que posean espacios interconectadas entre sí, en donde el flujo de metal líquido llegue de varias direcciones. Para visualizar estos resultados se procede de la siguiente manera:

- En la barra de menús, click en el menú *View Results / Countourfill / Front meeting*. Automáticamente se mostrarán los resultados de las zonas específicas donde existirá los encuentros de frente de material (Figura 3.48, 3.49).

Para tener una mejor visualización, se activa la visualización transparente, de manera que se pueda visualizar el interior del molde.

- Abrir la ventana de capas (*Ctrl+L*) y cambiamos la visualización de la capa perteneciente a la pieza como transparencia.

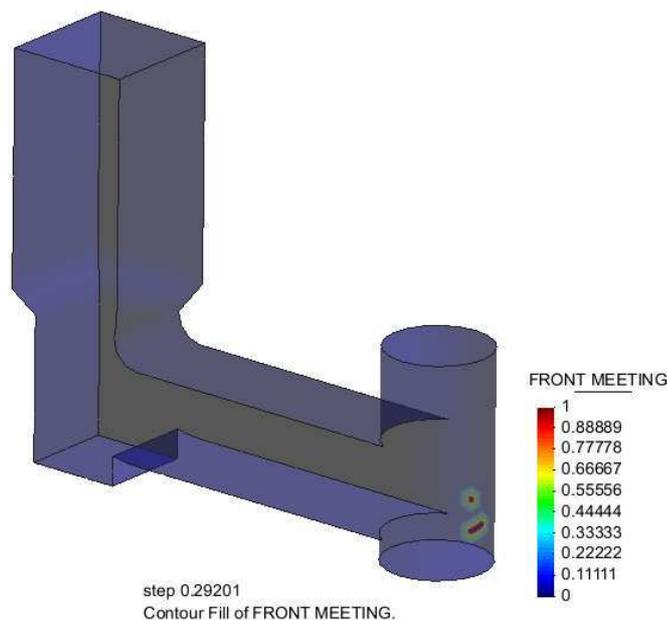


Figura 3.48 Encuentro de frentes del metal liquido. Modelo 1

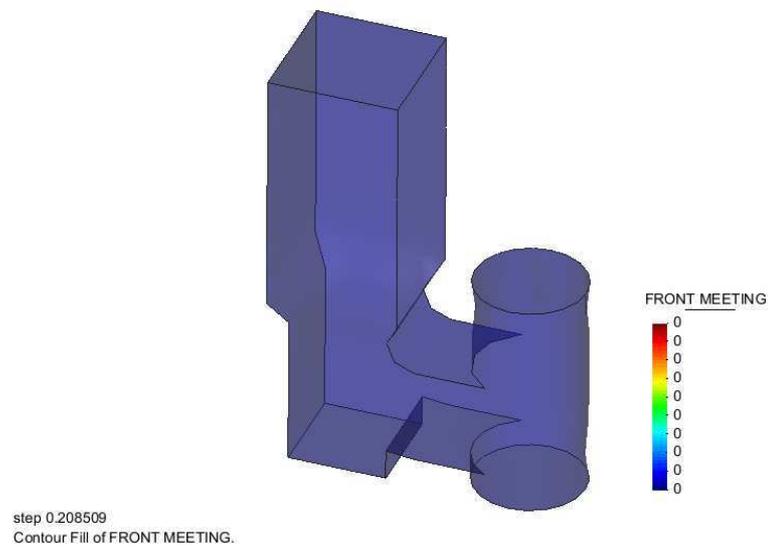


Figura 3.49 Encuentro de frentes del metal líquido. Modelo 2

3.3.1.6 Tiempo de Llenado

Esta opción de resultado indica el tiempo aproximado en minutos que tardará el metal líquido en llenar completamente el molde. Para visualizar este resultado se procede de la siguiente manera:

- Click en el menú *View results / Countournfill / filling time*, ó a su vez haciendo uso de la barra de resultados mediante el icono *Tiempo de Llenado* (Figura 3.35)

Al igual que los anteriores resultados se abre una ventana en donde permite configurar los parámetros de simulación como tiempo de animación, visualización de resultados, repetición de la animación, etc.

- Para iniciar la reproducción de la simulación, click sobre el botón de *Play*.

De esta manera se puede observar que zonas del molde serán las que más tiempo tardaran en llenarse por el metal líquido (Figura 3.50, 3.51).

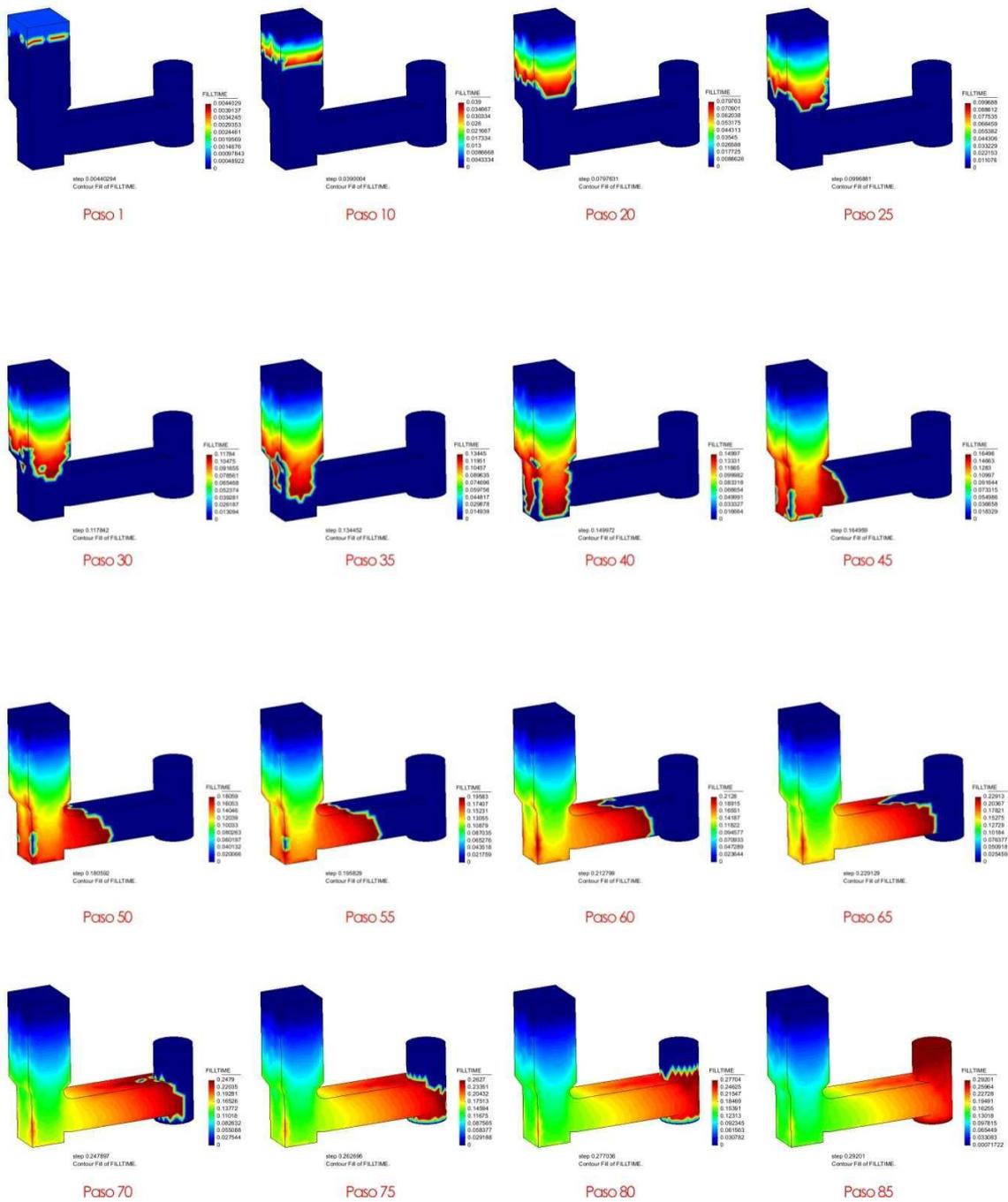


Figura 3.50 Tiempo de llenado del metal liquido en el molde. Modelo 1.

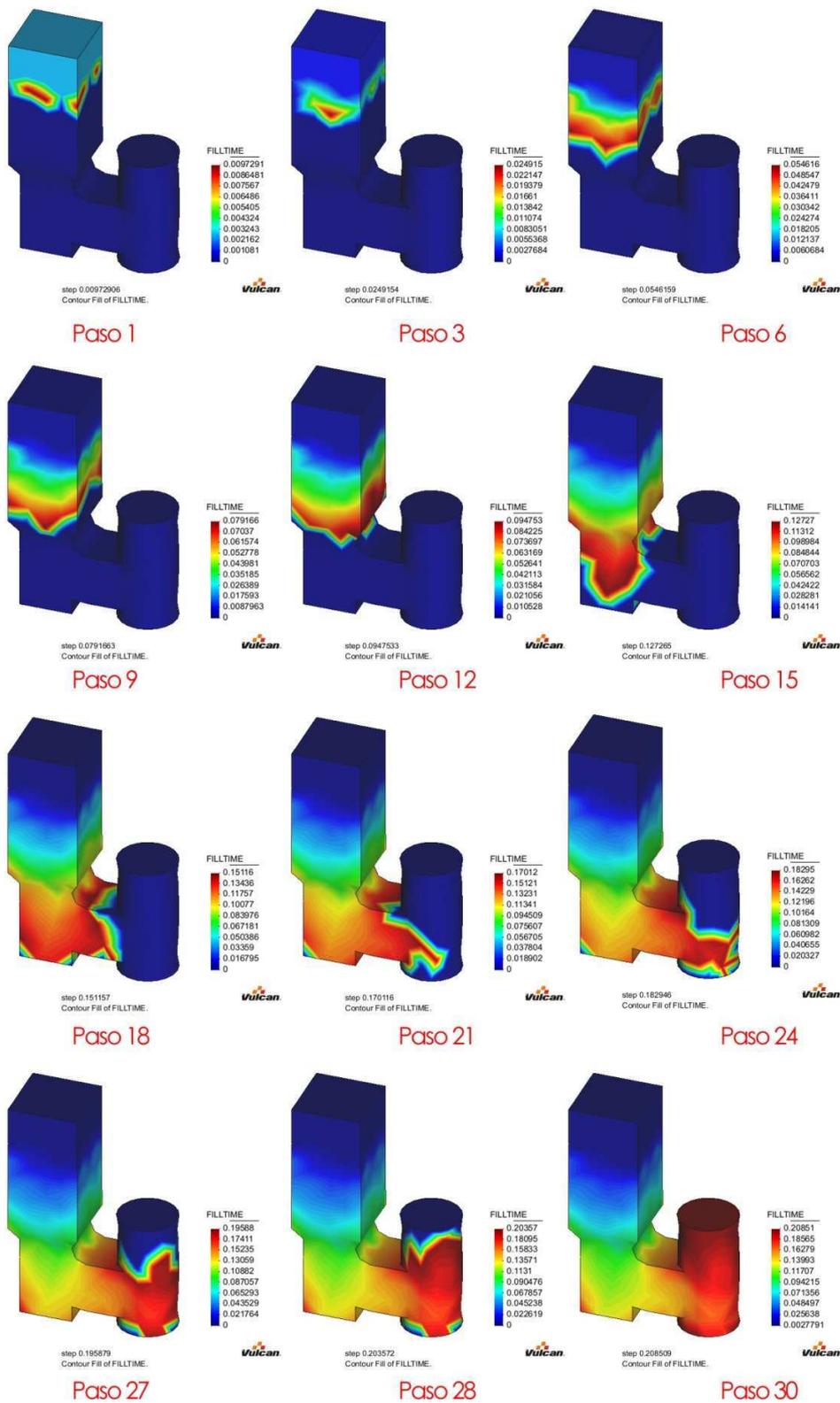


Figura 3.51 Tiempo de llenado del metal líquido en el molde. Modelo 2.

3.3.2 ETAPA DE SOLIDIFICACION

Para poder acceder a la operación de solidificación y sus respectivos resultados, previamente se debe haber definido la operación correspondiente a *Thermal Solidification* en la parte del preproceso (Figura 3.23). Para cargar los resultados correspondientes a esta etapa, se procede de la siguiente manera:

- Sobre la barra de menús, *click en Vulcan Results / Load results / Thermal1* (Figura 3.52).

Una vez cargado los resultados del proceso de solidificación podemos acceder a todos los resultados correspondientes.

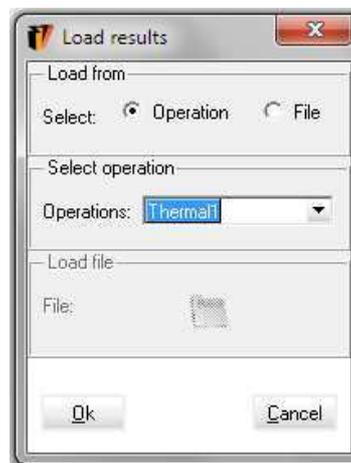


Figura 3.52 Carga de los resultados para la operación de solidificación.



Figura 3.53 Barra de resultados. Agrupación de botones según el proceso.

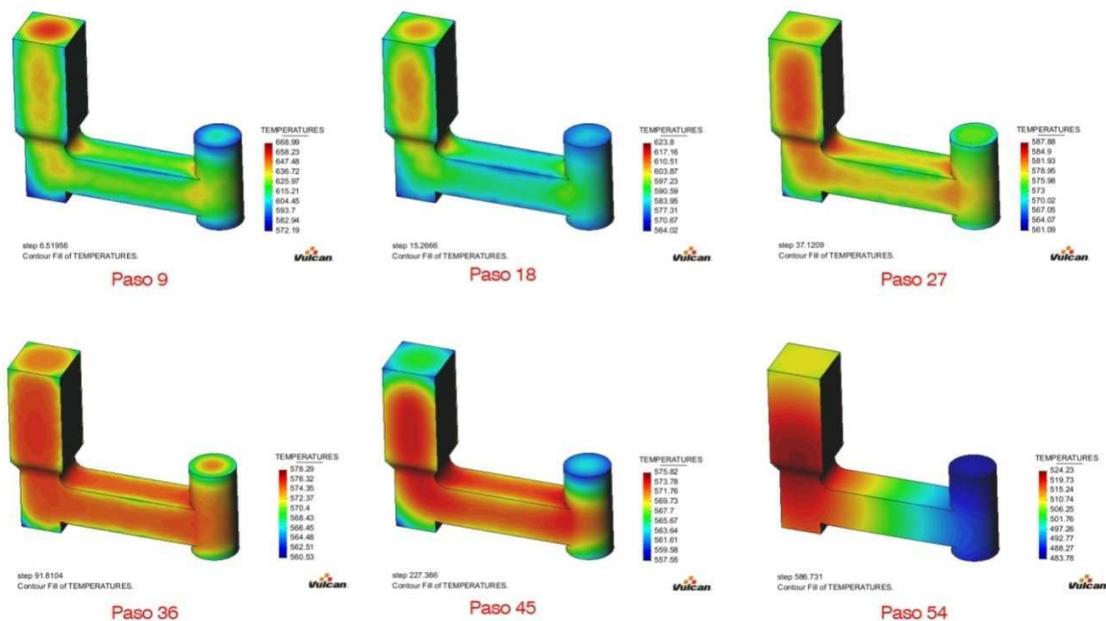
3.3.2.1 Evolución De Temperatura en la etapa de solidificación

Los resultados que se muestran en esta etapa permiten determinar la evolución de temperatura a través del molde inmediatamente luego de haberse llenado el molde con el metal líquido hasta el momento en que alcanza la temperatura de equilibrio con el ambiente (estado sólido). Para visualizar los resultados se procede de la siguiente manera.

- Click en el icono *Visualizar Evolución de Temperaturas* (Figura 3.35) ubicado sobre la barra de resultados, ó mediante la barra de menús: *View results / ContourFill / Temperature Evolution*.

Al igual que con las anteriores opciones de resultados se muestra una ventana (Figura 3.37) donde permite configurar todos los parámetros de la animación de solidificación.

- Click en el icono *Play* para iniciar la animación.



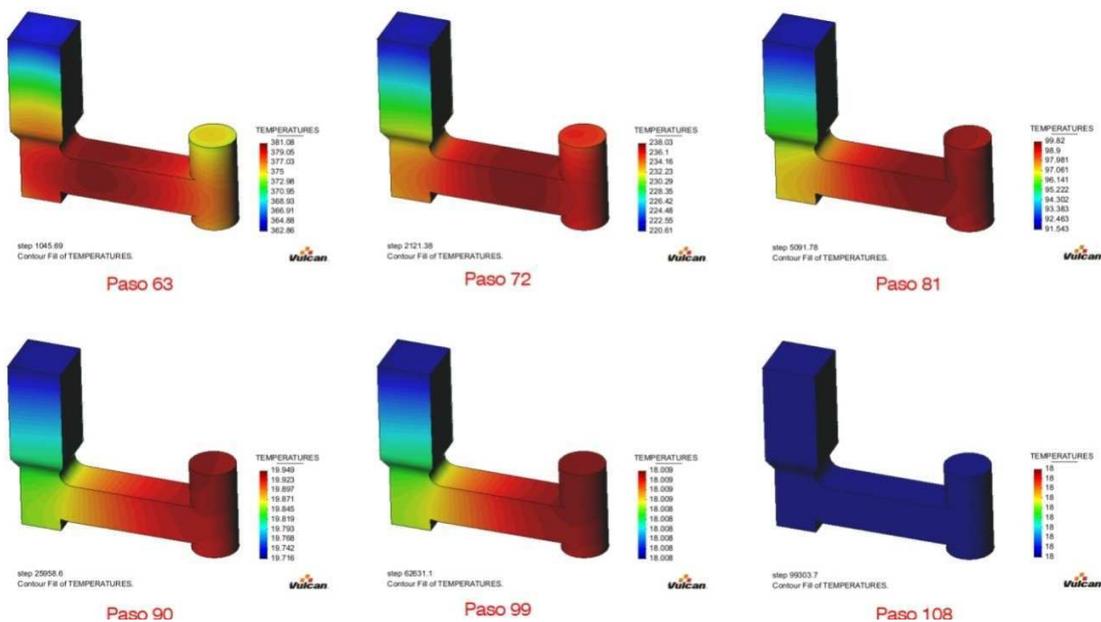
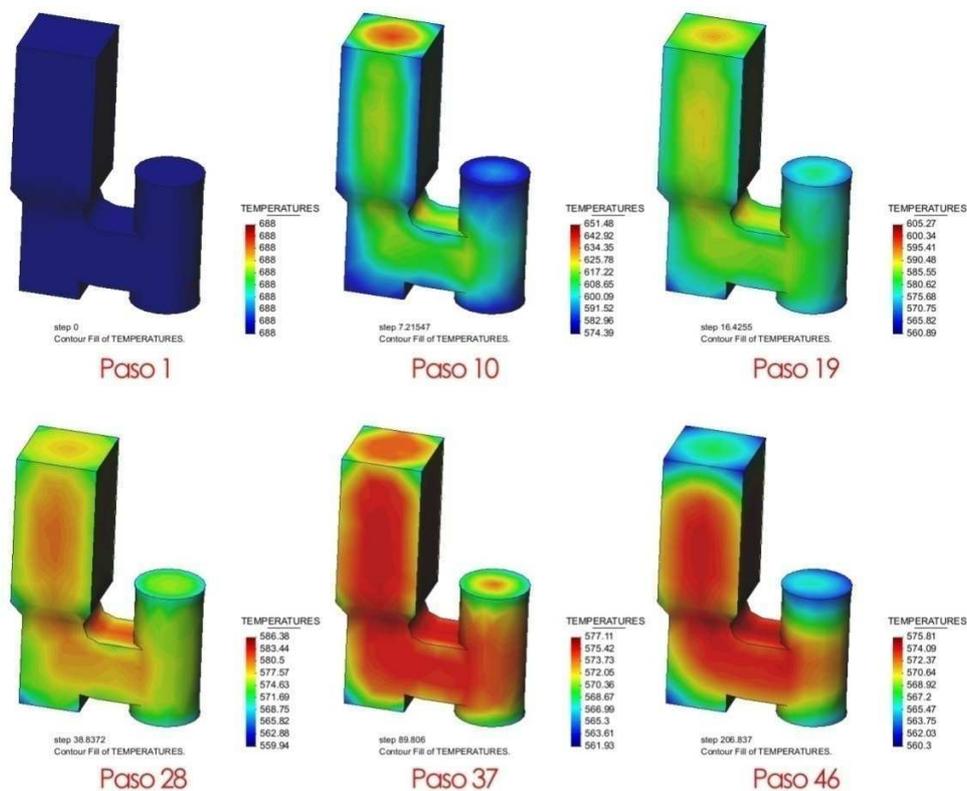


Figura 3.54 Evolución de temperaturas en la operación de solidificación. Modelo 1



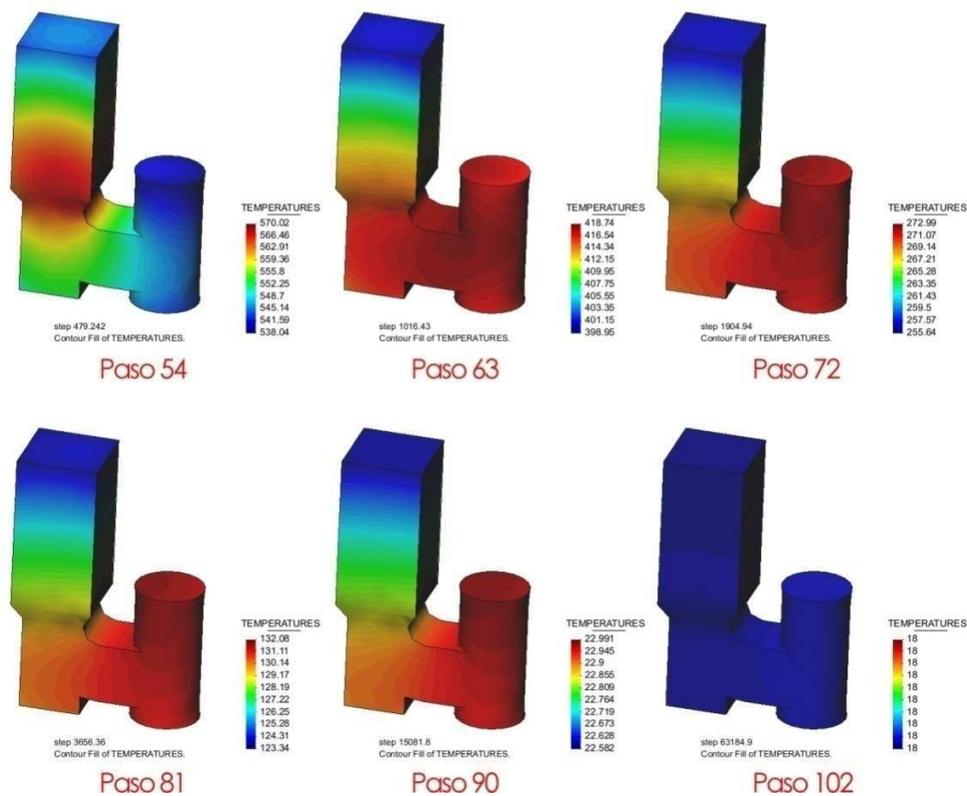


Figura 3.55 Evolución de temperaturas en la operación de solidificación. Modelo 2

3.3.2.2 Fracción Sólida

La opción de resultados de fracción sólida muestra los resultados de cómo evolucionará la solidificación de la pieza en cada una de las zonas. Estos resultados son de gran utilidad al momento de diseñar el tamaño de mazarota y el sistema de alimentación. Para visualizar los resultados se procede de la siguiente manera:

- En la barra de resultados (Figura 3.35) *Click sobre el botón Fracción sólida*. Se despliega la ventana (Figura 3.37) en donde permite la configuración de los parámetros de la animación.
- Para dar inicio a la animación, *Click en el botón Play*. Los resultados de la fracción sólida muestran que zona será la última en solidificarse.



Figura 3.56 Resultados de *Fracción Sólida*. Modelo 1



Figura 3.57 Resultados de fracción sólida. Modelo 2

3.3.2.3 Modulo De Solidificación

Los resultados que se muestran en esta fase nos presentan el módulo de solidificación de cada una de las zonas de la pieza. Es decir la relación volumen-área que existe en esa zona. Estos resultados ayudan en el diseño del tamaño de la mazarota teniendo presente que el módulo de solidificación de esta tiene que ser al menos veinte por ciento mayor al de la pieza. Para visualizar estos resultados se procede de la siguiente manera:

- En la barra de menús, click sobre el menú *View results / Contour Fill / Solidification modulus.*

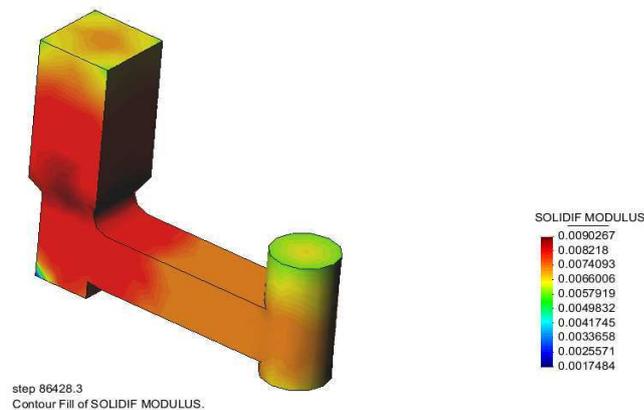


Figura 3.58 Resultado del Módulo de solidificación. Modelo 1

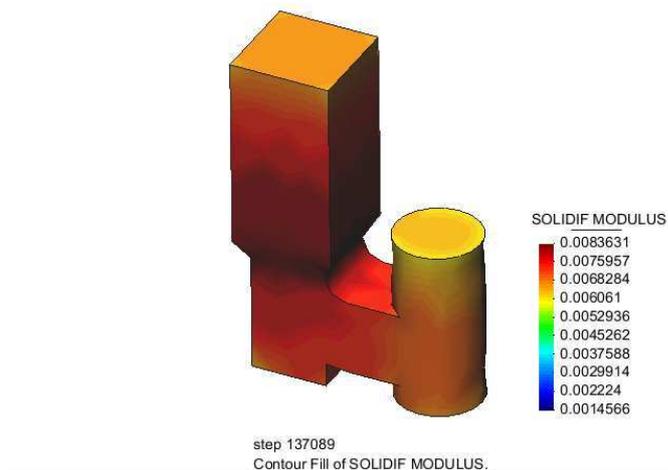


Figura 3.59 Resultado del Módulo de solidificación. Modelo 2

3.3.2.4 Tiempo De Solidificación

Esta opción de resultados determina el tiempo total en segundos empleado desde que culmina el proceso de llenado hasta que ha solidificado. Para visualizar estos resultados se procede de la siguiente manera:

- En la barra de menús, click sobre el menú *View results / Contour Fill / Solidification time*. Se muestra la imagen de la pieza con las diferentes zonas y valores de tiempo de solidificación.

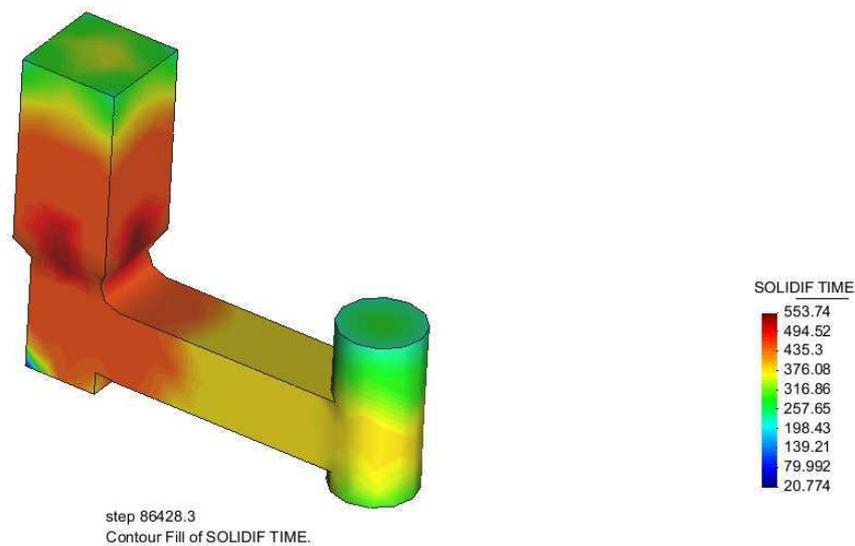


Figura 3.60 Resultados del tiempo de solidificación. Modelo 1.

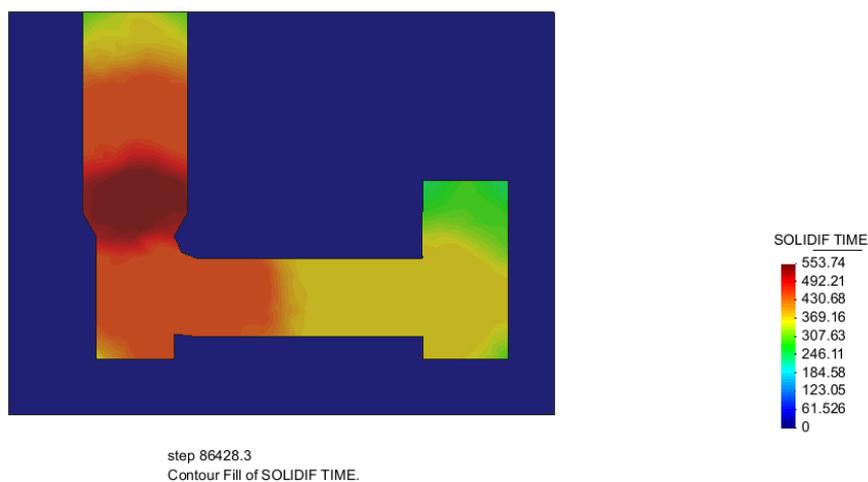


Figura 3.61 Resultados del tiempo de solidificación en corte longitudinal. Modelo 1.

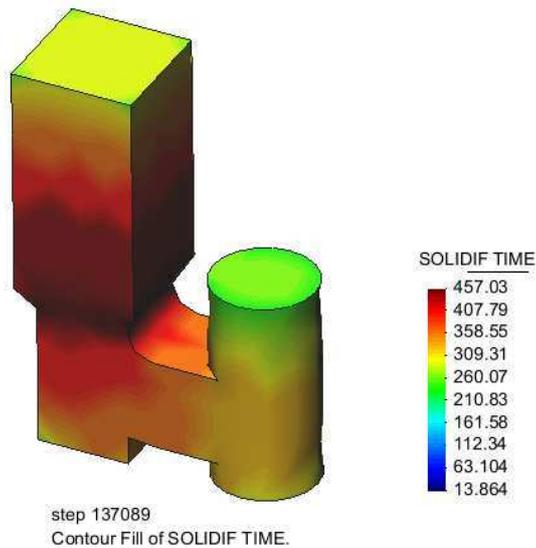


Figura 3.62 Resultados del tiempo de solidificación para el cilindro. Modelo 2

3.3.2.5 DEFECTO NIYAMA

El criterio Niyama es una relación basada en el gradiente de temperatura y la velocidad de enfriamiento. Este criterio fue desarrollado por el investigador Japonés Dr. Niyama, en el estudio de la predicción de rechupe en el acero. Niyama descubrió que la división entre el gradiente de temperatura y la raíz cuadrada de la velocidad de enfriamiento da como resultado un valor que indica la probabilidad de la presencia de rechupes en fundiciones.

Para visualizar estos resultados, se procede de la siguiente manera.

- En la barra de menús, click sobre el menú *Vulcan Results / Countour Fill / Niyama defect*

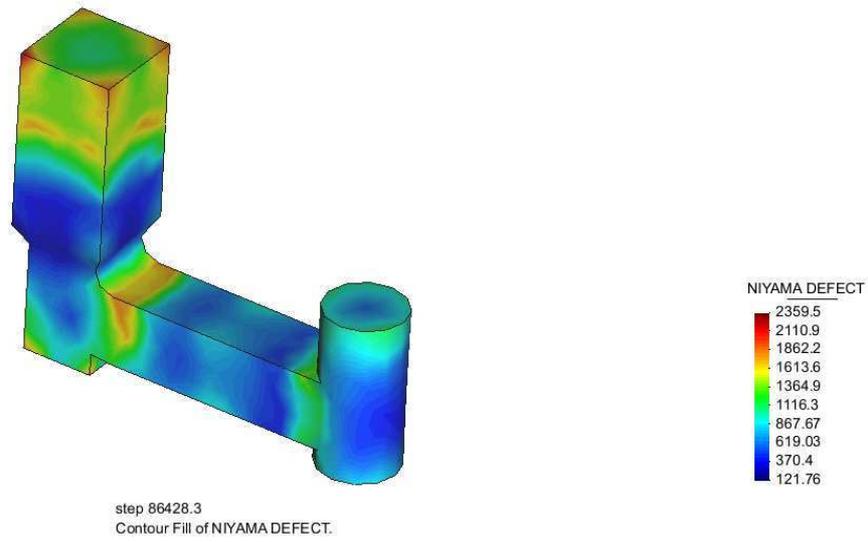


Figura 3.63 Resultados Defectos Niyama. Modelo 1

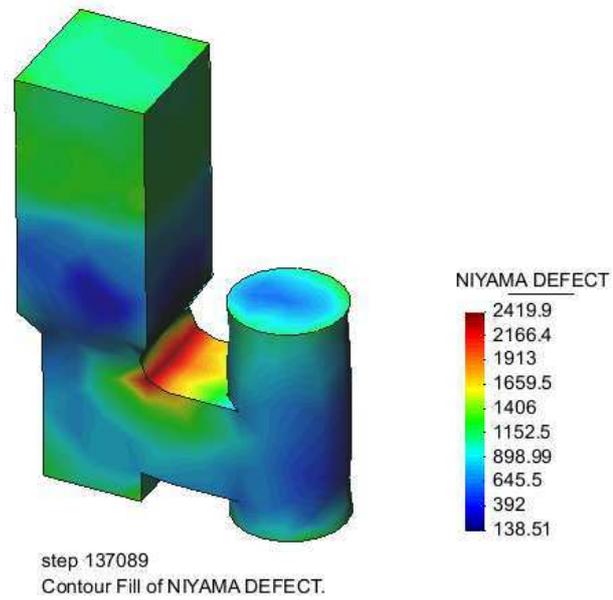


Figura 3.64 Resultados Niyama. Modelo 2

3.3.3 ETAPA DE ENFRIAMIENTO (Thermo-Mechanical)

En esta fase el programa determina los efectos producidos al terminar la solidificación, tales como esfuerzos residuales, reacciones, desplazamientos y contracciones de la pieza.

Para iniciar la operación de enfriamiento y visualizar sus respectivos resultados, previamente se debe haber definido la operación correspondiente a *Thermo-Mechanical solidification* en la fase del preproceso (Figura 3.23). Para cargar los resultados correspondientes a esta etapa se lo realiza de la misma manera que se indicó para los dos anteriores:

- Sobre la barra de menús, *click en Vulcan Results / Load results / ThermoMech1* (Figura 3.51).



Figura 3.65 Carga de resultados para la operación de Enfriamiento

Una vez cargado los resultados del proceso de enfriamiento se puede acceder a todos los resultados correspondientes.

3.3.3.1 DESPLAZAMIENTOS

Estos resultados muestran el desplazamiento en metros ocasionado a causa de contracción volumétrica de la pieza solidificada. Para visualizar estos resultados se procede de la siguiente manera:

- En la barra de menús, click sobre el menú *Vulcan Results / Contour Fill / displacements*

Estos resultados indican los desplazamientos. Ahora se añadirá los resultados de la deformación.

- En la barra de menús, click sobre el menú *Vulcan Results / Deformación*. De esta manera se podrá observar la deformación y sus respectivos valores.

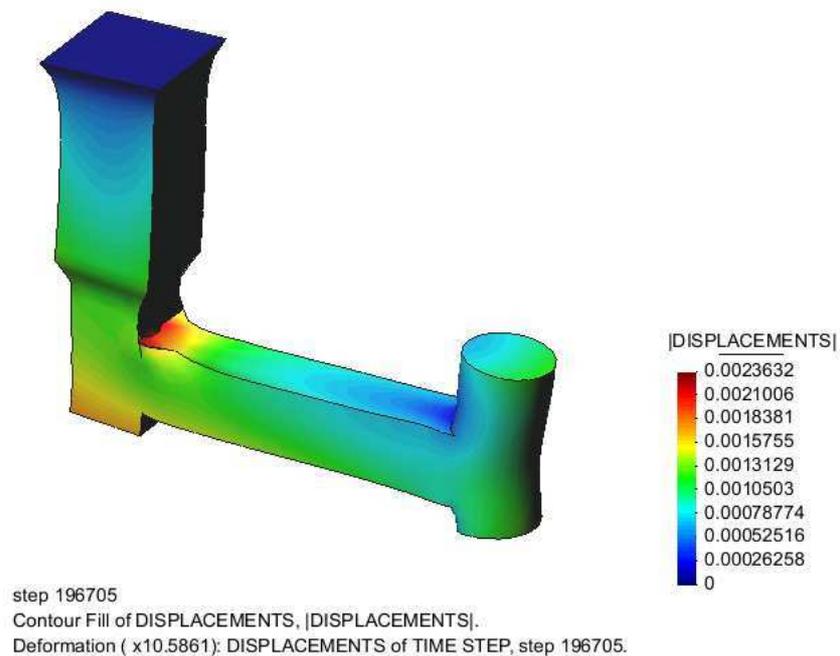


Figura 3.66 Resultados de desplazamiento y deformación en la pieza solidificada. Modelo 1

Es posible visualizar los desplazamientos ocasionados en la pieza y el molde al mismo tiempo. Para ello simplemente se activa la capa que corresponde al molde.

- En la ventana de administración de capas (*Ctrl+L*) se activa la visualización de la capa correspondiente al molde. De esta manera se puede visualizar juntamente el molde y la pieza (Figura 3.67).

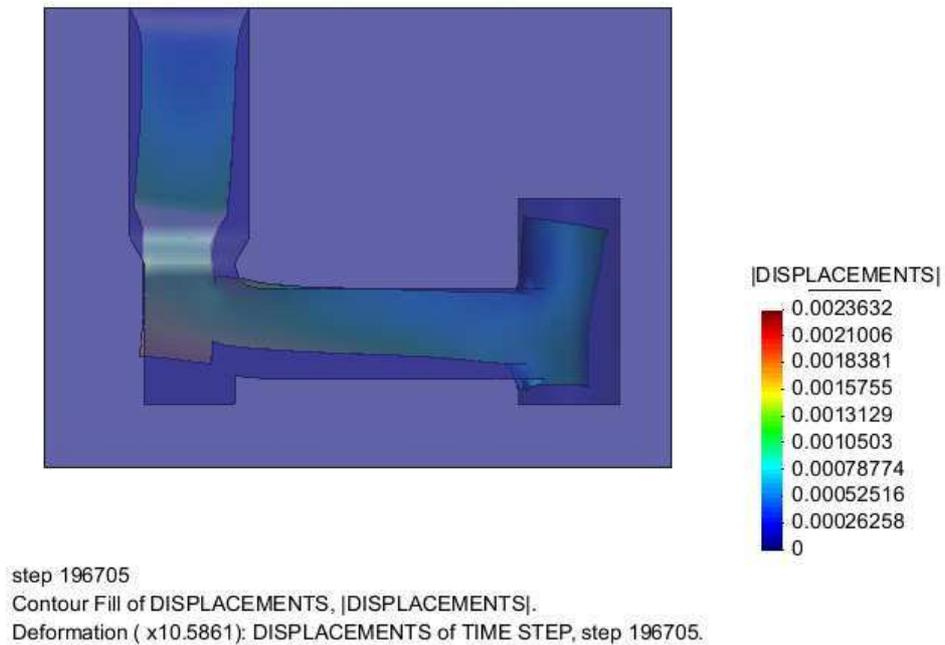


Figura 3.67 Resultados de desplazamiento. Pieza y molde. Modelo 1

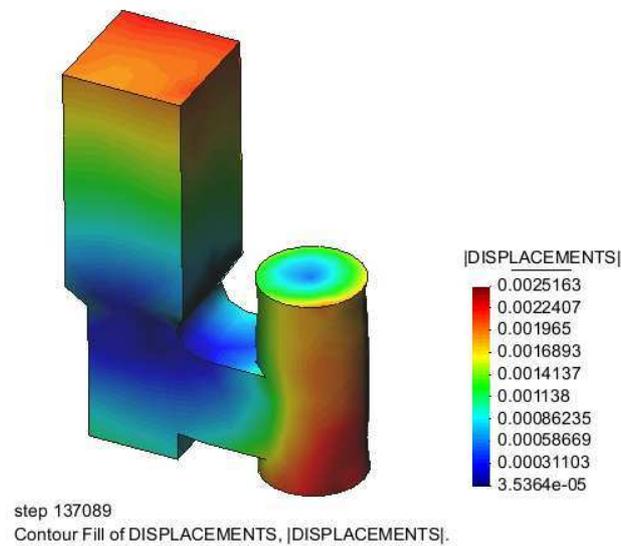


Figura 3.68 Resultados de desplazamiento. Modelo 2

3.3.3.2 ESFUERZOS RESIDUALES

Esta opción de resultados determina las zonas que se verán afectadas por los esfuerzos residuales debidas a la contracción de la pieza al momento de

solidificar. Las unidades de los valores de esfuerzo que muestra el programa están en pascales. Para visualizar estos resultados se procede de la siguiente manera:

- En la barra de menús, click sobre el menú *Vulcan Results / Countour fill / j2 stresses*

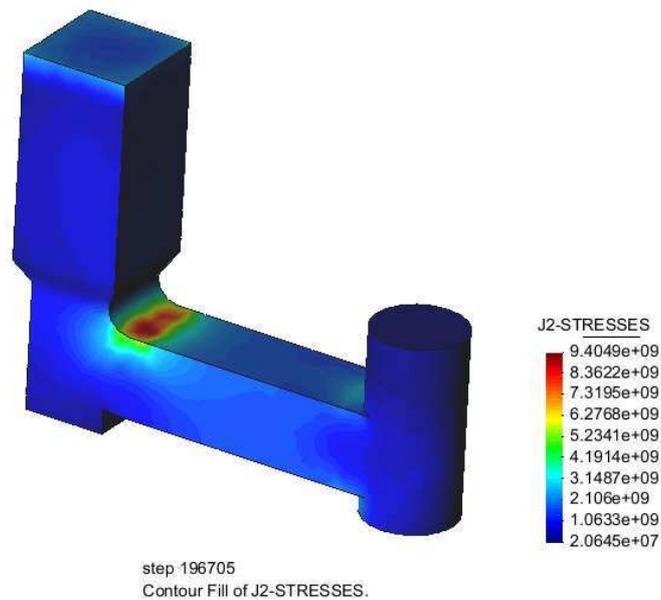


Figura 3.69 Resultados J2- Stresses. Modelo 1

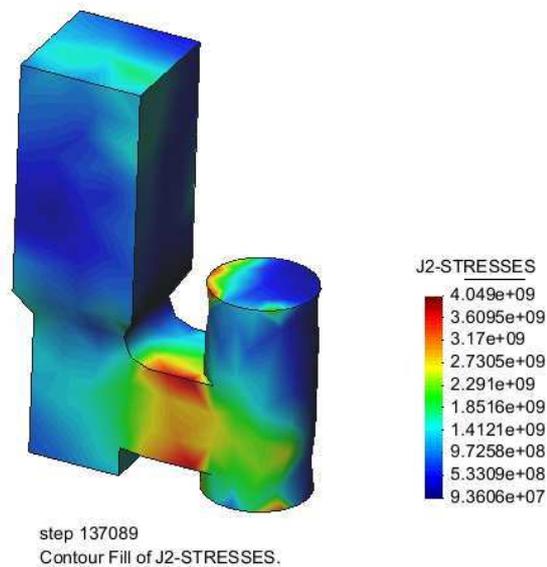


Figura 3.70 Resultados J2- Stresses. Modelo 2

3.4 RESULTADOS OBTENIDOS

En este apartado se muestran los resultados obtenidos para cada una de las geometrías, mediante imágenes extraídas de la animación del programa. El proceso realizado para el cilindro en las fases de pre-proceso y post-proceso es exactamente el mismo que se realizará para el prisma y la esfera. De esta manera se obtendrá los resultados de las diferentes operaciones.

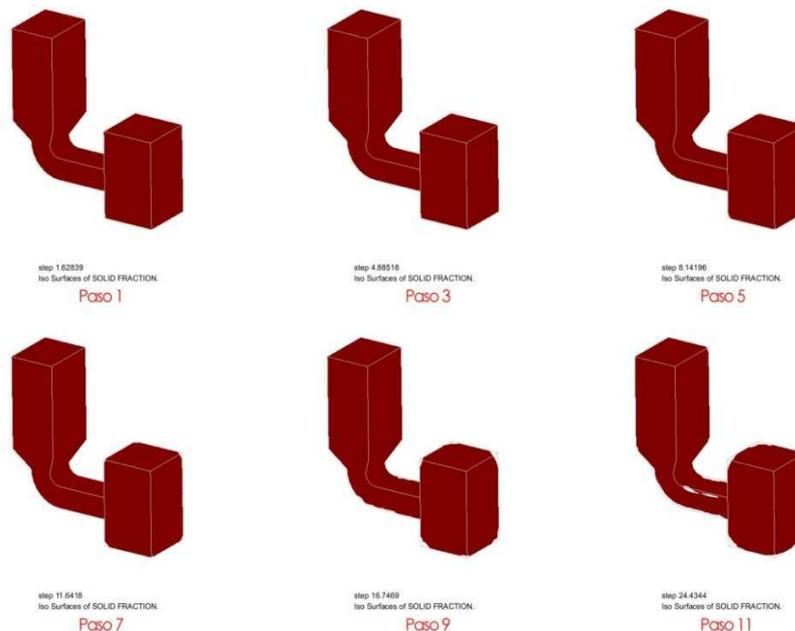
3.4.1 PRISMA

Para cada una de las geometrías se ha creado varios diseños a los cuales se ha variado las dimensiones del sistema de alimentación y mazarota para poder simular hasta obtener las dimensiones óptimas para la geometría.

3.4.1.1 Primer Modelo

En esta primera simulación se desea determinar si las dimensiones del sistema de alimentación y mazarota permiten un correcto proceso de fracción sólida y gradiente de temperaturas. Se utiliza estos dos resultados como parámetros de referencia porque son los que mayor relevancia tienen.

Fracción Sólida:



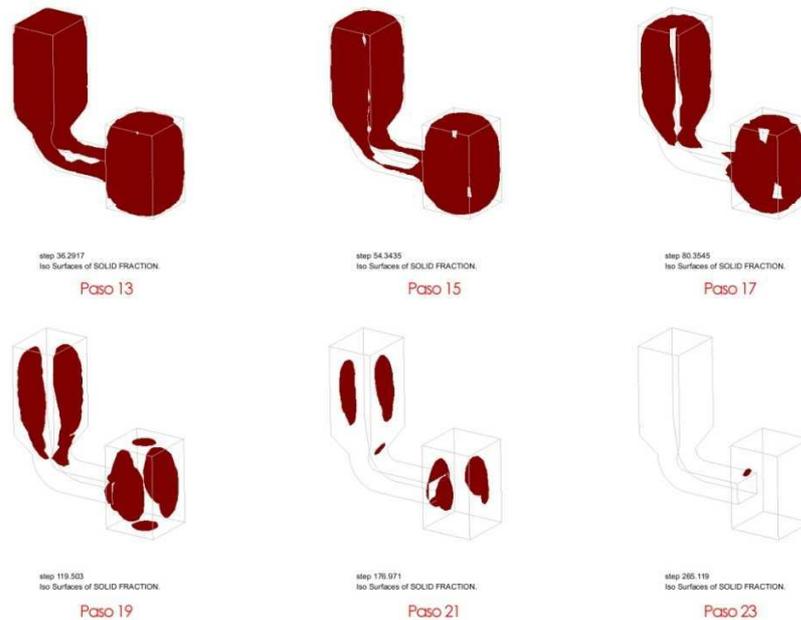
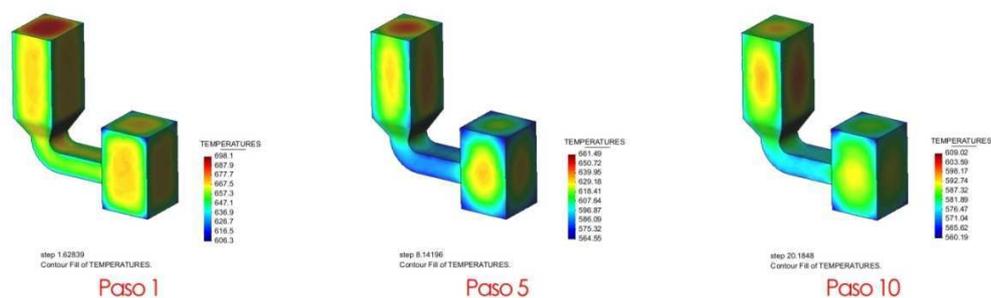


Figura 3.71 Resultados de fracción sólida para el prisma. Modelo 1

El color rojo representa el material líquido durante el proceso de solidificación. En la evolución de la fracción sólida se puede observar que se corta el flujo de material por el canal de alimentación antes de tiempo, ya que aún hay bolsas de líquido en el interior de la pieza. Esto da lugar a la aparición de rechupes o distorsiones en el interior de la pieza debido a que la mazarota ya no puede aportar material para compensar la contracción del aluminio.

Evolución de temperatura en la etapa de solidificación:



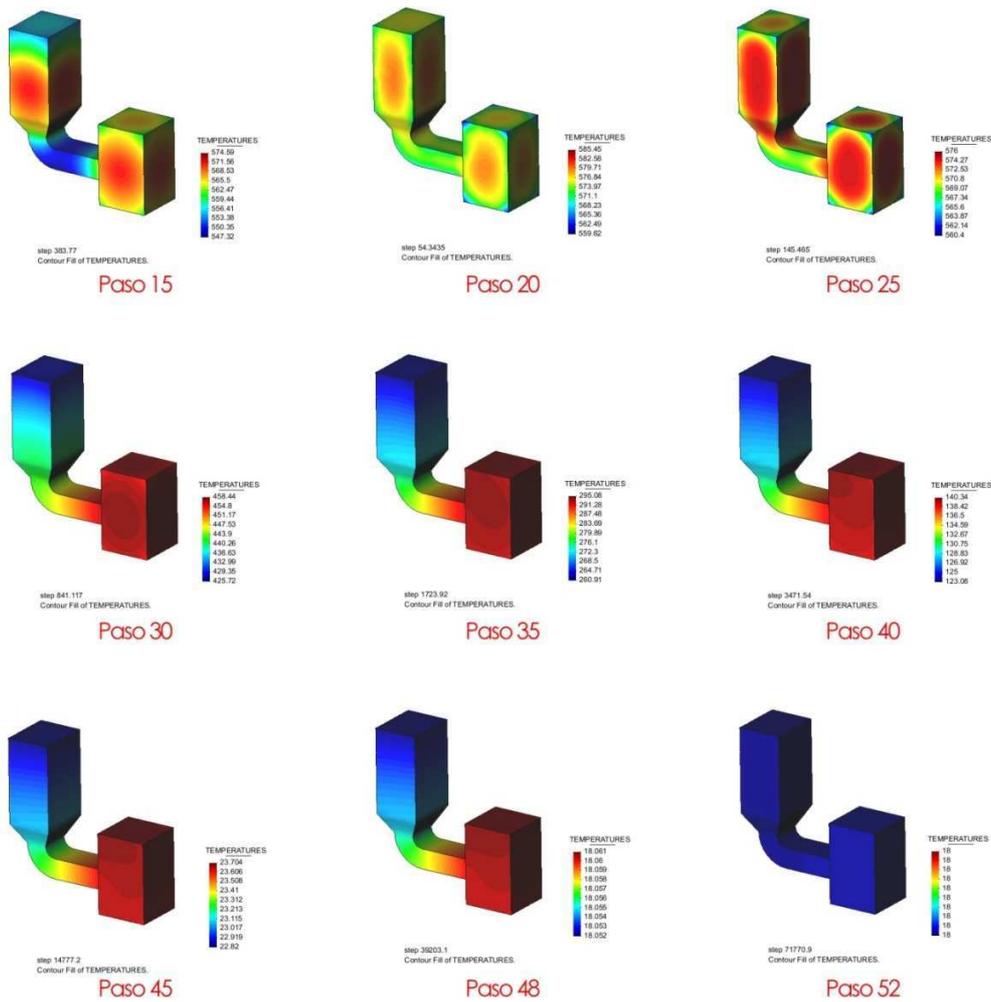


Figura 3.72 Resultados de evolución de temperaturas en la etapa de solidificación. Modelo 1

Durante la etapa de solidificación, la evolución de la temperatura no es la adecuada ya que el canal de distribución solidifica antes que la pieza, impidiendo el aporte de material desde la mazarota.

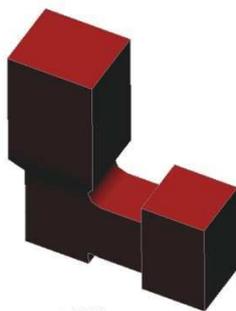
Conclusión

La solidificación prematura del canal de alimentación indica que necesariamente se debe incrementar la dimensión de este.

3.4.1.2 Segundo Molde

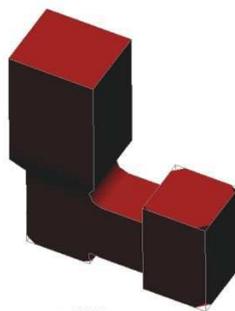
En esta segunda simulación se ha creado un canal de alimentación más amplio pretendiendo eliminar el problema de solidificación temprana en el canal de alimentación.

Fracción sólida:



step 0.99584
Iso Surfaces of SOLID FRACTION.

Paso 2



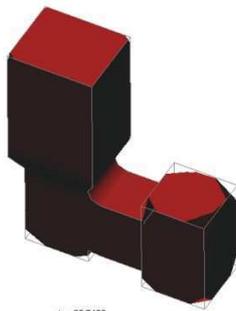
step 12.0131
Iso Surfaces of SOLID FRACTION.

Paso 13



step 17.495
Iso Surfaces of SOLID FRACTION.

Paso 17



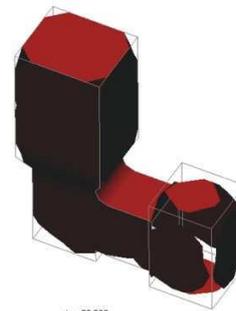
step 25.7428
Iso Surfaces of SOLID FRACTION.

Paso 21



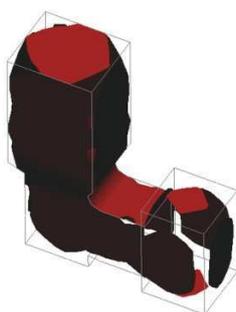
step 36.7235
Iso Surfaces of SOLID FRACTION.

Paso 25



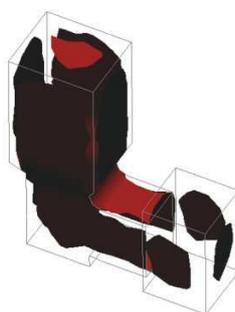
step 52.206
Iso Surfaces of SOLID FRACTION.

Paso 29



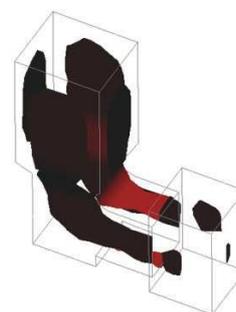
step 76.0204
Iso Surfaces of SOLID FRACTION.

Paso 33



step 111.48
Iso Surfaces of SOLID FRACTION.

Paso 37



step 163.842
Iso Surfaces of SOLID FRACTION.

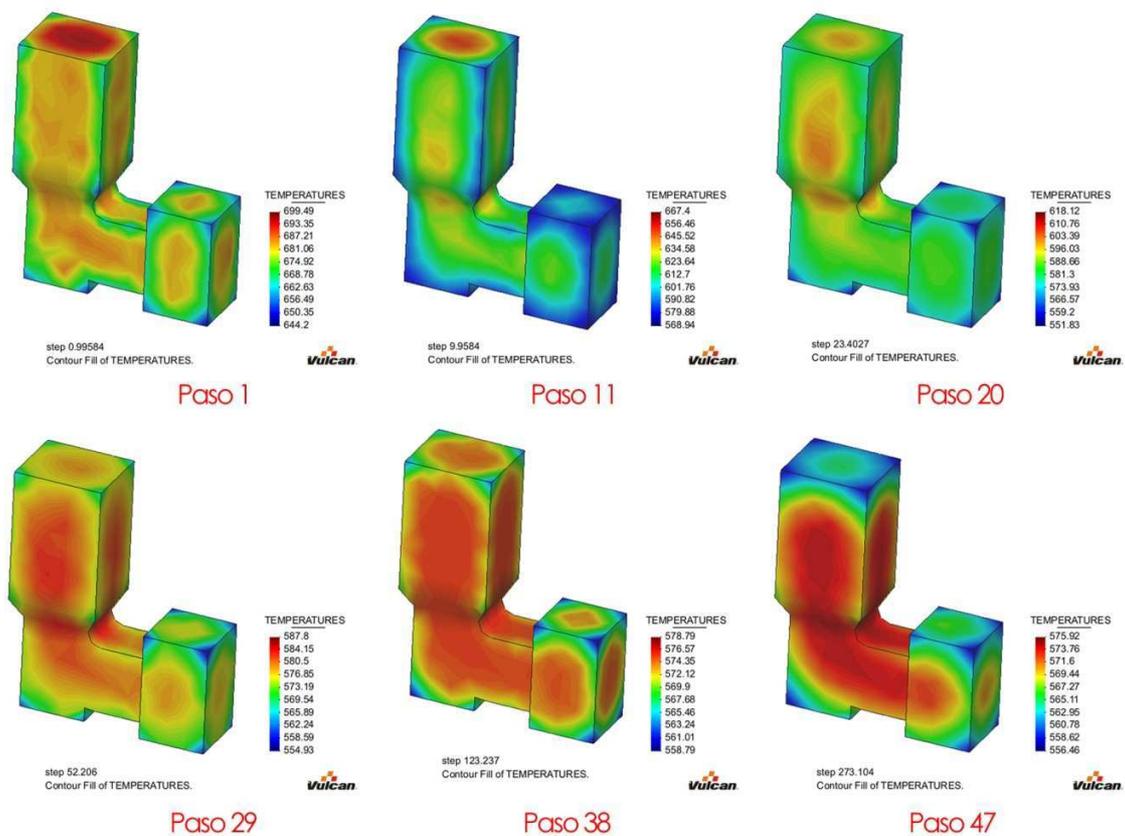
Paso 41



Figura 3.73 Resultados de la Fracción Sólida para el prisma.

En el proceso de la evolución de la fracción sólida se puede observar que es correcto. En esta simulación la última parte en solidificar es la mazarota y por lo tanto, se contrae para evitar la aparición de rechupes en el interior de la pieza.

Evolución de temperaturas en la fase de solidificación:



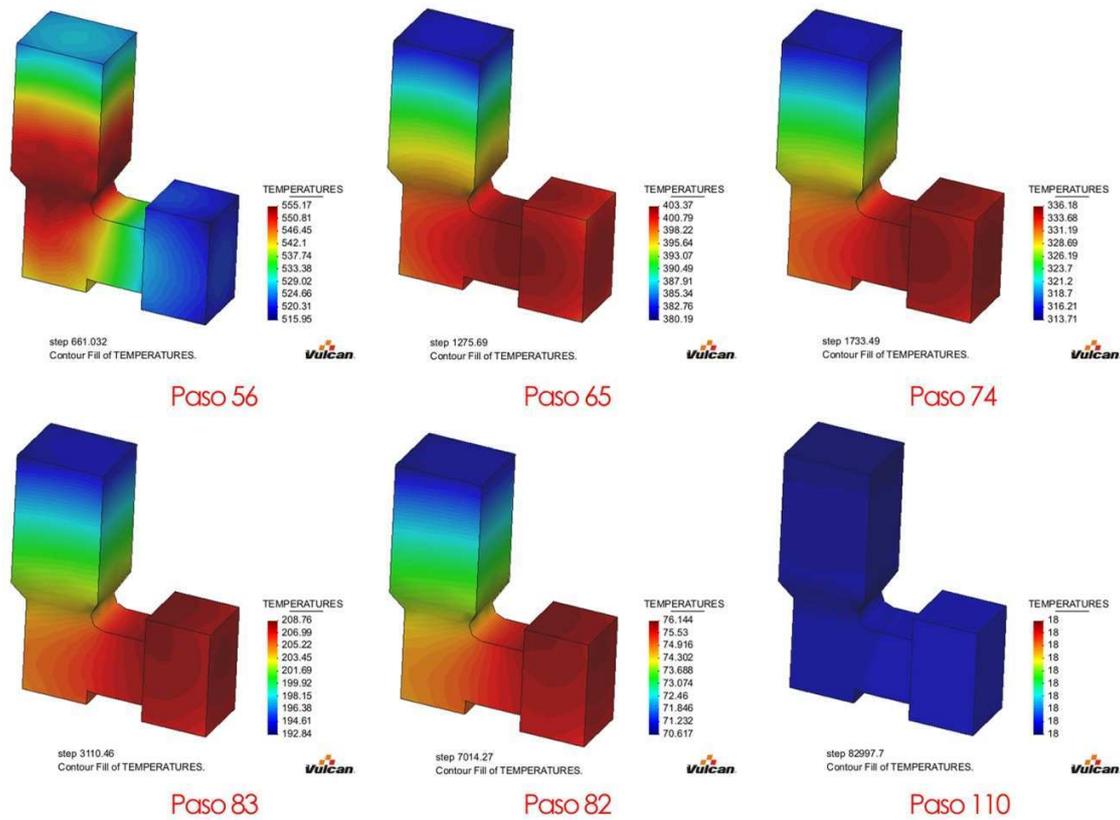


Figura 3.74 Evolución de Temperaturas en la etapa de solidificación para el prisma.

En el enfriamiento las temperaturas si son las adecuadas ya que el canal de alimentación y montante son los que solidifican último.

Ahora que se ha comprobado los dos procesos críticos de la solidificación se puede continuar con los otros resultados.

Velocidad de llenado:

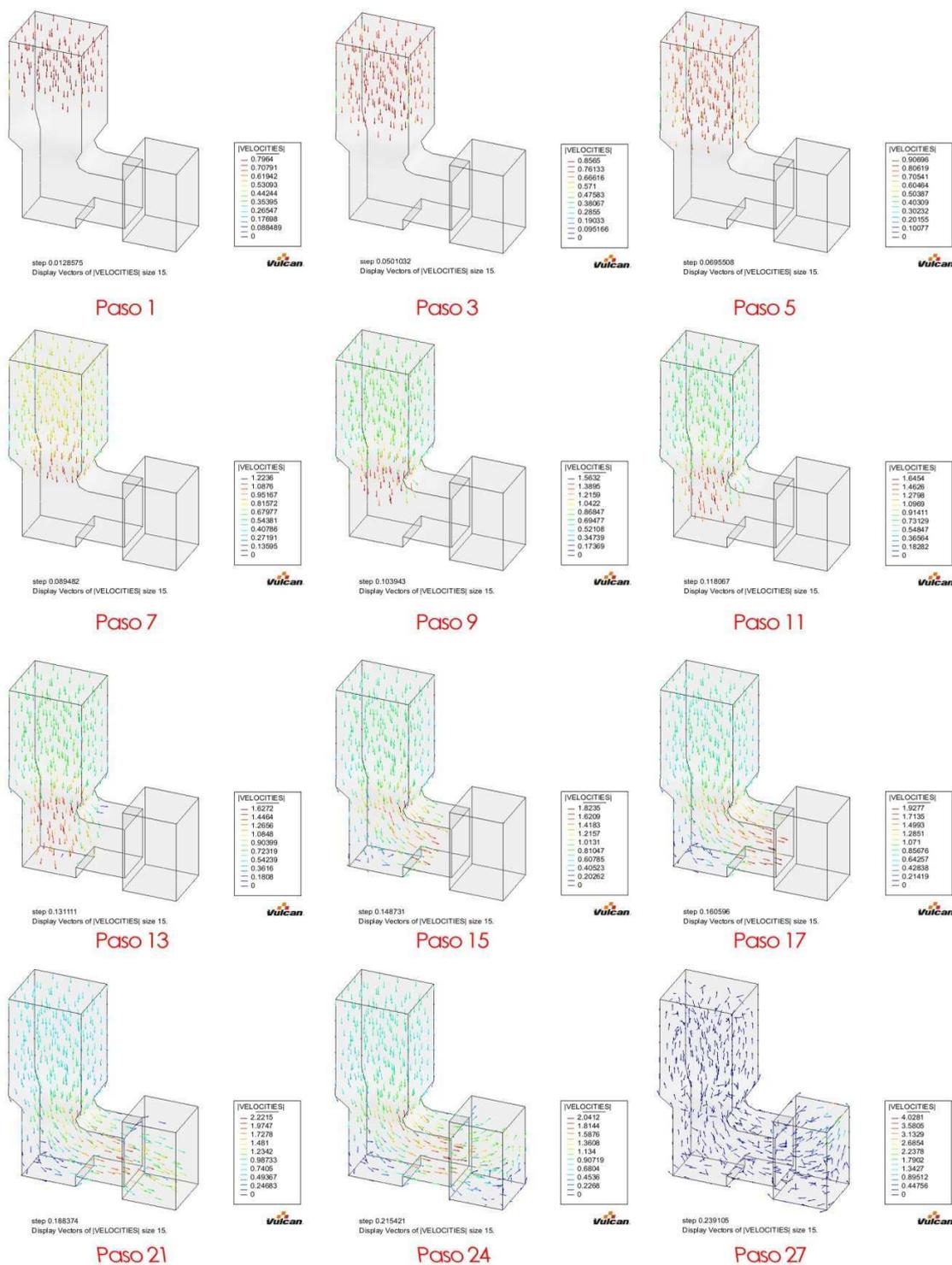


Figura 3.75 Resultados de velocidades en la fase de llenado al interior del molde

Evolución de temperatura en la fase de llenado:

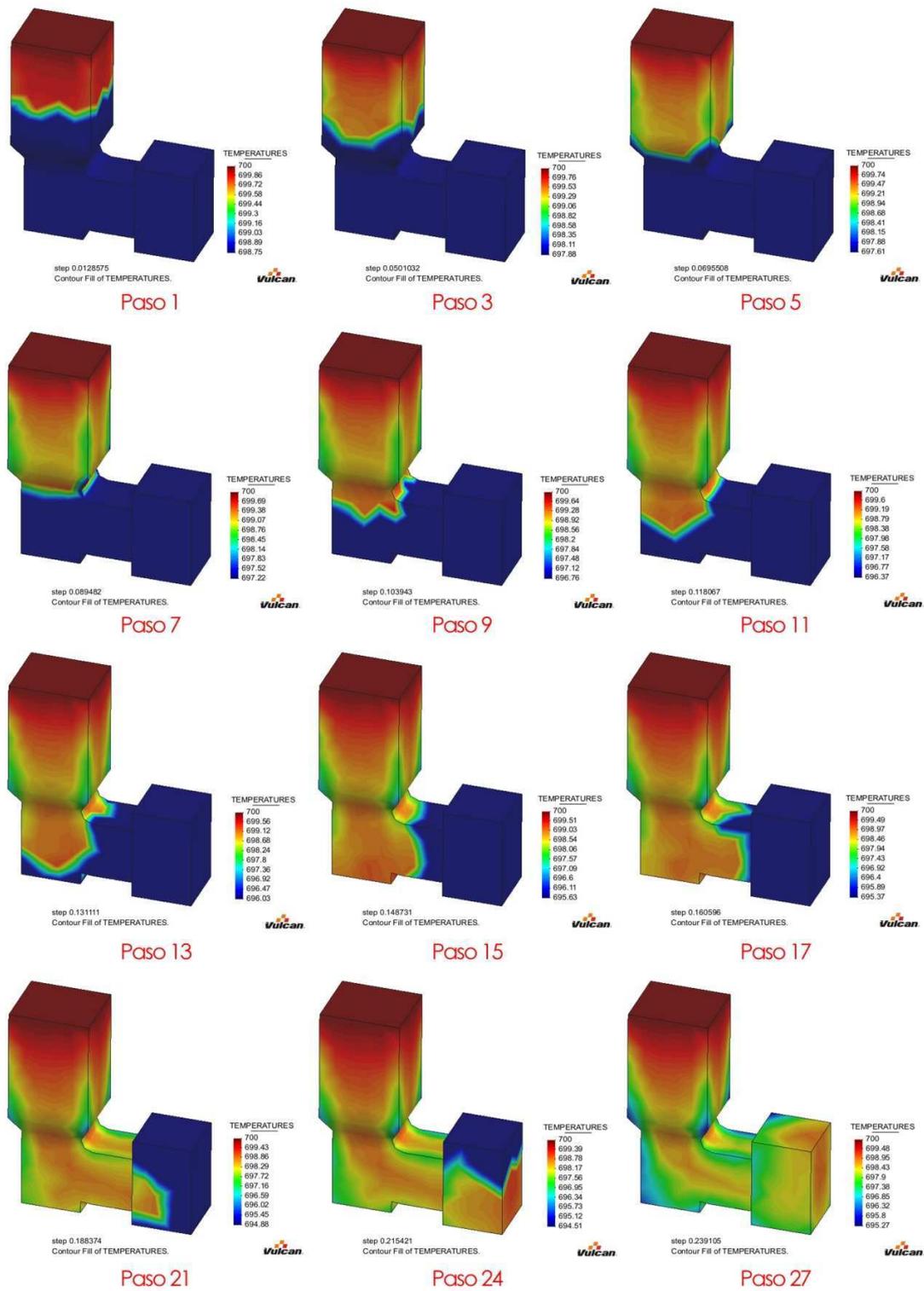


Figura 3.76 Evolución de temperaturas en la fase de ingreso al molde.

Ultima zona en llenar:

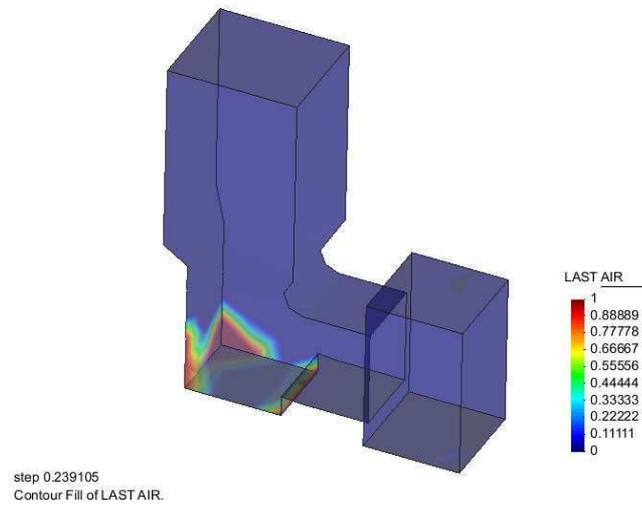
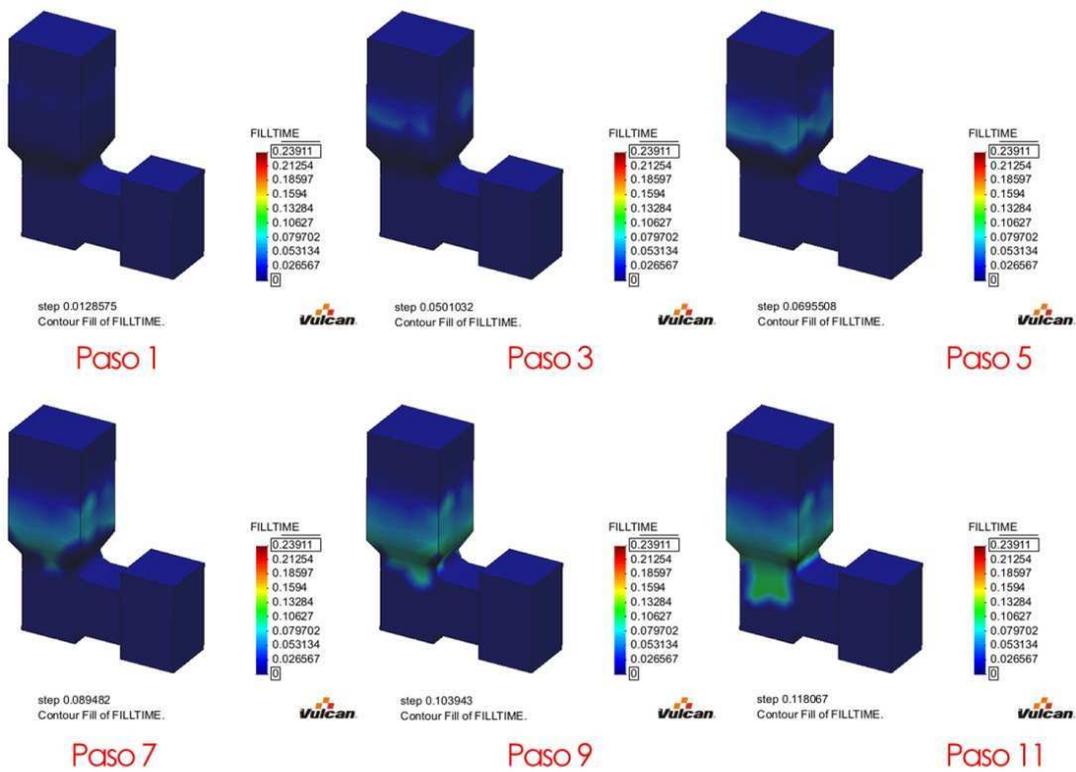


Figura 3.77 Resultados de la última zona en llenarse de metal líquido.

Tiempo de llenado:



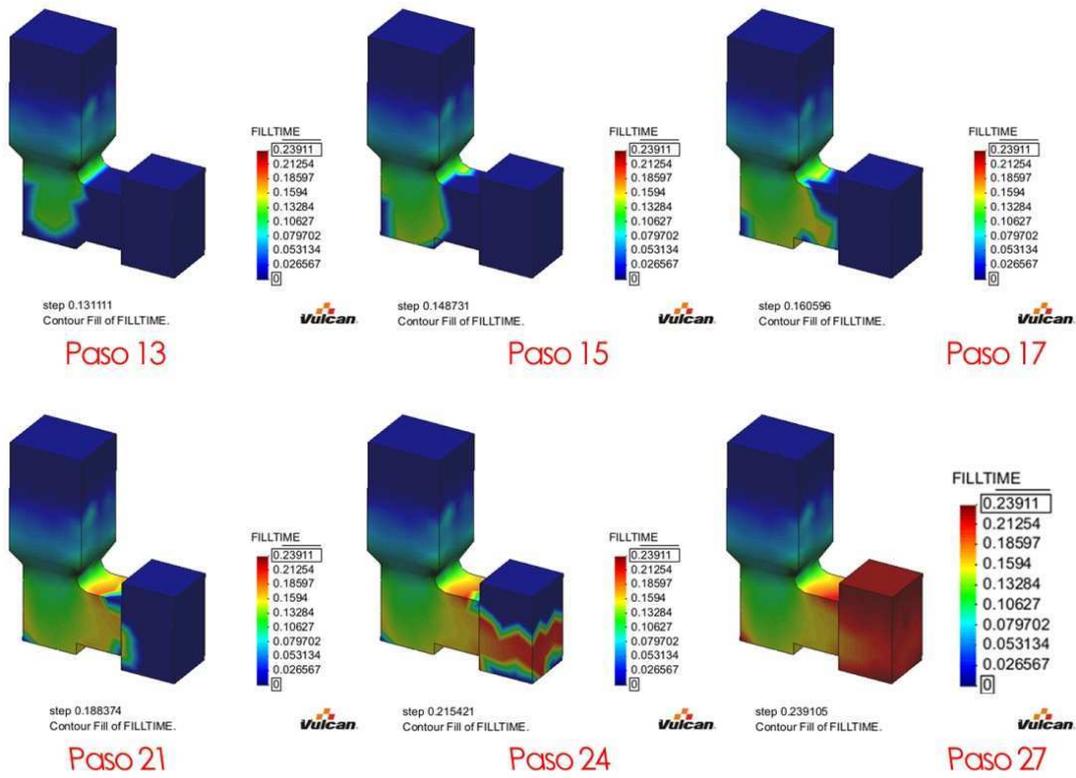


Figura 3.78 Resultados del tiempo de llenado de metal liquido en el molde.

Modulo de solidificación:

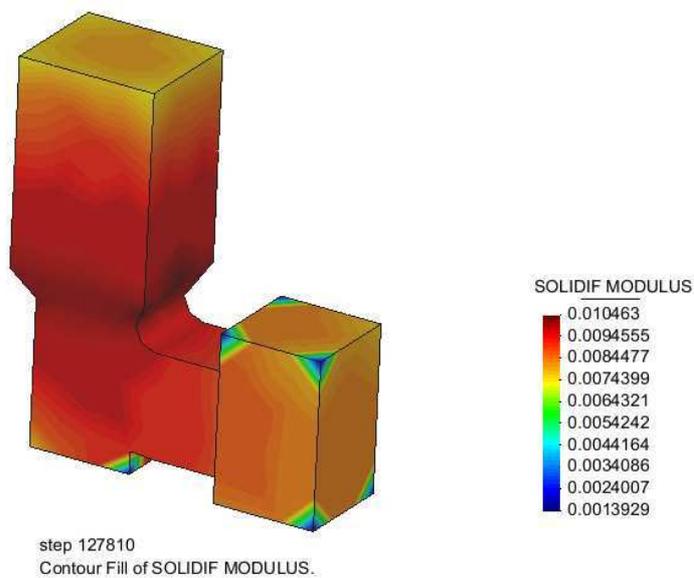


Figura 3.79 Resultado del Modulo de Solidificación.

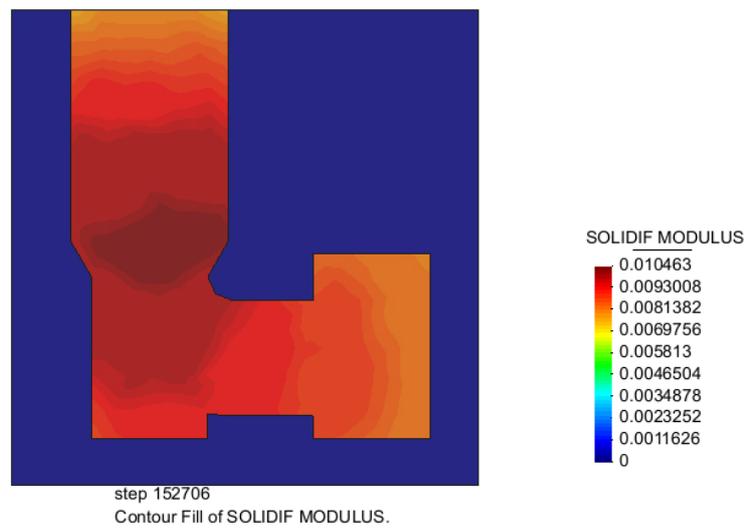


Figura 3.80 Resultado del Modulo de Solidificación en corte longitudinal.

Tiempo de solidificación:

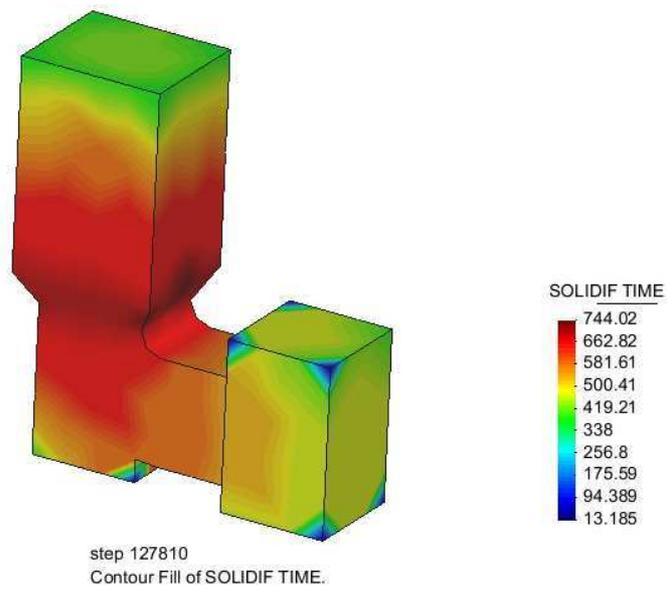


Figura 3.81 Resultados del Tiempo de Solidificación para el prisma.

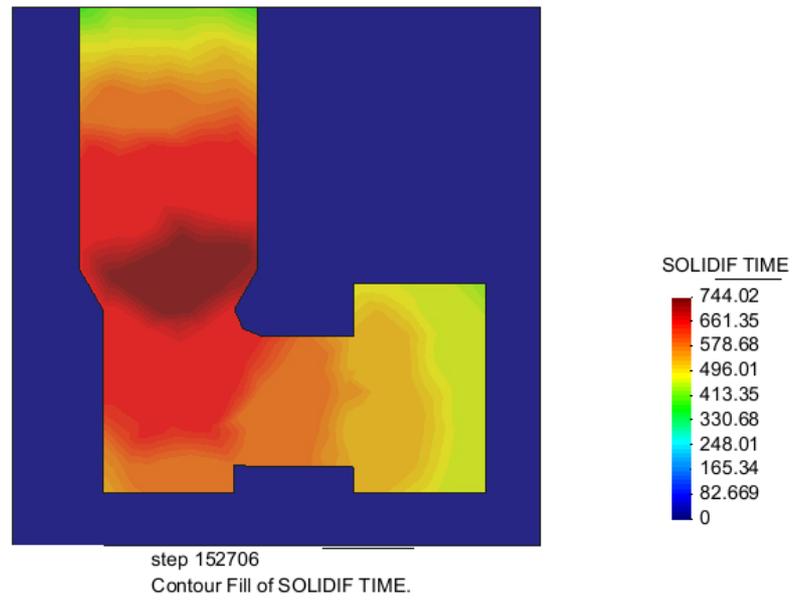


Figura 3.82 Resultados del Tiempo de Solidificación en corte longitudinal

Efecto Niyama:

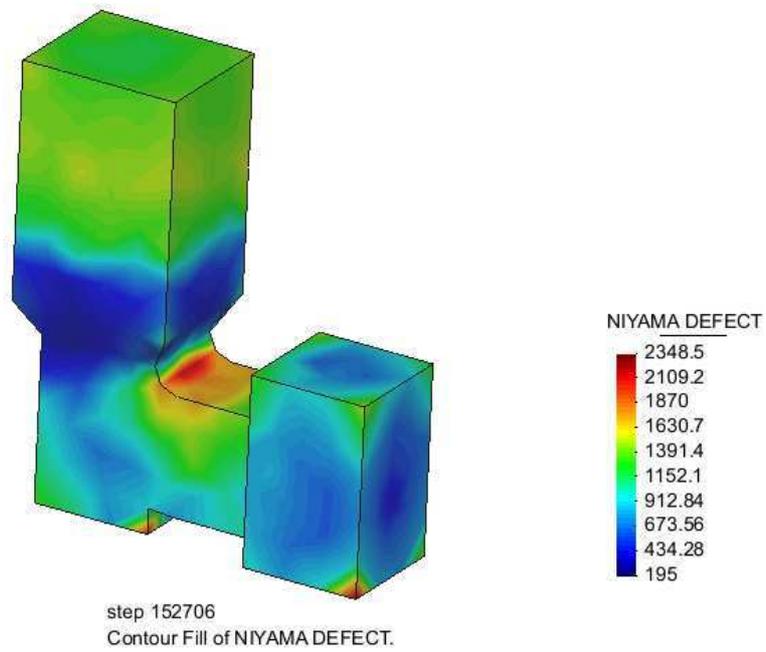


Figura 3.83 Resultado de Defecto Niyama

Desplazamientos:

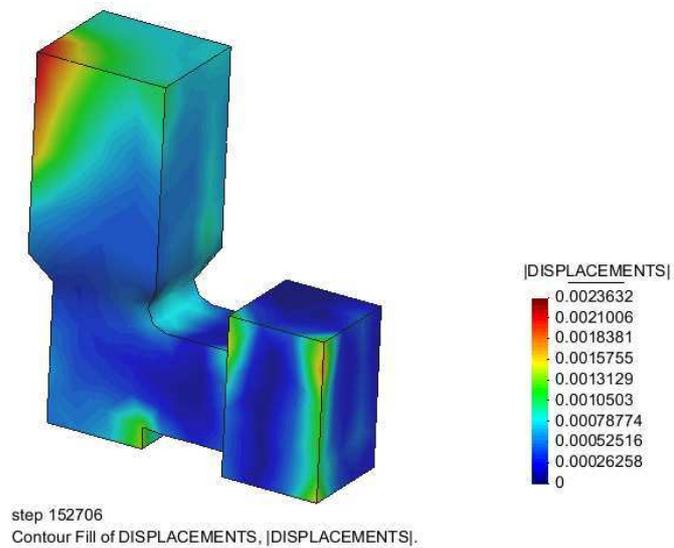


Figura 3.84 Resultados de los desplazamientos provocados en la etapa de solidificación.

Esfuerzos residuales:

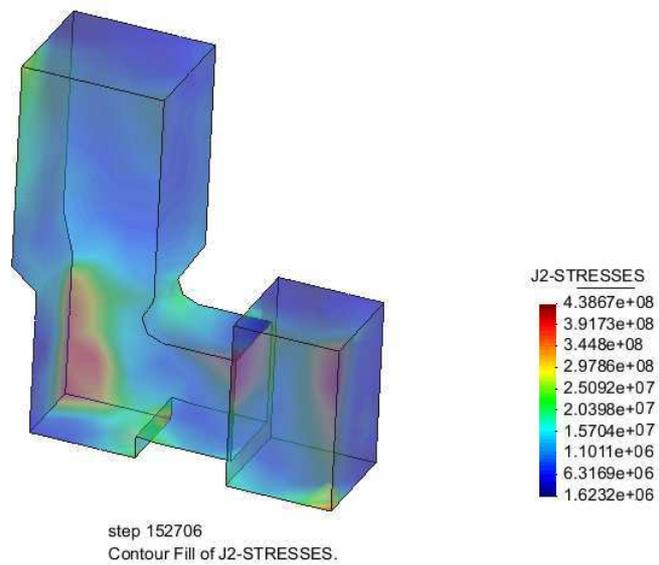


Figura 3.85 Resultados de los esfuerzos provocados en la etapa de solidificación.

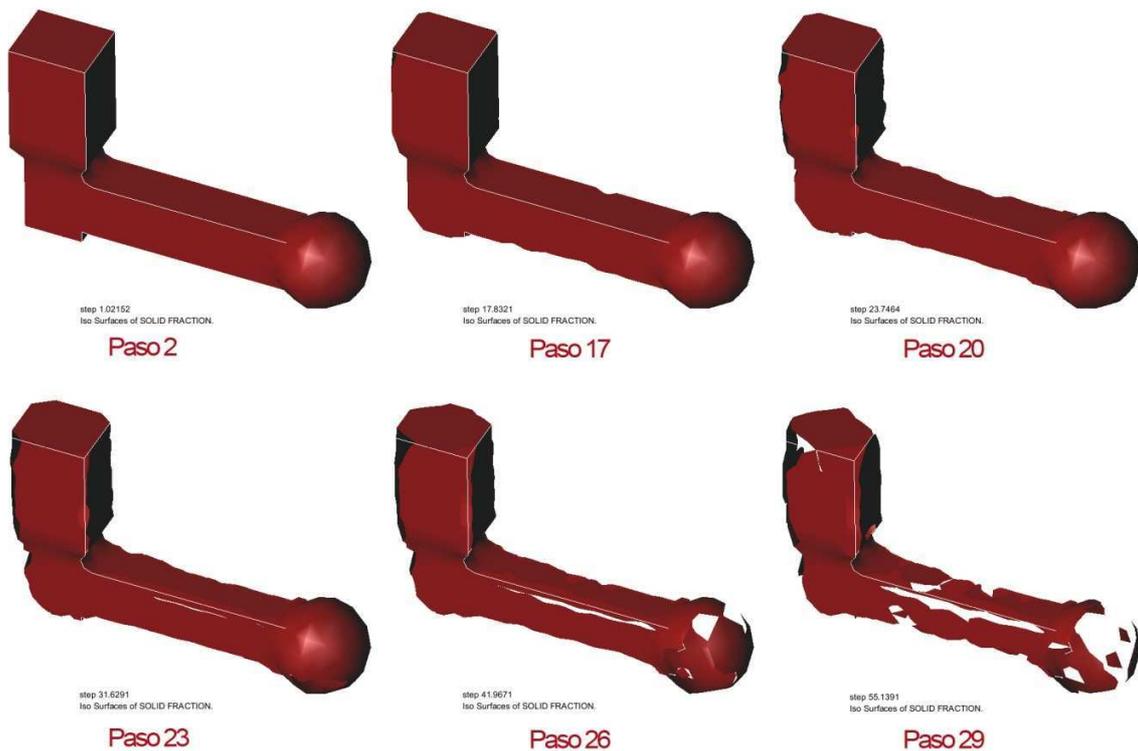
3.4.2 ESFERA

Al igual que para el prisma, el sistema de alimentación de la esfera será diseñado en base resultados de prueba y error hasta conseguir las dimensiones adecuadas para el volumen de la esfera.

3.4.2.1 Primer Molde

En esta primera simulación se desea determinar si las dimensiones del sistema de alimentación y mazarota permiten un correcto proceso de fracción sólida y gradiente de temperaturas. A diferencia del prisma, en este caso se tiene un volumen mucho mayor (Tabla 3-1), lo que implica que el sistema de alimentación tendrá que ser mucho más grande.

Fracción sólida:



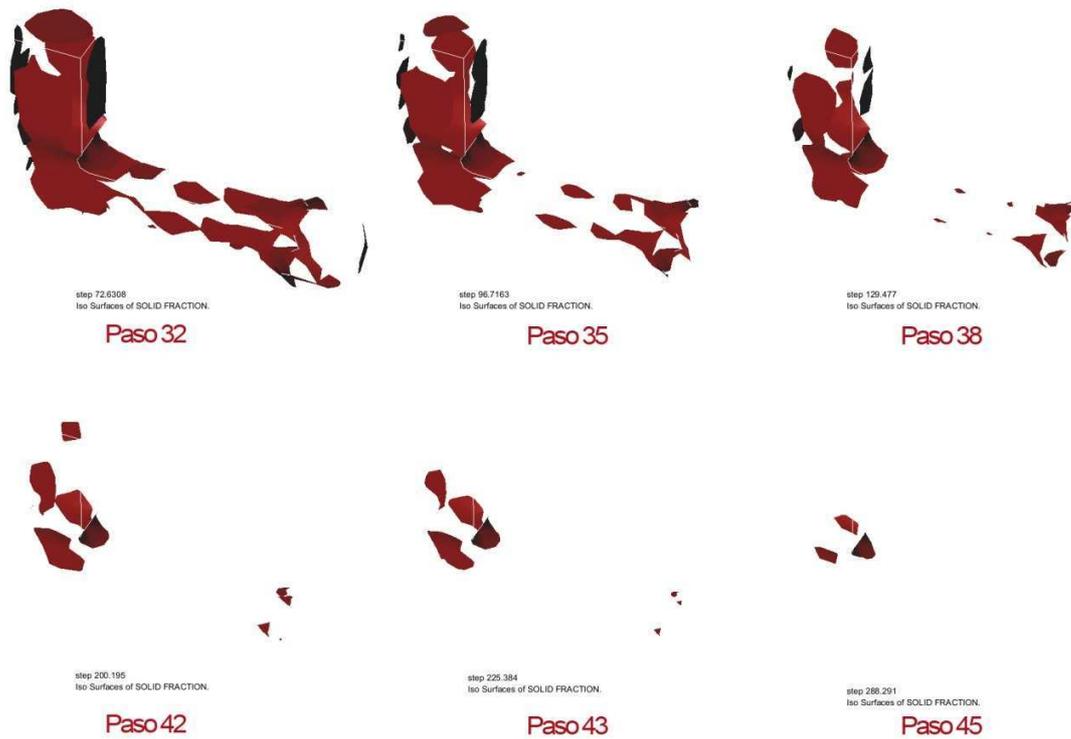


Figura 3.86 Resultados de la fracción sólida de solidificación. Modelo 1

El color rojo representa el material líquido durante el proceso de solidificación. En la evolución de la fracción sólida podemos observar que se obstruye el flujo de material por el canal de alimentación antes de tiempo, ya que aún hay bolsas de líquido en el interior de la pieza. Esto da lugar a la aparición de rechupes o distorsiones en el interior de la pieza debido a que la mazarota ya no puede aportar material para compensar la contracción del aluminio.

Evolución de temperaturas:

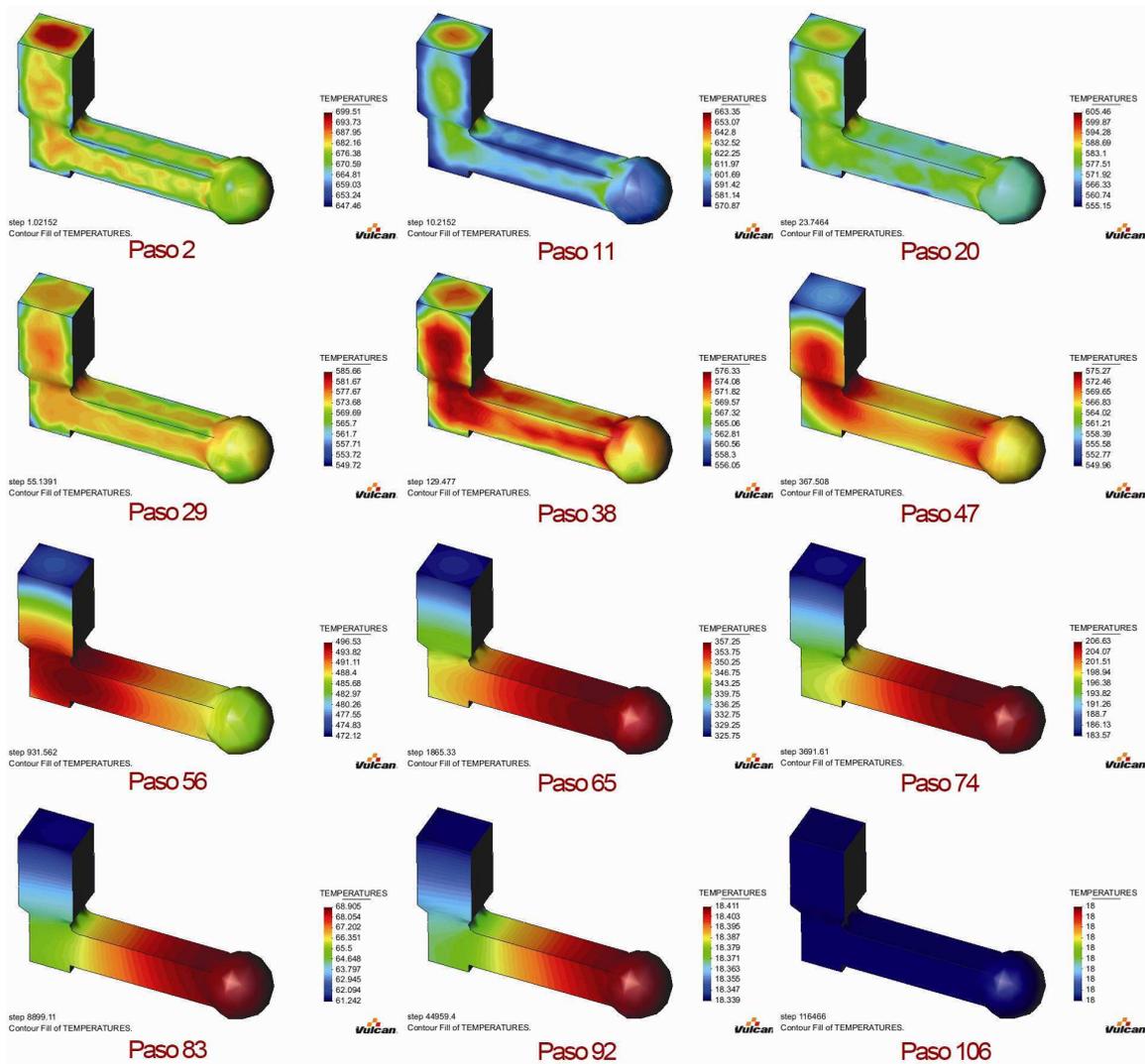


Figura 3.87 Resultados de la evolución de temperaturas en la etapa de solidificación. Modelo 1

Durante el enfriamiento, la evolución de la temperatura no es la adecuada ya que el canal de distribución solidifica antes que la pieza, impidiendo el aporte de material desde la mazarota.

CONCLUSION

La solidificación prematura del canal de alimentación nos indica que necesariamente se debe incrementar la sección de este.

3.4.2.2 SEGUNDO MOLDE

En esta segunda simulación se ha creado un canal de alimentación más amplio procurando eliminar el problema de solidificación temprana en el canal de alimentación.

Fracción sólida:



step 1.0001
Iso Surfaces of SOLID FRACTION
Paso 2



step 5.00051
Iso Surfaces of SOLID FRACTION
Paso 6



step 9.00091
Iso Surfaces of SOLID FRACTION
Paso 10



step 13.0013
Iso Surfaces of SOLID FRACTION
Paso 14



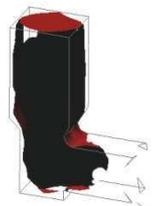
step 18.9144
Iso Surfaces of SOLID FRACTION
Paso 18



step 27.5355
Iso Surfaces of SOLID FRACTION
Paso 22



step 40.165
Iso Surfaces of SOLID FRACTION
Paso 26



step 57.1826
Iso Surfaces of SOLID FRACTION
Paso 30



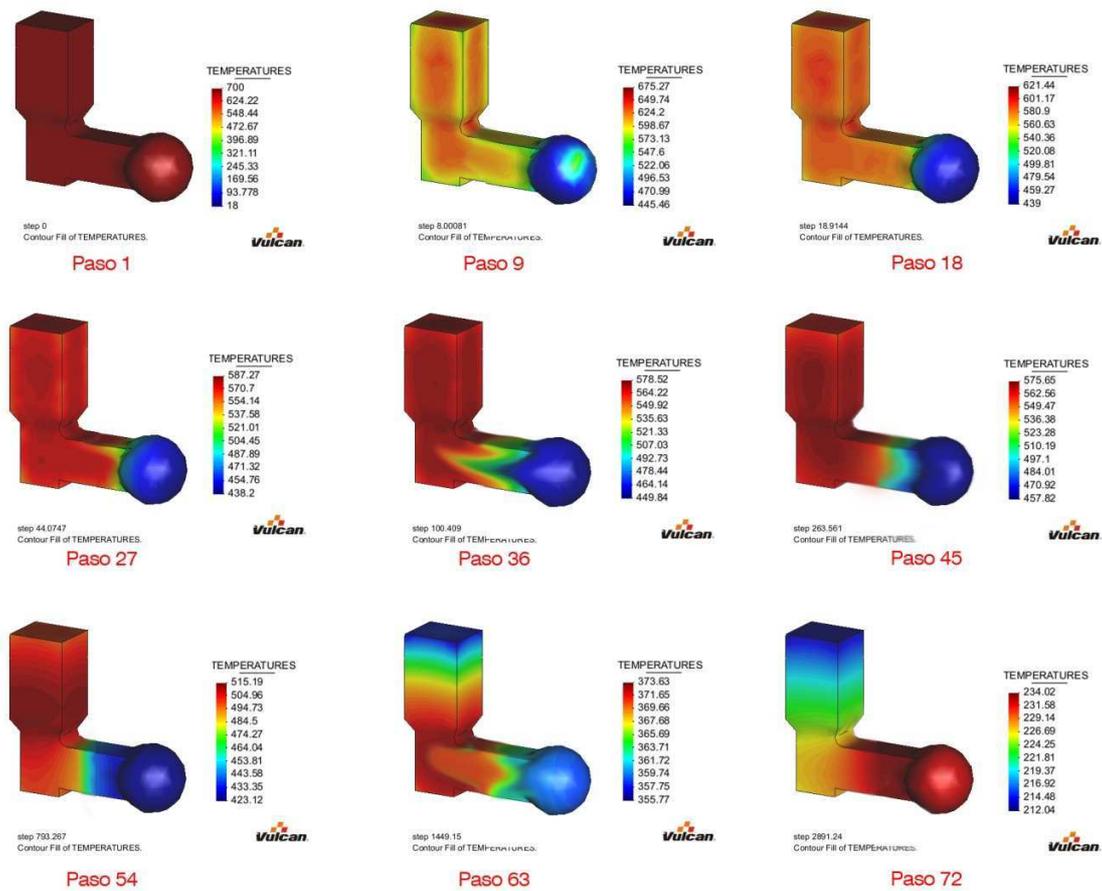
step 121.877
Iso Surfaces of SOLID FRACTION
Paso 38



Figura 3.88 Resultados de Fracción Sólida para la esfera hueca. Modelo 2

En el proceso de la evolución de la fracción sólida se puede observar que es correcto. En esta simulación la última parte en solidificar es la mazarota y por lo tanto, se contrae para evitar la aparición de rechupes en el interior de la pieza.

Evolución De Temperaturas:



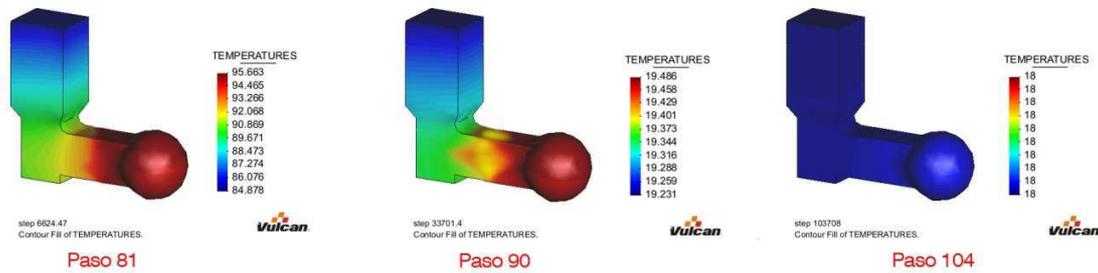
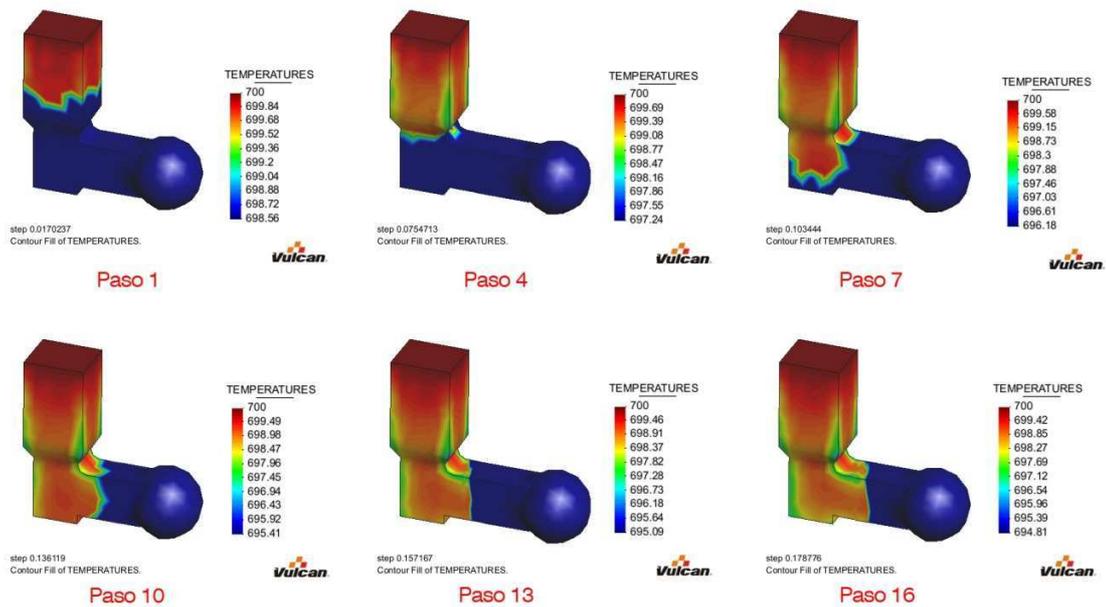


Figura 3.89 Resultados de evolución de temperatura en la etapa de solidificación. Modelo 2

En la etapa de solidificación las temperaturas si son las adecuadas ya que el canal de distribución y montante son los que solidifican último.

Ahora que se ha comprobado los dos procesos críticos de la solidificación se procede con los otros resultados.

Evolución de temperatura en la fase de llenado:



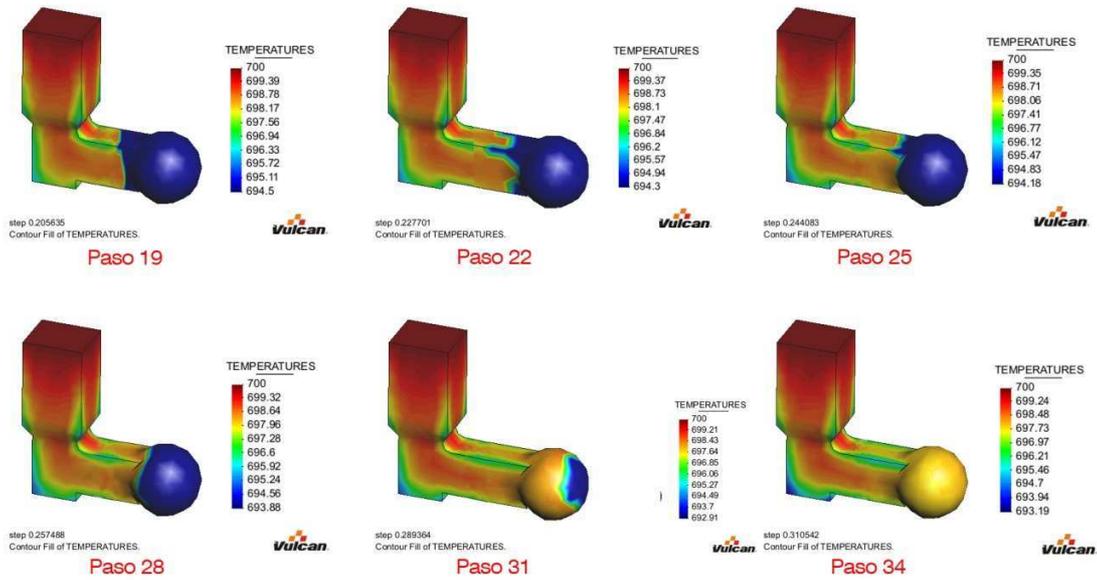
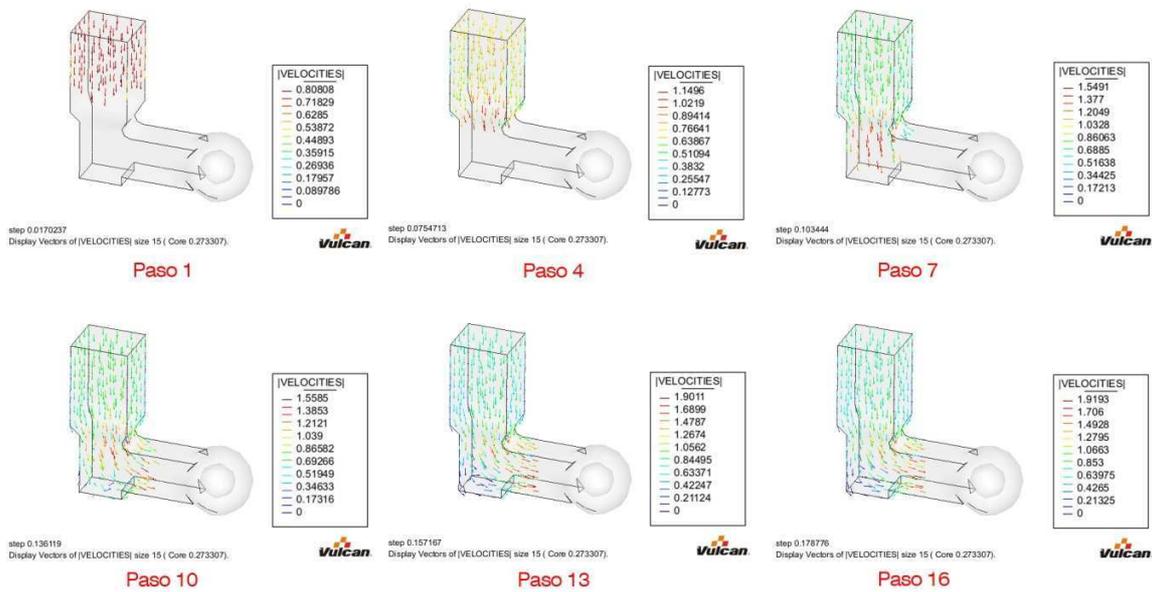


Figura 3.90 Resultados de Temperaturas en la etapa de llenado. Modelo 2

Velocidad de llenado:



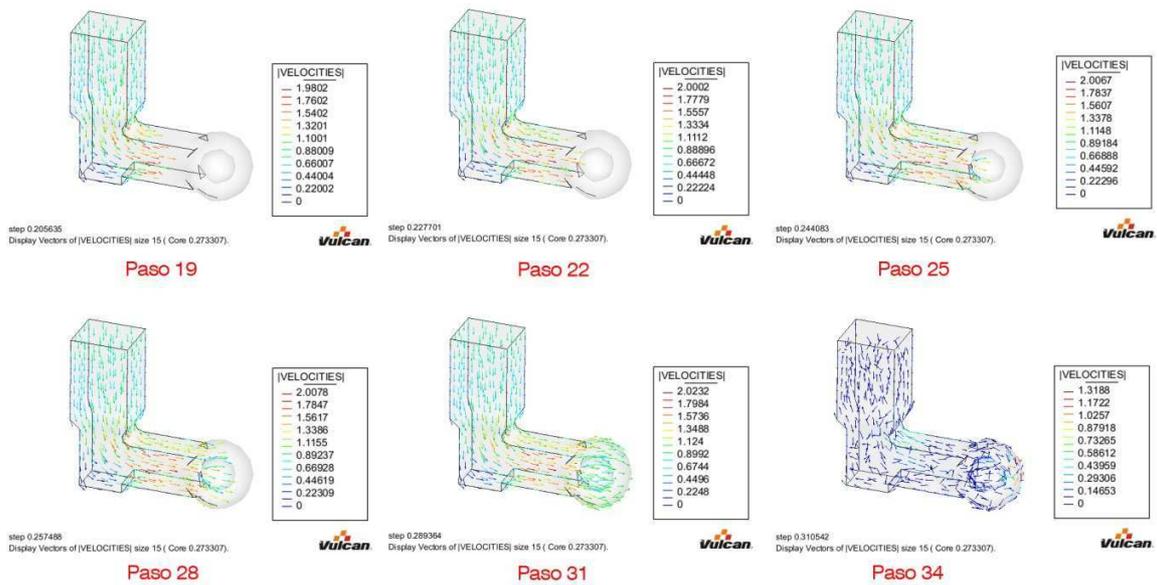


Figura 3.91 Resultados de la evolución de velocidades en la fase de ingreso

Ultima zona en llenar:

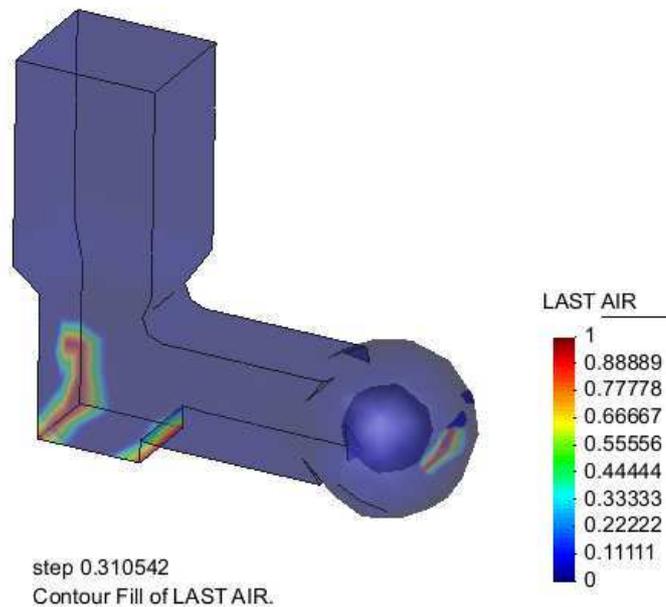


Figura 3.92 Resultado de las últimas zonas en llenarse.

Tiempo de llenado:

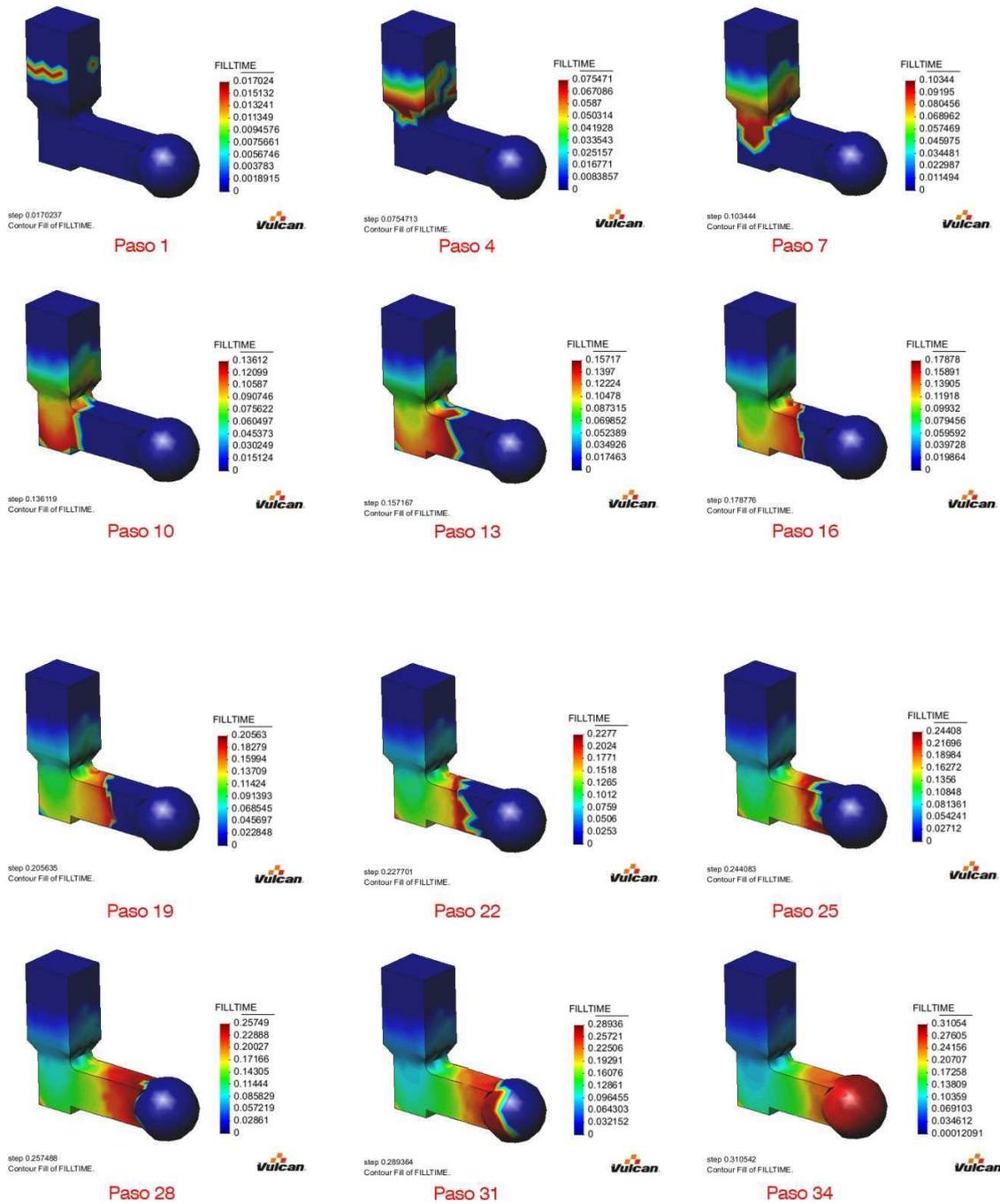
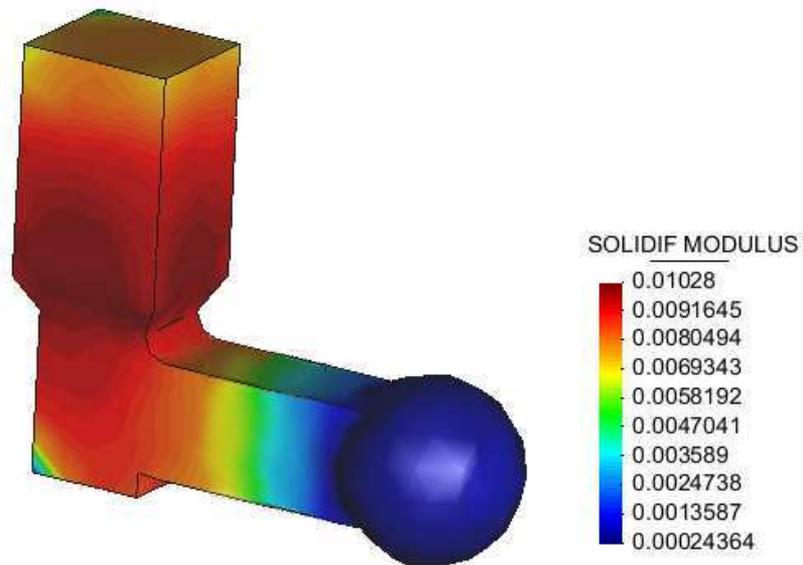


Figura 3.93 Resultados del tiempo de llenado. Modelo 2

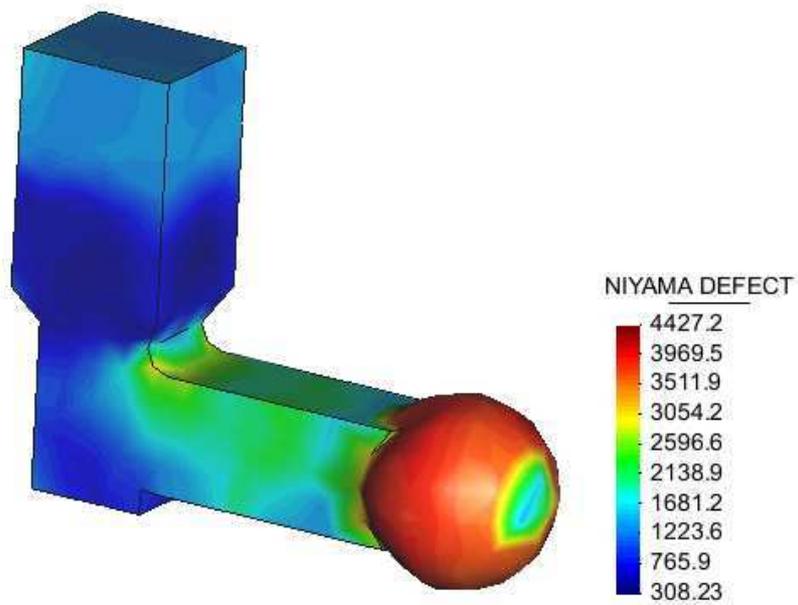
Modulo de solidificación:



step 233722
Contour Fill of SOLIDIF MODULUS.

Figura 3.94 Resultado del Modulo de Solidificación para la esfera.

Efecto Niyama:



step 233722
Contour Fill of NIYAMA DEFECT.

Figura 3.95 Resultados del Defecto Niyama.

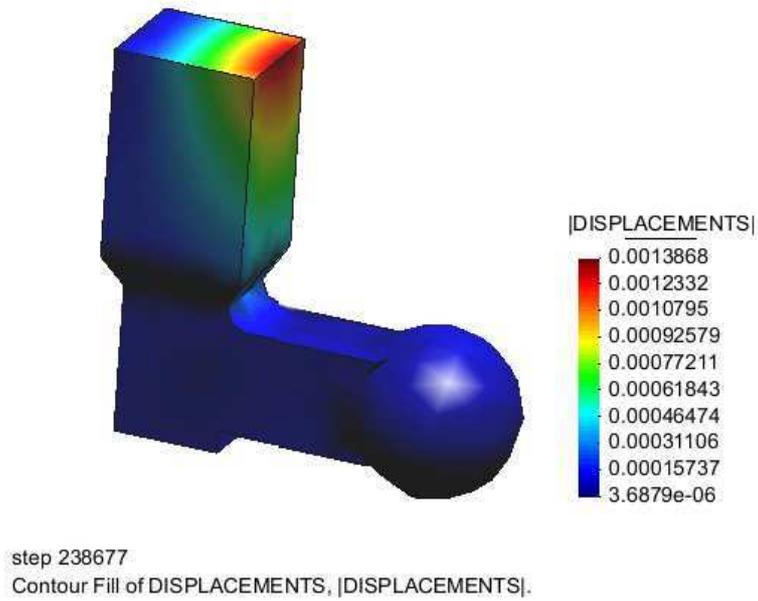
Desplazamientos:

Figura 3.96 Resultados de desplazamientos ocasionados en la etapa de enfriamiento

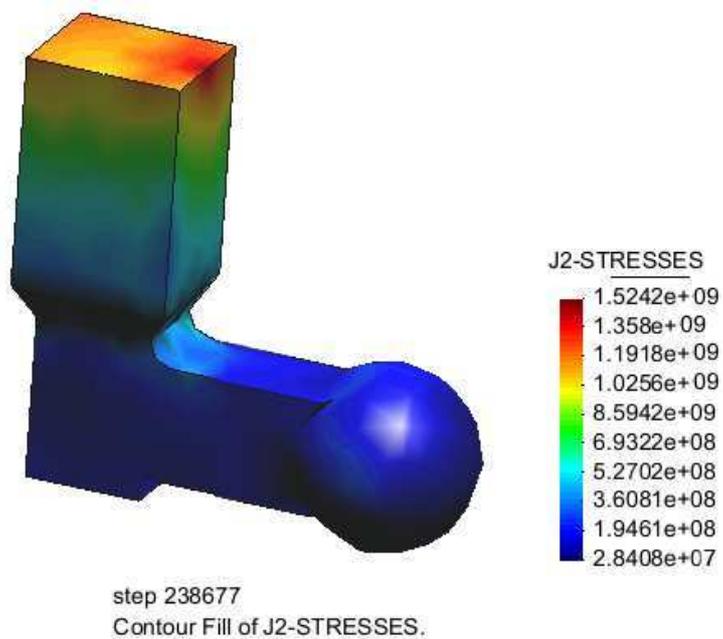
Esfuerzos residuales:

Figura 3.97 Resultados de los Esfuerzos Residuales ocasionados en la etapa de enfriamiento.

3.5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos con el software *Vulcan* se analizarán individualmente para cada pieza y de forma global para las tres geometrías.

3.5.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL CILINDRO

Los resultados que revelan si el diseño del sistema de alimentación y tamaño de mazarota es el adecuado son la fracción sólida y la evolución de temperaturas en la etapa de solidificación. Estos resultados presentan una idea clara de cómo se desarrollará la solidificación y los posibles lugares de rechupes y porosidades. Los resultados de fracción sólida (Figura 3.57) muestran que la solidificación de la pieza tiene el orden adecuado, es decir que la mazarota solidifica al final.

Los resultados de evolución de temperaturas en la etapa de llenado (Figura 3.42) muestran que la temperatura de la colada mínima alcanzada en el proceso de llenado es de 681.99°C. Lo cual indica que el material se comportará de manera correcta ya que aún se encuentra sobre la temperatura de fusión del aluminio.

Con los resultados de velocidad (Figura 3.45) se determina en que zonas se tendrá un comportamiento crítico. Es decir valores de velocidades elevadas que ocasionen erosión al interior del molde. La velocidad máxima se presenta en la zona del sistema de alimentación con un valor de 2.80 m/s, el cual no representa mayor problema para el molde diseñado. Si se desearía reducir el valor de la velocidad, se puede ampliar la sección del canal de alimentación. O simplemente disminuyendo la velocidad de llenado.

Los resultados de la última zona en llenar (Figura 3.45) muestran las zonas en donde deberían existir respiraderos con la finalidad de eliminar el aire atrapado en el molde, y el metal líquido pueda cubrir por completo las zonas en el molde. La mayor cantidad del aire atrapado se presenta en las zonas de la mazarota, lo cual no representa problema. Si sería el caso, la manera de solucionar este problema es creando respiraderos en estas zonas.

Los resultados del tiempo de solidificación (Figura 3.62) muestra que la zona que tomará mayor tiempo en solidificar es la mazarota con un tiempo de 457.03 s. Esto

indica que el diseño del sistema de alimentación y mazarota es correcto, ya que se tiene una progresión de solidificación correcta.

El resultado del defecto Niyama (Figura 3.64) en el modelo muestra las zonas en donde se tendrá mayor probabilidad de generarse defectos como gotas frías, microrechupes, porosidades etc. El valor máximo es de $2419.9^{\circ}\text{C.s/m}$ ubicado en la zona de mazarota y en áreas muy pequeñas. Lo cual no es de mayor consideración.

Los desplazamientos máximos (Figura 3.68) provocados a causa de la contracción del metal sólido tienen un valor máximo de 0.0025163m presentes parte de la pieza y en la mazarota. Este valor está dentro del rango de contracción volumétrica estipulado.

Los resultados de esfuerzos residuales (Figura 3.70) en la pieza indican un valor máximo de $4\,049\text{MPa}$ concentrado únicamente en la unión entre la mazarota y el sistema de alimentación. Sin embargo se tiene un valor de 93.6MPa para casi toda la geometría. De modo que los resultados obtenidos en este diseño son correctos ya que están muy por debajo del esfuerzo límite a la tensión del aluminio (160MPa).

El resultado de módulo de solidificación (Figura 3.59) cumple con la condición teórica de que el módulo de la mazarota sea al menos 20% mayor que el de la pieza. El módulo que se obtiene en el centro de la pieza es de 0.006061 y el módulo en la mazarota es de $0,0083631$ lo que representa a un 37,9%. Lo cual indica un correcto diseño de mazarota.

3.5.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL PRISMA

Para el caso del prisma se realizó dos simulaciones diferentes para poder obtener la geometría adecuada del sistema de alimentación y mazarota. Los resultados que determinan si el diseño de mazarota y sistema de alimentación es el adecuado son la fracción sólida (Figura 3.73) y la evolución de temperaturas

(Figura 3.74), ya que estos parámetros son determinantes en el resultado de la pieza fundida. Mediante los resultados de fracción sólida se puede conocer si el orden de solidificación es el correcto, es decir si lo primero en solidificar es la pieza principal, y lo último en solidificar es la mazarota. Con los resultados de evolución de temperatura se puede conocer que zonas serán las últimas en enfriarse y analizar los efectos que tendrán.

Con los resultados de velocidad obtenidos (Figura 3.75) se determina en qué zonas se tendrá un comportamiento crítico. Es decir velocidades excesivas que ocasionen erosión al interior del molde. La velocidad máxima se presenta en la zona del sistema de la mazarota con un valor de 4.02 m/s, el cual no presenta mayor problema para. Si fuese el caso y se desearía reducir el valor de la velocidad, se puede ampliar la sección del canal de alimentación o disminuir el la velocidad de llenado.

Los resultados de evolución de temperatura en la fase de llenado (Figura 3.76) ayuda a determinar que temperatura se tendrá mientras el metal fluye a través del molde. La temperatura que mínima que se desea tener es la que permita al metal líquido permanecer con la viscosidad y fluidez adecuada para alcanzar todas las zonas del molde. O simplemente la velocidad que permita permanecer al metal en estado líquido. La temperatura de llenado mínima que adquiere el metal líquido en este caso es de 696.27°C, este valor no representa mayor problema ya que a esta temperatura el metal aún se mantiene en estado líquido con buenas propiedades de fluidez.

Los resultados de la última zona en llenar (Figura 3.77) muestran las zonas en donde deberían existir canales de evacuación de aire o respiraderos con la finalidad que no exista aire atrapado, y el metal líquido pueda cubrir por completo el molde. En el molde se tiene tres zonas críticas que dos de ellas están dentro del molde. La manera de solucionar esto es creando respiraderos en estas zonas.

El resultado de módulo de solidificación (Figura 3.79) cumple con la condición teórica de que el módulo de la mazarota sea al menos 20% mayor que el de la

pieza. El modulo que se obtiene en el centro de la pieza es de 0.0074399 y el módulo en la zona de la mazarota es de 0,010463 lo que representa a un 40,6%.

El resultado del defecto Niyama (Figura 3.83) muestra las zonas en donde se tendrá mayor probabilidad de generarse defectos como gotas frías, microrechupes, porosidades etc. El valor máximo es de 2348.5 °C·s/m valor ubicado en la zona de unión entre la mazarota y el canal de alimentación.

El desplazamiento máximo (Figura 3.84) debido a la contracción del metal tiene un valor de 0.0023632m, ubicado en la zona de la mazarota. Este valor se lo considera aceptable por estar ubicado dentro de la mazarota y porque se encuentra dentro del rango de los valores aceptables de contracción volumétrica.

Los resultados de esfuerzos residuales obtenidos (Figura 3.85), muestran un valor máximo de 438,67MPa concentrado en su mayoría en la zona de la mazarota y el sistema de alimentación. Sin embargo los valores que se tiene en la zona interna tienen un valor de 1.6MPa, valor que está muy por debajo del esfuerzo máximo a la tensión.

3.5.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA ESFERA

Al igual que para el análisis de las dos geometrías anteriores, los resultados que determinan si el diseño es el adecuado son la fracción sólida y la evolución de temperaturas. En la primera simulación (Figura 3.86) se puede observar cómo se solidifica primero el canal de alimentación, esto hace que se la pieza principal posea una gran cantidad de rechupes y distorsiones. Para solucionar este problema se cambia la geometría de la esfera por una esfera hueca, con la finalidad de reducir el volumen de la geometría y evitar que el sistema de alimentación sea demasiado robusto. En la Figura 3.86 se puede observar los resultados de la correcta evolución de solidificación en la esfera hueca.

En la figura 3.89 se observa cómo evoluciona la temperatura en la etapa de solidificación. Iniciando el enfriamiento desde la esfera hasta terminar en la mazarota. Lo que indica un correcto enfriamiento.

Los resultados de evolución de temperatura en la fase de llenado (Figura 3.90) muestra que la temperatura mínima alcanzada por el metal al verterlo en el molde es de a la cual fluirá el material dentro del molde es de 693.19°C . El metal líquido a esta temperatura tiene un comportamiento adecuado, debido a que todavía se encuentra dentro de los valores en el cual el aluminio conserva sus propiedades de fluidez y viscosidad.

Los resultados de velocidad de llenado (Figura 3.91) obtenidos nos indican que la zona crítica del molde en donde puede existir erosión es en la zona del sistema de alimentación en donde se tiene una velocidad máxima de 2.0067 m/s . Si se desearía reducir la velocidad, se puede ampliar la sección del canal de alimentación.

Los resultados de la última zona en llenar (Figura 3.92) indican que las zonas en donde deberían existir canales de evacuación de aire o respiraderos para eliminar el aire atrapado es en la esfera y la mazarota.

El resultado de módulo de solidificación (Figura 3.94) cumple con la condición teórica de que el módulo de la mazarota sea al menos 20% mayor que el de la pieza. El modulo que se obtiene en el centro de la pieza es de 0.00024364 y el modulo en la mazarota es de $0,01028$. Este valor representa mucho más que el 20% por lo que es correcto, pero es recomendable reducir de tamaño de la mazarota y sistema de alimentación para ahorrar material en la fundición. Debido a que con estas dimensiones el programa presenta resultados demasiado elevados

El resultado del defecto Niyama (Figura 3.95) en el modelo muestra las zonas en donde se tendrá mayor probabilidad de generarse defectos como gotas frías, microrechupes, porosidades etc. El valor máximo es de $4427.2^{\circ}\text{C}\cdot\text{s/m}$. Desafortunadamente este valor se encuentra localizado en la esfera. Para solucionar este problema se debería ubicar la mazarota en otra posición evitando que se genere un frente de líquido en la pieza deseada.

El desplazamiento (Figura 3.96) máximo debido a la contracción del metal tiene un valor de 0.0013868m. Este valor es tolerable al trabajar con aluminio, el motivo del tamaño de la pieza con el que se está trabajando. Afortunadamente este valor se encuentra localizado en la zona de la mazarota. Por lo que se considera aceptables estos valores.

Los resultados de esfuerzos residuales obtenidos, muestran un valor máximo de 1524MPa ubicado únicamente en la mazarota.

3.5.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS GLOBAL

En este análisis se tomara en cuenta únicamente los valores extremos para cada opción de resultados.

Tabla 3-2 Resumen de resultados obtenidos para cada una de las geometrías.

	CILINDRO		PRISMA		ESFERA	
	Max	Min	Max	Min	Max	Min
Gradiente de temperaturas en el llenado (°C)	688,00	682,92	700,0	695,27	700,00	693,19
Módulo de solidificación	0,009026	0,001748	0,010463	0,0013929	0,010280	0,000243
Defecto Niyama (°C.s/m)	2419,9	138,51	2348,50	195,00	4427,20	308,23
Tiempo de llenado (min)	0,20851		0,23911		0,31054	
Velocidad máx. de llenado (m/s)	23,98		4,028		1,31	
Tiempo de Solidificación (min)	457,03		744,02		574,07	
Desplazamiento máx (m)	0,0025		0,00236		0,00138	
Esfuerzos residuales (MPa)	4049,00	93,60	438,67	1,62	1524,20	28,40

Al realizar una comparación entre las tres simulaciones podemos ver que los resultados muestran la tendencia creciente en base al volumen de cada una de las piezas. Como se indica en la tabla 3-1 el modelo con menor volumen es el cilindro y el de mayor volumen corresponde a la esfera. De manera que en la mayoría de resultados se tiene la misma tendencia de orden creciente.

CAPITULO 4

FUNDICION DE ELEMENTOS SIMULADOS

En este capítulo se describe el proceso de fundición realizado para los tres elementos establecidos y se analiza el metal metalográficamente para cada una de las piezas fundidas para evaluar la presencia de rechupes, micro rechupes, porosidades, contracciones e imperfecciones en general, con el objeto de corroborar los resultados obtenidos en la simulación.

4.1 ETAPA DE MOLDEO

La etapa de moldeo es una de las más importantes en el proceso de producción de piezas fundidas en arena, que va desde la preparación de la arena hasta el armado del molde, por lo que se debe tener especial cuidado en su elaboración. El moldeo realizado es de tipo manual y en cajas debido a que la geometría de las piezas no es muy complicada y no requiere de mayor elaboración.

4.1.1 MATERIALES DE MOLDEO

Los materiales utilizados en la fase del moldeo son los siguientes:

- Arena base (sílice)
- Aglutinante (bentonita)
- Agua

4.1.2 HERRAMIENTAS DE MOLDEO

Para un elaborar un buen moldeo es necesario disponer de las herramientas básicas que ayuden a elaborar un buen molde. Las herramientas que se utilizaron se detallan a continuación:

- Cajas de moldeo
- Tamices
- Palas

- Agujas de ventilar
- Paletas de alisar
- Espátulas
- Puntas o extractor de modelos
- Apisonador

4.1.3 PROCEDIMIENTO

La etapa de moldeo se la realiza en dos partes, se inicia con la parte inferior del modelo y posteriormente con la parte superior.

- Mezclar la arena junto con la bentonita y agua.
- Tamizar la arena para moldeo.
- Recubrir los modelos de madera con grafito para facilitar la extracción de los moldes.
- Seleccionar la caja de moldeo adecuada según el tamaño de la pieza y ubicar los modelos dentro de esta para iniciar el moldeo con la caja inferior (Figura 4.1).
- Verter poco a poco la arena preparada sobre los modelos dentro de la caja y apisonar suavemente.
- Llenar completamente la caja con arena y apisonar uniformemente la arena.

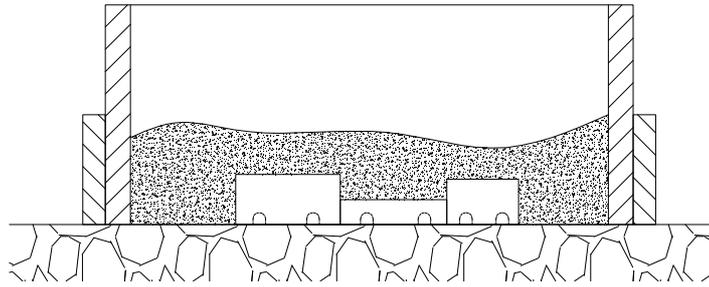


Figura 4.1 Moldeo de la parte inferior del modelo

- Picar la arena compactada creando respiraderos para ayudar a evacuar los gases y vapores generados.
- Girar la caja 180 grados y esparcir arena sílice sobre la superficie de arena moldeada, esto evita que se adhiera la arena entre las dos cajas y facilita la separación.
- Ubicar la segunda mitad de los modelos sobre los primeros para iniciar el moldeo en la caja superior. (Figura 4.2).

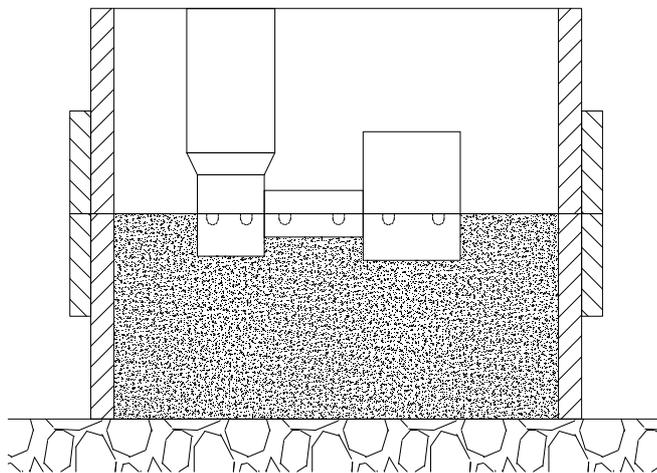


Figura 4.2 Moldeo de la parte superior del modelo

- Verter poco a poco la arena de moldeo sobre los modelos y apisonar uniformemente.
- Llenar completamente a la caja superior con arena y apisonar fuertemente

- Picar la arena para crear respiraderos y ayudar a la extracción de gases
- Separar las cajas para extraer los modelos.
- Rociar el molde con melaza para obtener un mejor acabado superficial en la pieza.
- Flamear la arena para eliminar la humedad de la arena en el molde.(Figura 4.3)
- Cerrar las cajas de moldeo y preparar la colada para verter el material.



Figura 4.3 Eliminación de humedad del molde



Figura 4.4 Molde superior para el prisma y el cilindro



Figura 4.5 Molde inferior para el prisma y l cilindro

4.2 ETAPA DE COLADO

La etapa de colado es en donde finalmente se obtiene los elementos moldeados y en donde se concentran la mayoría de parámetros que se estableció para la simulación y de los cuales dependerán los resultados obtenidos.

4.2.1 PROCEDIMIENTO

El proceso tecnológico de fundición realizado para la fusión y colado del material es el siguiente.

- Encender el horno durante unos 10 minutos para precalentarlo juntamente con el crisol.
- Precalentar las cargas de aluminio en la chimenea del horno
- Ingresar poco a poco el aluminio hasta completar 5 Kg.
- Agregar el fundente de limpieza y desgasificado a la colada para extraer la escoria.
- Colar el metal líquido dentro de los moldes previamente preparados. (Figura 4.6)



Figura 4.6 Colado del metal fundido

4.3 ANÁLISIS DE LAS PIEZAS OBTENIDAS

El análisis de las piezas obtenidas comprende la verificación de dimensiones, rechupes, porosidades y microrechupes con la finalidad de corroborar los resultados obtenidos en Vulcan

4.3.1 ANÁLISIS DIMENSIONAL

El análisis dimensional, se lo realiza comparando las dimensiones iniciales (Figura 4.7) del modelo con las dimensiones finales de la pieza obtenida. En la tabla 4.1 se detalla las dimensiones inicial, final y su diferencia para las dimensiones detalladas en la figura 4.7.

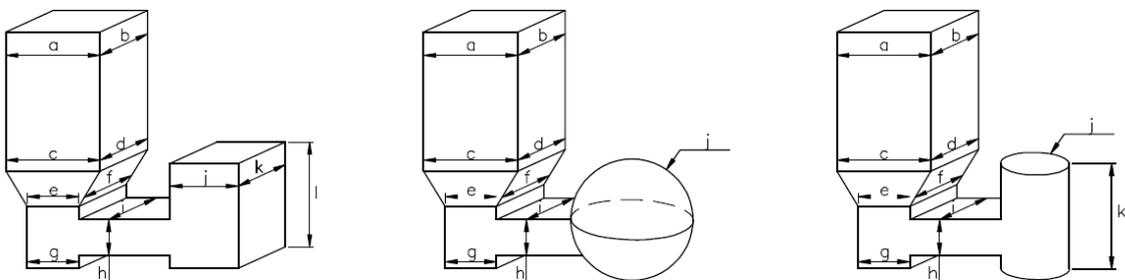


Figura 4.7 Esquema de la geometría de las piezas con sus dimensiones

Tabla 4-1 Análisis dimensional de las piezas obtenidas

	Cilindro [mm]			Prisma [mm]			Esfera [mm]		
	Inicial	Final	Diferencia	Inicial	Final	Diferencia	Inicial	Final	Diferencia
a	51,25	51,00	0,25	70,25	69,00	1,25	51,25	50,00	1,25
b	52,30	52,00	0,30	60,75	60,00	0,75	52,30	51,00	1,30
c	48,40	48,05	0,35	68,70	68,00	0,70	48,40	48,00	0,40
d	48,80	48,15	0,65	60,00	58,00	2,00	48,80	47,00	1,80
e	36,00	35,75	0,25	44,30	44,00	0,30	36,00	36,00	0,00
f	36,00	36,00	0,00	38,70	39,00	0,70	36,00	36,00	0,00
g	31,55	31,00	0,55	35,50	35,00	0,50	31,55	31,00	0,55
h	34,05	34,00	0,05	50,10	50,00	0,10	34,05	34,00	0,05
i	33,55	33,00	0,55	37,35	37,00	0,35	33,55	33,00	0,55
j	38,15	38,00	0,15	48,65	47,00	1,65	80,00	79,70	0,30
k	83,50	83,00	0,50	49,55	49,00	0,55	x	x	x
l	x	x	x	84,30	84,00	0,30	x	x	x



Figura 4.8 Cilindro obtenido de la fundición



Figura 4.9 Prisma obtenido de la fundición



Figura 4.10 Esfera obtenida de la fundición

4.3.2 ANÁLISIS METALGRÁFICO

El análisis metalográfico comprende la evaluación cuantitativa y dimensional de la presencia de porosidades y microrechupes. Esta evaluación va destinada a una

zona interna de la mazarota y a otra de la pieza. Con la finalidad de comprobar los resultados obtenidos en Vulcan.

En las figuras se detalla la pieza en corte transversal detallando la zona de donde se extrajo la muestra para evaluar. La zona a analizar tiene un área de 1cm^2 , la cual nos servirá para comparar



Figura 4.11 Identificación de las muestras en la sección transversal del sistema mazarota-cilindro.

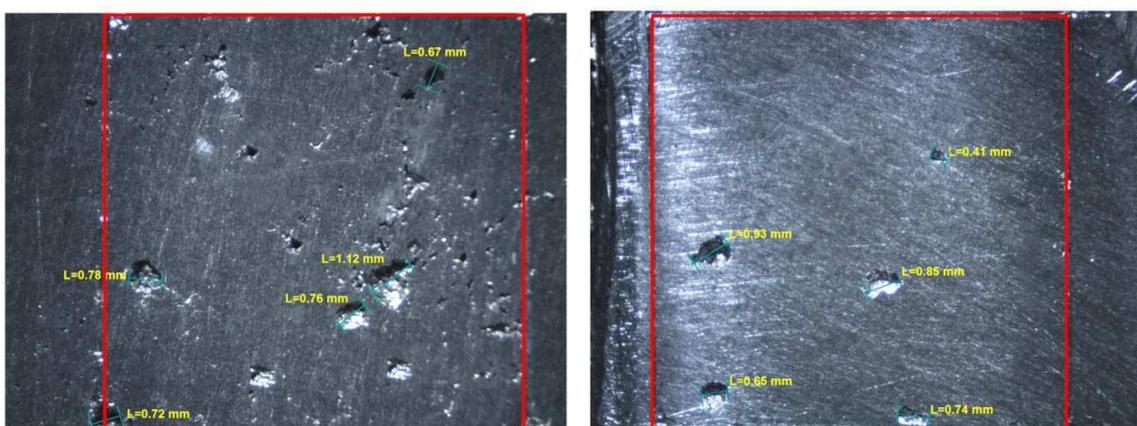


Figura 4.12 Micrografía (10x) de identificación y dimensiones de porosidades y microrechupes para el cilindro en un área de 1cm^2 . (Muestra C1 izquierda y muestra C2 derecha)



Figura 4.13 Identificación de la muestras en la sección transversal del sistema mazarota-esfera.

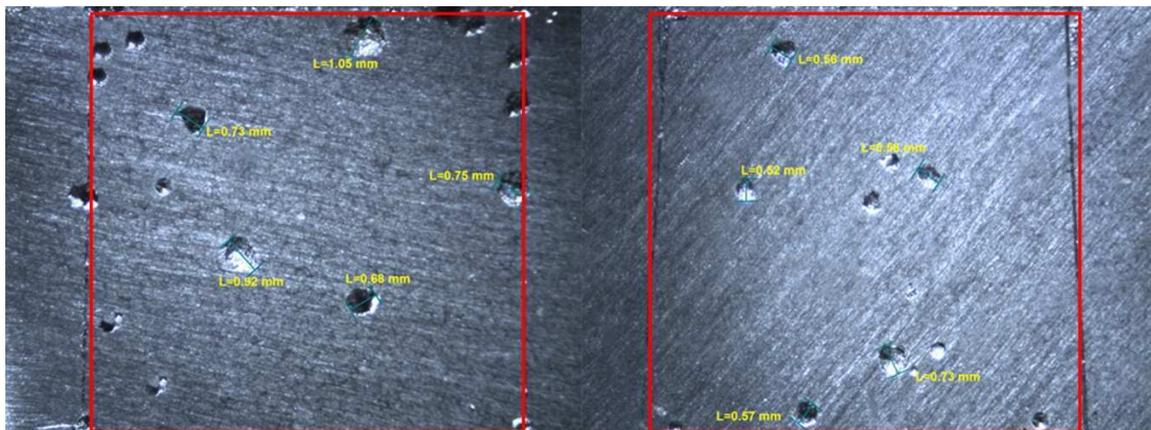


Figura 4.14 Micrografía (10x) de identificación y dimensiones de porosidades y microrechupes para la esfera en un área de 1 cm^2 . (Muestra E1 izquierda y muestra E2 derecha)



Figura 4.15 Identificación de la muestras en la sección transversal del sistema mazarota-prisma.

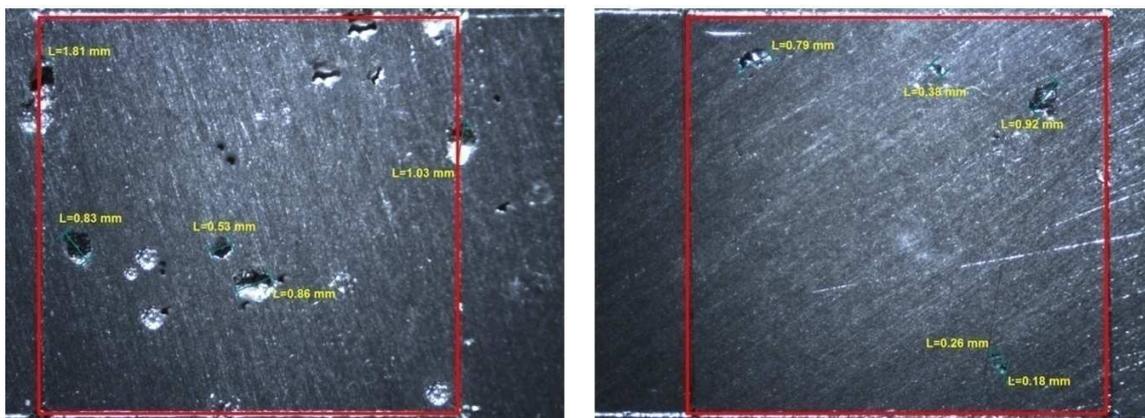


Figura 4.16 Micrografía (10x) de identificación y dimensiones de porosidades y microrechupes para el prisma en un área de 1cm^2 . (Muestra P1 izquierda y muestra P2 Derecha)

Tabla 4-2 Resultados de tamaño y cantidad de poros y microrechupes en el interior de las piezas

Especimen		# Poros y Microrechupes sobre cm ²	Tamaño promedio de poros (mm)	Observaciones
Cilindro	Mazarota	14	0,81	El tamaño promedio de poros es mayor en la zona de la mazarota que en la pieza en un 12,5%. Al igual que el número de poros es mayor en la mazarota en casi el triple. <i>Figura 4.12</i>
	Pieza	5	0,72	
Esfera	Mazarota	16	0,83	El tamaño promedio de poros y microrechupes es mayor en la zona de la mazarota que en la pieza en un 38,3%. Al igual que el número de microrechupes es mayor en la en casi el doble. <i>Figura 4.14</i>
	Pieza	9	0,60	
Prisma	Mazarota	16	1,01	El tamaño promedio de poros es mayor en la zona de la mazarota que en la pieza en un 98%. El número de microrechupes es mayor en la mazarota en el cuádruplo. <i>Figura 4.16</i>
	Pieza	4	0,51	

Se observa que el tamaño promedio de poros y microrechupes en la mazarota para cada uno de los elementos es mayor que en la pieza. De manera que esto corrobora los resultados obtenidos en cada una de las simulaciones. A pesar que existan poros y microrechupes en cantidades considerables, el diseño presentado por Vulcan nos da una mejoría en los resultados de la pieza. No con la precisión que se quisiera debido a que eso es parte de la dificultad en igualar las propiedades y parámetros teóricos con los prácticos. Siendo muy importante controlar las propiedades de la aleación y las condiciones de la mezcla de moldeo para obtener los resultados más cercanos a lo que presenta la simulación.

CAPITULO 5

CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y

BIBLIOGRAFIA

5.1 CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en Vulcan pueden ser analizados siempre y cuando se mantenga constante tres parámetros importantes, la composición de la arena, temperatura y composición de colado, y las condiciones de entrada del material.

Los resultados obtenidos en el análisis de los elementos fundidos difieren con los resultados obtenidos en la simulación de Vulcan en un error aproximado de 25% . Este error es aceptable debido a que variables como la composición de la aleación, composición de la arena de moldeo y la velocidad de vertidcolado difieren de las condiciones reales al momento de fundir. Aun así, es posible decir que los resultados en la simulación son direccionados a una realidad del proceso práctico.

Las simulaciones representan un ahorro en el costo de ingeniería y el tiempo de diseño del producto al ofrecer una disminución en la realización de pruebas de certificación de calidad (radiografía, partículas magnéticas, metalografías) y en la construcción de prototipos para la evaluación experimental, así como la facilidad de implementar y evaluar los cambios de ingeniería.

El análisis por el método de los elementos finitos del fenómeno de solidificación permite obtener la información necesaria para explorar diversas posibilidades en el diseño del sistema de alimentación y la ubicación de mazarotas.

Mediante el análisis de los resultados de la solidificación de la pieza dentro del molde se puede conocer las distribuciones de temperatura, tiempo de

solidificación y gradientes térmicos que constituyen el punto de partida para mejorar el diseño.

El programa de simulación Vulcan da una idea clara y bastante aproximada a los resultados prácticos. Estos resultados dependen de la precisión de parámetros y propiedades designados en la fase de definición de componentes.

Para obtener una mejor calidad de resultados con mayor fidelidad y más cercanos a la realidad, es necesario realizar una malla más fina. Este hecho se muestra como limitante ya que implica trabajar sobre un ordenador de mejor rendimiento para no tener problemas.

El diseño mecánico asistido por computador utilizando Vulcan permite realizar un análisis con la suficiente aproximación a los resultados, logrando optimizar tiempo, dinero y materiales, en la fundición experimental hasta obtener el resultado correcto.

Mediante la ayuda de Vulcan es posible realizar un diseño rápido y confiable, aplicable al trabajo de la industria, y como una gran herramienta en la educación facilitando un aprendizaje con una enseñanza fácil y dinámica.

5.2 RECOMENDACIONES

Es muy importante verificar que las condiciones del tipo de aleación y la mezcla de moldeo sean lo más similares a las que se definieron como parámetros en el preproceso de simulación en Vulcan, y así poder realizar un análisis comparativo con mayor precisión.

Se recomienda que los resultados obtenidos en la simulación se verifiquen bajo los criterios adquiridos con experiencia en fundición. De esta manera se direccionará el diseño en *Vulcan* hacia los resultados que estén relacionados tanto en la parte teórica como la práctica.

Se recomienda realizar las simulaciones sobre un equipo lo suficientemente equipado en memoria RAM y capacidad de procesamiento rápido para agilizar y facilitar la simulación.

5.2.1 BIBLIOGRAFÍA

- (1) CAPELO Eduardo.; “Tecnología de Fundición”; Editorial Gustavo Gill; Tercera Edición
- (2) GOYOS, Leonardo; “Tecnología de Fundición II” Tomo II; ISPJAE
- (3) TITOV, Stepanov; “Tecnología de los proceso de fundición” , Editorial Mir, 1981.
- (4) AMERICAN SOCIETY; “Metals Handbook Vol15”; Casting, Metals Park; 1978.
- (5) VULCAN; “Manual Del Usuario”; Versión 9.0.5
- (6) FLEMINGS,MERTON C.; “Solidification Processing”; New York; McGraw-Hill 1974
- (7) HUTTON, DAVID V; “Fundamentals of Finite Element Analysis”, Boston; 2004
- (8) AMERICAN FOUNDRYMEN’S SOCIETY; “Casting Defects Handbook2; 1972
- (9) HUEBNER, KENNETH H.; “The Finite Element Method for Engineers”; New York;1975

ANEXOS

ANEXO A1: TUTORIAL PARA LA CREACION DE
UN ELEMENTO MECANICO

ANEXO A2: TUTORIAL PARA LA CREACION DE
UNA TUBERIA DE ENFRIAMIENTO

ANEXO A1

TUTORIAL PARA LA CREACION DE UN ELEMENTO MECANICO

En este tutorial se aprenderá a utilizar algunas herramientas básicas para el dibujo en 2D, 3D y a realizar una de las diferentes formas de mallado. Realizaremos dos partes mecánicas una rueda dentada y un eje con perfil octagonal (Fig. 1)

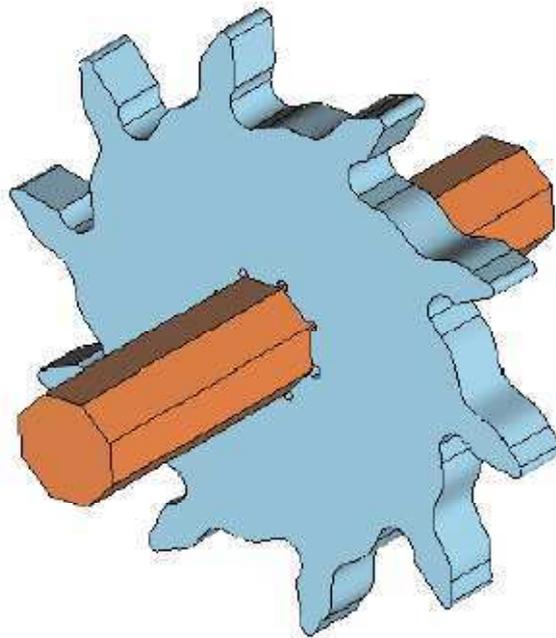


Fig. 1 Rueda dentada y eje de perfil octogonal

1. Creación de capas

Empezaremos estableciendo dos capas o layers que nos permitirán crear la forma final de nuestro elemento mecánico. Las capas son de gran ayuda para el dibujo y organización de nuestros elementos. Para crear una nueva capa hacemos lo siguiente:

1. Abrimos la ventana de capas (Fig. 1). En la barra de menú damos Click en *Utilities / Layers*. También podemos usar el teclado presionando las teclas *Ctrl+L*

2. Damos click en el botón *New* y se crea una nueva capa que por defecto se nombra como Layer 1. Le cambiaremos de nombre haciendo click en el botón *Rename* y la nombramos como “perfil”. De la misma manera cambiamos el nombre del Layer0 como “auxiliar”
3. Escogemos la capa “auxiliar” como predeterminada. Para hacer esto hacemos click en la capa “auxiliar” y luego click en el botón *Layer to Use*. (Al hacer esto, junto a este botón aparecerá el nombre de la capa activada). Desde ahora todos los objetos dibujados pertenecerán a esta capa.

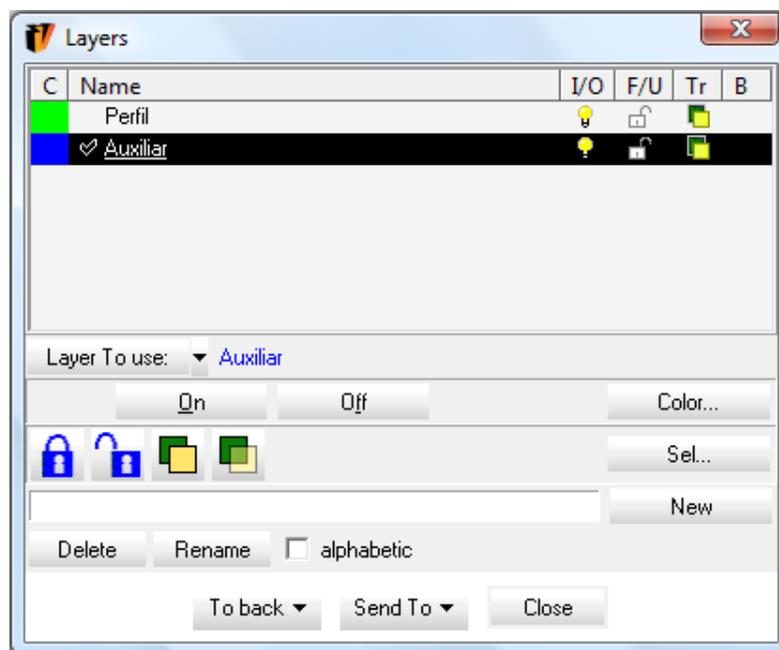


Fig. 2 Ventana de Capas

2. CREACIÓN DEL PERFIL

En nuestro caso, el perfil consta de varios dientes. Empezamos por dibujar uno de estos dientes, el cual posteriormente lo copiaremos para completar el perfil.

2.1. Creación de una línea auxiliar de 55 mm de longitud

1. Para dibujar una línea utilizamos la herramienta line. Click en: *Geometry / Create / Line*; o mediante el botón  ubicado en la barra de herramientas

2. Ingresamos las coordenadas de los puntos inicial y final. Para este caso las daremos (0,0) y (55,0) respectivamente.
3. Presionamos en el teclado *ESC* para indicar que el proceso ha terminado.

A demás de haber creado una línea recta, esta operación implica la creación de dos puntos, al inicio y final de la línea. Si la línea dibujada no aparece en la pantalla, usamos la opción *Zoom Frame* , la cual la encontramos en la barra de herramientas o en el menú contextual  del mouse: *Click derecho en cualquier lugar de la pantalla / Zoom / Frame*



Fig.3 Línea recta de coordenada (0,0) y (55,0)

2.1. División de la línea auxiliar en el punto de coordenadas (40,0)

1. Click en *Geometry / Edit / Divide / Near Point / Ingresamos la coordenada (40,0)* Esta opción dividirá la línea en el punto con las coordenadas ingresadas.
2. Nótese que el puntero del mouse se muestra como una cruz. Ahora debemos seleccionamos la línea que dividiremos haciendo click sobre ella.
3. Presionar *ESC* para indicar que el proceso de división ha terminada.

Al dividir la línea se crea automáticamente otra entidad que es el punto con las coordenadas especificadas. Esta opción puede ser usada con un punto ya existente en el dibujo y con más de una línea. El punto dividirá a la línea siempre y cuando estos dos se puedan intersecar formando un ángulo recto. En otras palabras es la proyección ortogonal del punto sobre la línea.



Fig. 4 División de la línea en el punto (40,0)

2.3. Creación de un círculo de radio 3.8 y centro en el punto (40,0)

1. Click en la opción *Geometry / Create / Object / Circle*.
2. El centro del círculo es un punto que ya existe. Para poder escoger exactamente el punto, vamos al menú contextual del mouse / Contextual / Join C-a. El puntero se convertirá en un cuadrado.
3. Vemos que se abre una ventana que nos pide un eje perpendicular al plano donde estará el círculo. Como estamos trabajando en el eje X-Y Escogemos e eje Z.
4. Ingresamos el valor del radio de 3.8 y presionamos Enter. Se puede ver que crearan dos circunferencias, la interior indica que se ha creado una superficie.



Fig. 5 Creación del círculo de radio 3,8 y centro en (40,0)

2.4. Rotación del círculo 3 grados alrededor de un punto (0,0)

1. Para esto usaremos la ventana mover. La abrimos haciendo click en *Utilities / Move*; o también con el teclado presionando simultáneamente *Ctrl+V*
2. Se abrirá una ventana que nos permite escoger una serie de opciones. Junto a la etiqueta *Entities Type* escogemos *Surfaces*. En *Transformations* escogemos *Rotation*.(Fig.6)
3. Damos un valor del ángulo de -3° y marcamos el cuadro que indica que se trabajara en dos dimensiones.(Fig.6)
4. En el primer punto ingresamos las coordenadas (0,0,0) este será el centro sobre el cual rotará.
5. Hacemos click en el botón *Select* para seleccionar la superficie que queremos mover, en este caso será el círculo.

6. Presionamos *ESC* o el botón *Finish* en la ventana, para indicar que el proceso ha terminado.

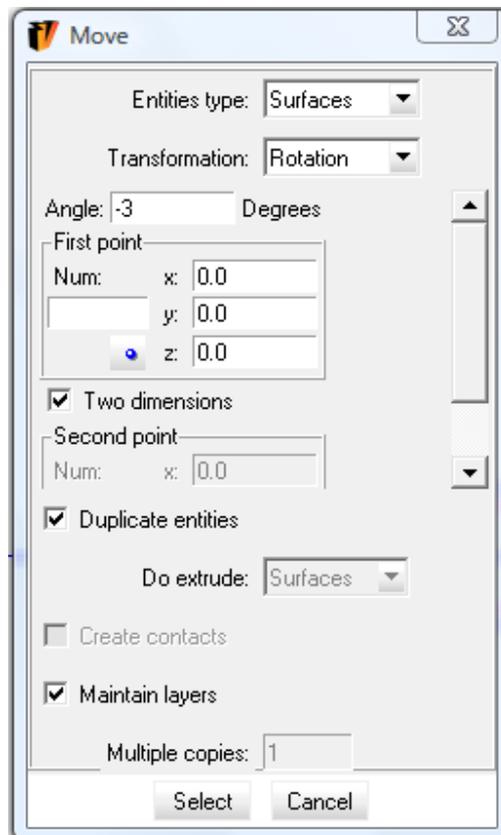


Fig. 6 Ventana que contiene los datos para Mover el círculo en 3°

2.5. Copia y rotación del círculo a un ángulo de 36 grados

1. Abrimos la ventana de copia. Click en *Utilities / Copy* o presionando las teclas *Ctrl+C*
2. Se abrirá una ventana idéntica a la anterior ventana de mover. Repetimos los mismos pasos, con la única diferencia que el ángulo será de 36 grados.(Fig.7)

Nota: La ventana de Mover y Copiar únicamente difiere en que la primera solo mueve, y la segunda crea un nuevo objeto en la posición nueva, sin afectar el objeto original.

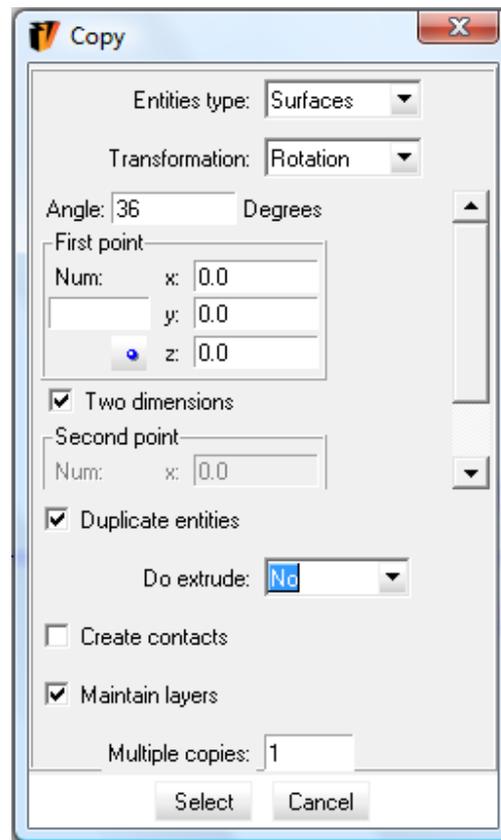


Fig. 7 Ventana que contiene los datos para Copiar el círculo en un ángulo de 36°

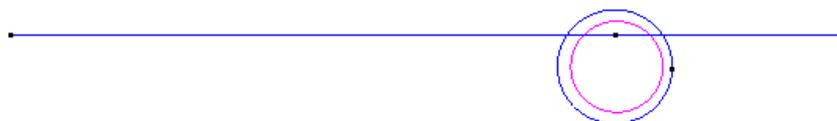
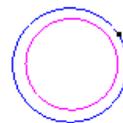


Fig. 8 Resultado de la copia del círculo a 36°

2.6. Copia y Rotación de la línea auxiliar

1. Abrimos la ventana de copiar a través del menú *Utilities / Copy* o presionando las teclas *Ctrl+C*
2. Repetimos el mismo proceso de rotar y copiar para las dos líneas auxiliares, a diferencia que en *Entities Type* seleccionamos la opción *Lines* y damos el valor de 36 grados
3. Presionamos el botón *Select* para seleccionaran las líneas, de la misma manera que hicimos antes
4. Presionamos la tecla *ESC*. Para indicar que el proceso de selección ha terminado.

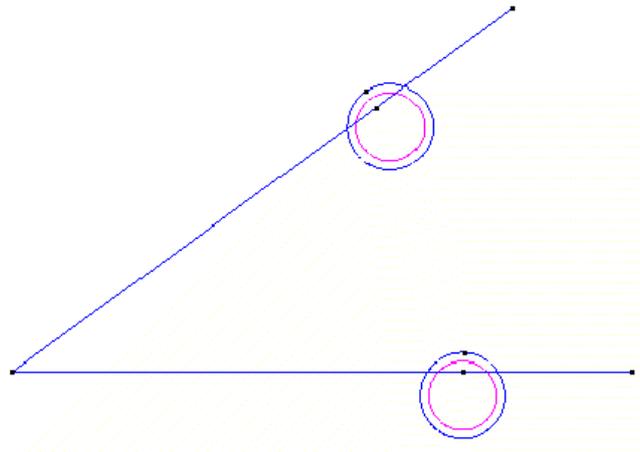


Fig. 9 Resultado de la rotación y copia de la línea a 36°

5. De la misma manera copiamos el segmento que va desde el punto (0,0) al punto (40,0). Pero ahora con un ángulo de 33 grados.

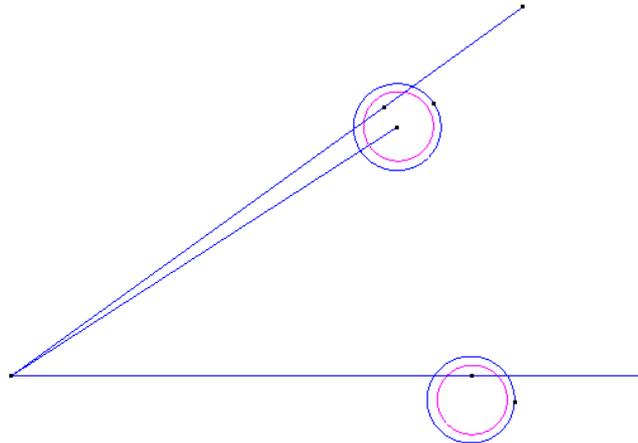


Fig. 10 Resultado de la rotación y copia del segmento a un ángulo de 33°

2.7. Intersección de líneas

1. En la barra de menú *Geometry / Edit / Intersection / Line-line*
2. Para intersecar dos líneas debemos escoger las líneas que deseamos intersecar y se formará un punto en esta intersección. Intersecaremos el círculo inferior con la línea horizontal (Fig.11), el círculo superior con la línea a 36 grados (Fig.12) y a 33 grados (Fig.13) por la parte derecha e izquierda respectivamente.
3. Presionamos *ESC* para terminar la operación

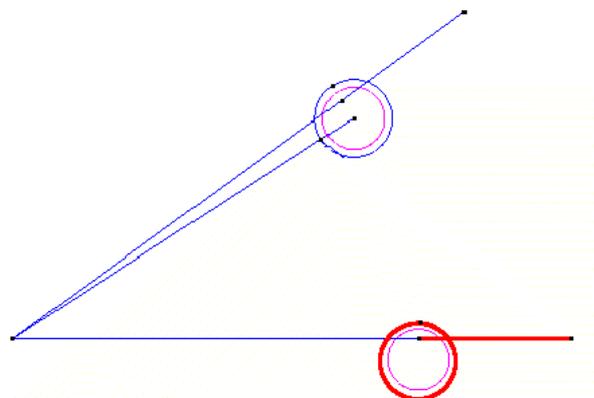


Fig 11. Intersección entre la línea horizontal y el círculo inferior

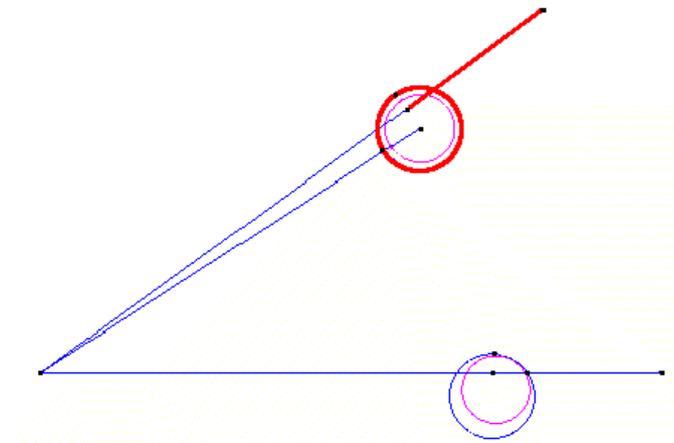


Fig. 12 Intersección entre la línea a 36 grados y el círculo superior

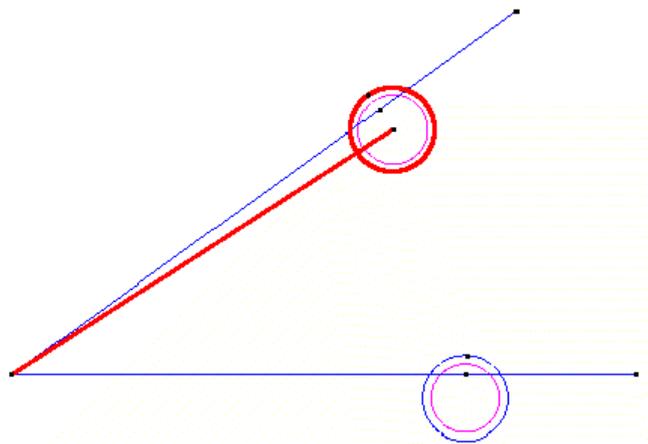


Fig. 13 Intersección entre la línea a 33 grados y el círculo superior

4. Ahora crearemos una línea entre el punto extremo de la línea (55,0) y el nuevo punto generado por la intersección de la línea y el círculo (Fig. 14). Para seleccionar el punto usamos la opción *Join C-a* en el menú contextual del mouse o presionando *Ctrl+a*

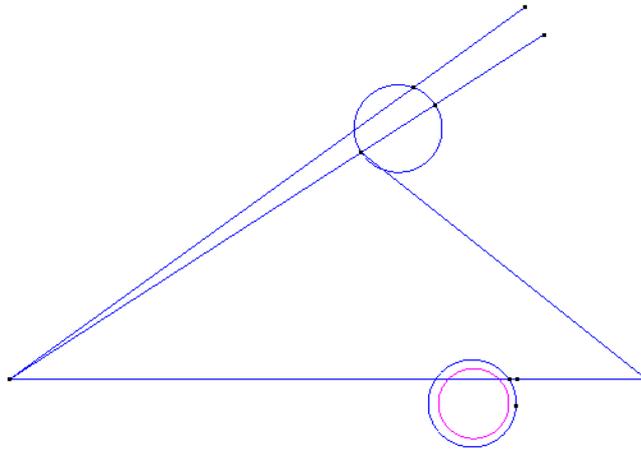


Fig. 14 Línea entre el punto extremo y una intersección

2.8. Creación de un arco tangencia entre dos líneas

1. En la barra de menú damos click en *Geometry / Create / Arc / By 3 points*
2. Dando click derecho en un lugar de la pantalla, abrimos el menú contextual del mouse y seleccionamos la opción *By tangent*
3. Ingreseemos el radio del arco, para nuestro caso daremos un valor de 1.35 y presionamos *Enter*
4. Seleccionamos las líneas que serán parte del arco (Fig. 15)

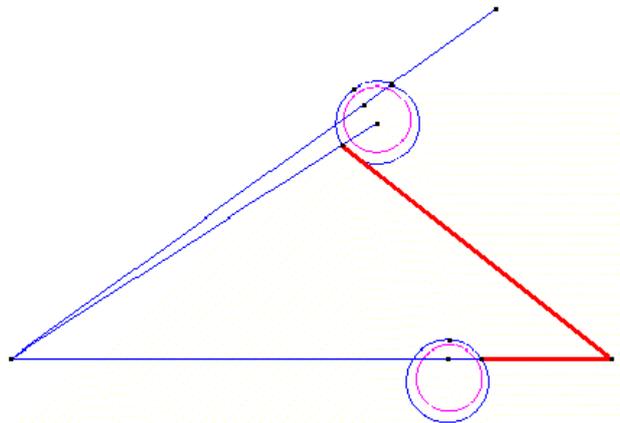


Fig. 15 Segmentos a ser seleccionarse que serán parte del arco

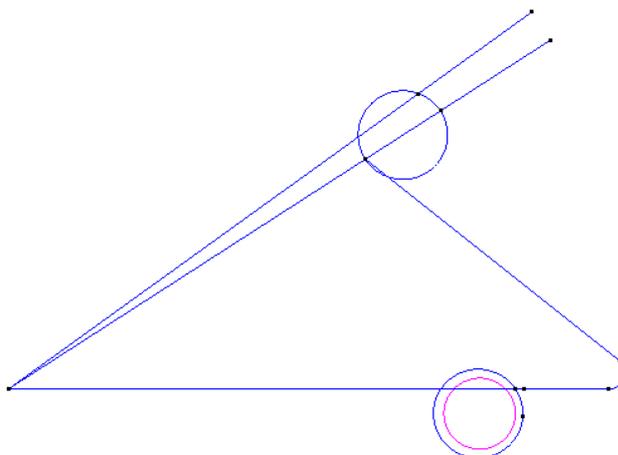


Fig. 16 Resultado de la creación del arco entre las dos líneas

2.9. Traslado de objetos a la capa “perfil”

1. Abrimos la ventana de capas (Ctrl+L)
2. Seleccionamos la capa a la que queremos mover los objetos. Haciendo click en el botón *Layer To Use*. Nos damos cuenta que esta activada la capa cuando aparece un visto en el lado izquierdo del nombre de la capa.
3. Damos Click en el botón *Send To* y escogemos líneas. Y con el puntero del mouse seleccionamos las líneas que deseamos mover (Fig. 17)
4. Para finalizar hacemos click en *Finish* y cerramos la ventana.

Ahora las líneas que elegimos estarán en la capa “perfiles.”

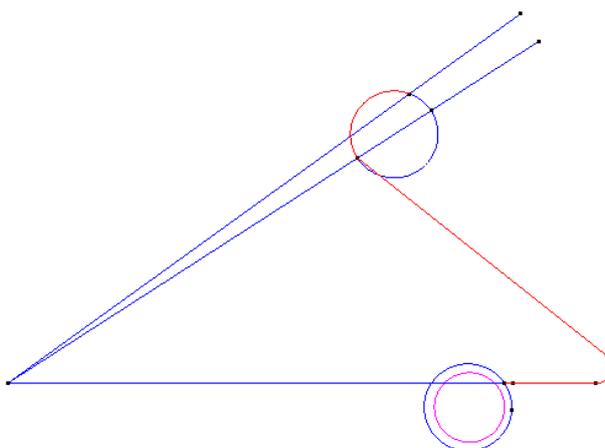


Fig. 17 Líneas que se trasladarán a la capa “perfiles”

2.10. Eliminando la capa “aux”

1. Ocultamos la capa Profile, dando click a la opción Off en la ventana de capas. De esta manera tendremos en la pantalla solo los elementos que deseamos eliminar
2. En la barra de menú damos click en *Geometry / Delete / All Types*.
3. Seleccionamos todos los objetos que aparezcan en la ventana
4. Presionamos *ESC* para terminar la operación
5. Abrimos la ventana de capas (*Ctrl+L*), seleccionamos la capa “auxiliar” y con el botón inferior *Delete* la eliminamos. Se esclarece que una capa no puede ser eliminada si existen objetos en ella, es por eso que primero debemos borrar los elementos que existen en ella, para luego eliminar la capa.
6. Presionamos *ESC* para finalizar

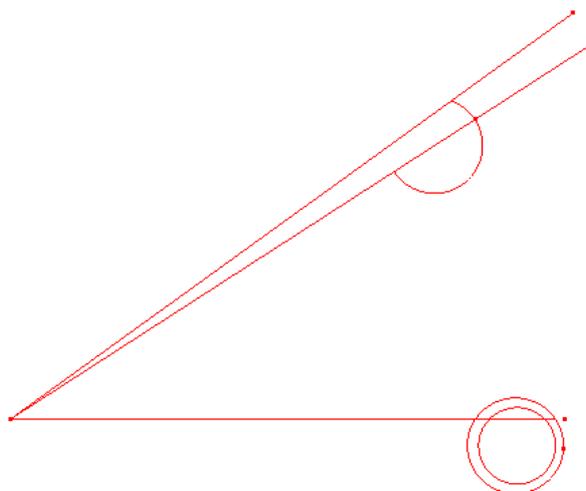


Fig. 18 Líneas que serán eliminadas de la capa “aux”

2.11. Obtención del perfil final

1. Abrimos la ventana de copiar (*Ctrl+c*). En el menú desplegable escogemos *Lines* para “*Entities Type*” y *Rotation* en “*Transformation*” (Fig.19)
2. Damos un valor de 36 grados para el ángulo. Y en la opción de *Multiple Copies* damos el valor de 9. De esta manera tendremos 10 copias incluida la original

3. Damos click en el botón *Select* y seleccionamos todo los objetos.(fig \$%&)

Presionamos Esc para finalizar la operación. Y tendremos el perfil resultante final.

Nota: debe asegurarse de activar la casilla de *two dimensions* y que el punto de origen sea (0,0,0)

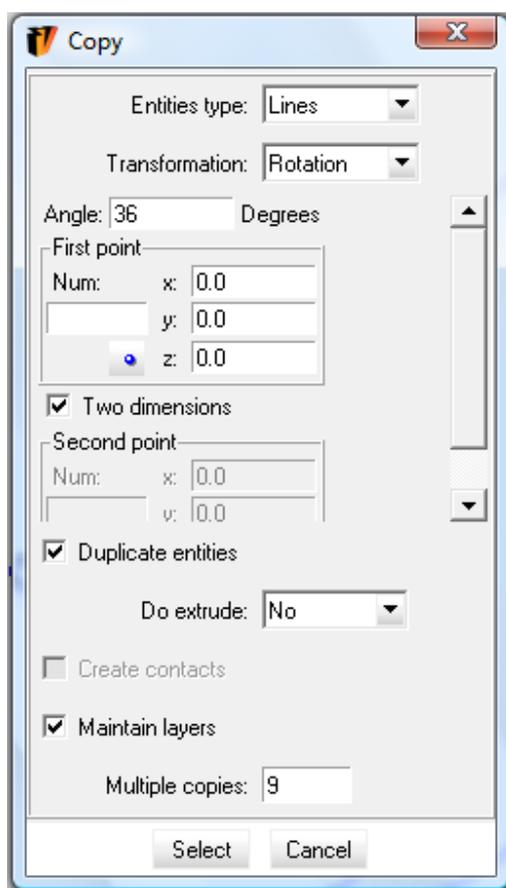


Fig. 19 Ventana para copiar el perfil principal y generar la rueda dentada

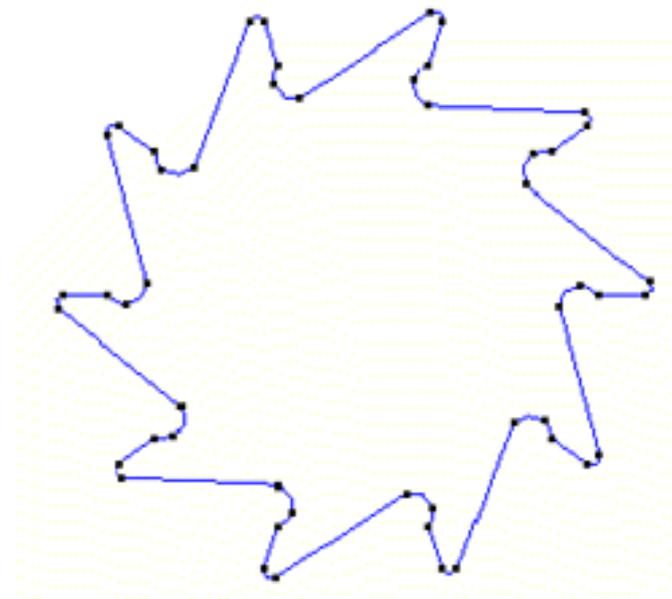


Fig. 20 Resultado final de la copia del perfil principal

2.12. Cambiando el perfil en una superficie.

Para lograr que el perfil se transforme en una superficie, debemos asegurarnos que todos los extremos de las líneas estén completamente unidos entre sí. De otra manera no se podrá generar una superficie. Para unir las líneas entre sí, haremos lo siguiente:

1. Click en *Geometry / Edit / Line Operations / Join lines end points*
2. Seleccionamos las líneas que estén una a continuación de otra. De esta manera el perfil quedará perfectamente cerrado

Ahora ya que tenemos el perfil cerrado, podemos generar la superficie.

1. Click en *Geometry / Create / NURBS Surface / By contour*
2. Seleccionamos los elementos que deseamos convertir a superficie.
3. Presionamos *ESC* para finalizar.

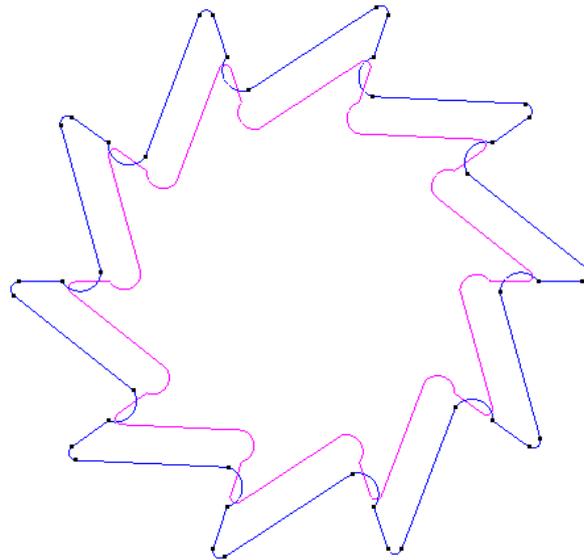


Fig. 21 Creación de una superficie a partir del contorno del objeto

3. CREACIÓN DE UN AGUJERO EN LA SUPERFICIE

3.1. Creación de dos lados del octágono

La superficie que creamos en el paso anterior corresponde a una rueda dentada, que necesitará de un eje. Para esto haremos un agujero en forma de octágono con un radio de 10 unidades

1. Creamos un punto en las coordenadas (10,0). *Geometry / Create / Point* y escribimos las coordenadas del punto
2. Abrimos la ventana de copiar, ya sea desde el menú *Utilities* o presionando *Ctrl+c*.
3. En la opción *Entities type* seleccionamos *Points* (Fig. 22)
4. En la opción *Transformation* seleccionamos *Rotations* (Fig. 22)
5. Damos un valor de 45° para el ángulo, ya que al ser un octágono este es el valor que le corresponde a cada vértice
6. Seleccionamos la opción *Two dimensions* para indicar que se trabajará en dos dimensiones
7. En la opción de *Multiple copies* damos un valor de 3.
8. Hacemos click en *Select* y seleccionamos el punto anteriormente realizado
9. Finalizamos el proceso presionando *Esc*.

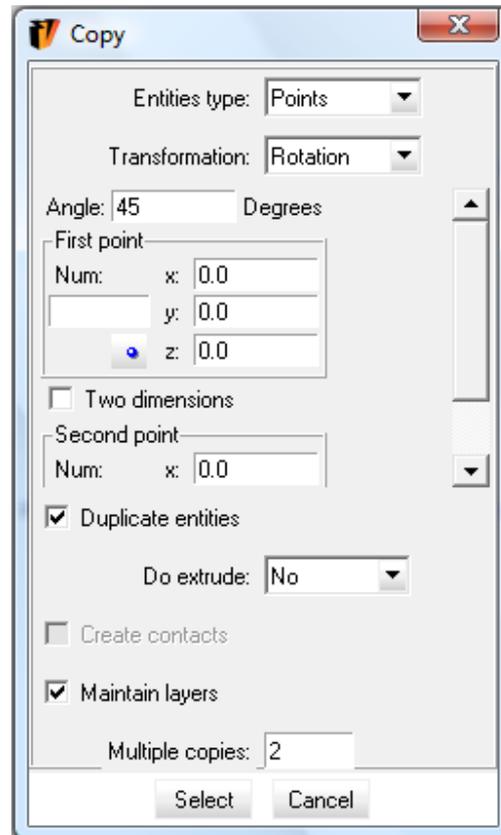


Fig. 22 Ventana para la copia de los puntos del perfil octogonal

Ahora uniremos los tres puntos mediante una línea recta.

1. En la barra de menú damos click en *Geometry / Create / Straight Line*
2. Para asegurarnos que seleccionaremos los puntos realizados, presionamos *Ctrl+a* o con el mouse *Click derecho / Contextual / Join*. El cursor del mouse cambiará de forma y podremos escoger con mayor facilidad los puntos.
3. Unimos todos los puntos y presionamos Esc para finalizar. (Fig. 23)

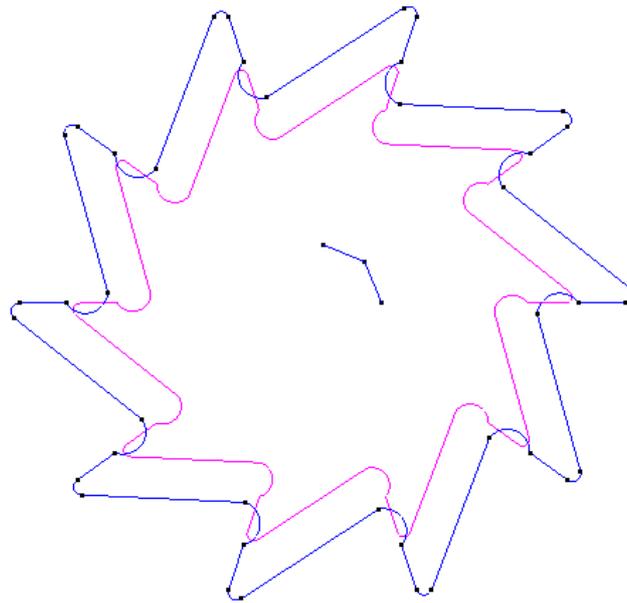


Fig. 23 Unión de los puntos copiados mediante una línea recta

3.2. Creación del resto del octágono usando el efecto espejo

Hemos creado la cuarta parte del octágono. Para completar el perfil completamente, haremos uso de la opción *Mirror*.

1. Abrimos la ventana de copiar (*Ctrl+c*). En la opción *Transformations* seleccionamos *Mirror*. Y la opción de trabajar en dos dimensiones (Fig. 24)
2. El primer punto puede quedar el mismo. El segundo punto podrá ser cualquier valor que tenga cero en las abscisas. Los dos puntos que se definan en esta parte, deberán definir una línea recta que será el eje de simetría de los objetos a copiar. En este caso daremos los siguientes puntos: (0,0,0) y (0,10,0)
3. Dejamos las otras opciones tal como están y presionamos el botón *Select* para seleccionar los objetos a copiar.

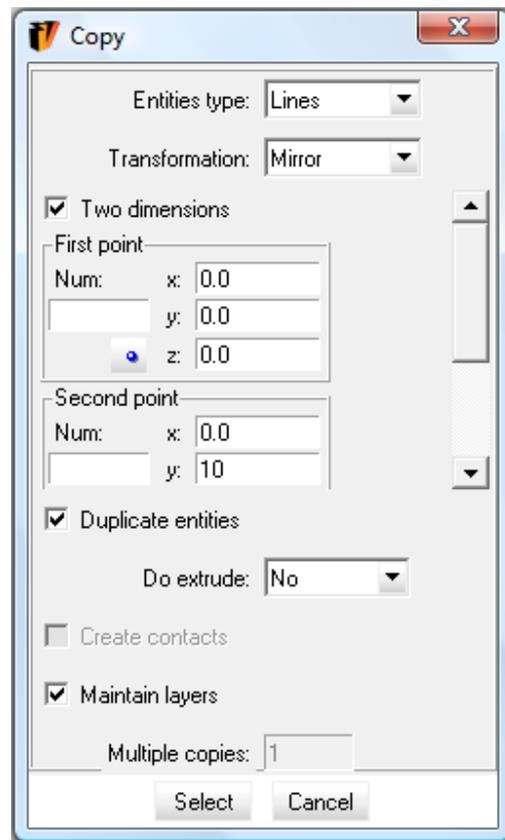


Fig. 24 Ventana para la copia de los puntos del perfil octogonal

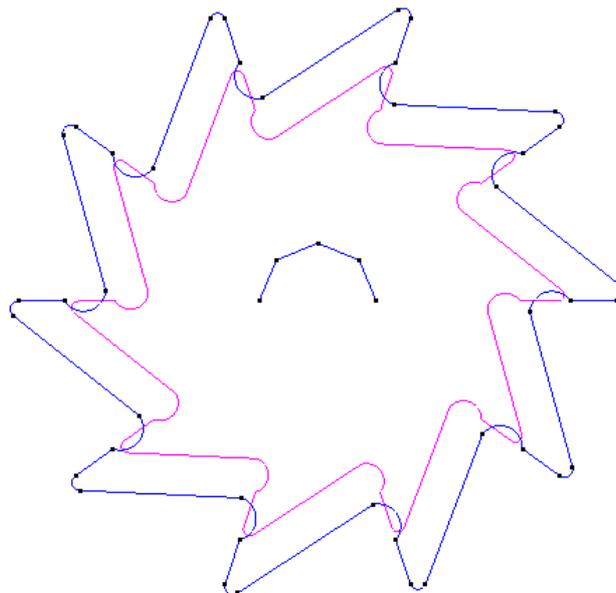


Fig. 25 Resultado de la copia para el perfil octogonal

Ahora hemos creado la mitad del octágono, para completar la geometría, repetimos el paso anterior pero los puntos que definen la línea de simetría tendrán que ser cualquiera que tenga valor de cero en las ordenadas. En este caso daremos los siguientes puntos: (0,0,0) y (10,0,0) (Fig.26) Finalmente tendremos la geometría terminada.

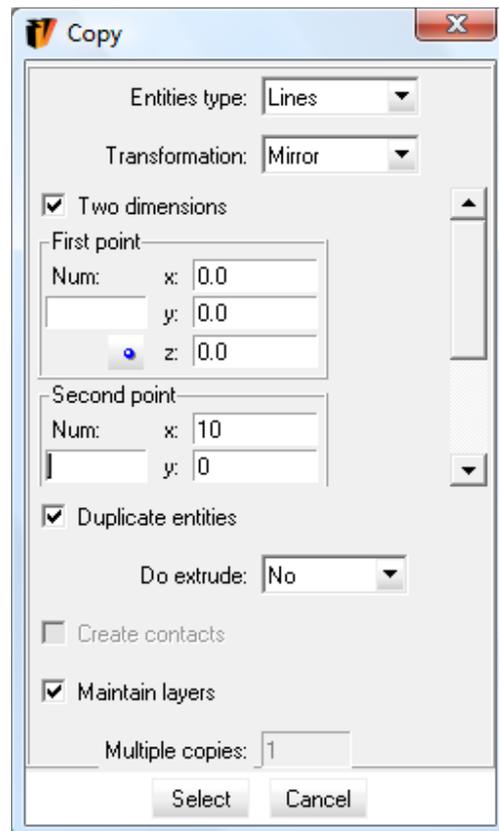


Fig. 26 Ventana para la copia de la otra mitad del perfil octogonal

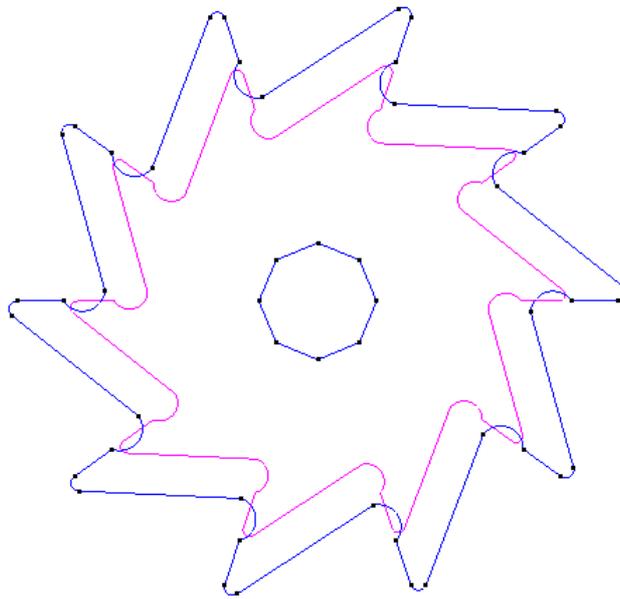


Fig. 27 Resultado de la copia para la creación del perfil octogonal

3.3. Creación del agujero en la superficie del objeto

Finalmente hemos formado el octágono, ahora haremos que este sea un agujero en la superficie del perfil. Para hacer esto debemos asegurarnos que todas las líneas de la geometría estén perfectamente unidas, para ello realizamos lo siguiente:

1. Click en *Geometry / Edit / Line Operations / Join lines end points*
2. Seleccionamos las líneas que estén una a continuación de otra. De esta manera el perfil quedará perfectamente cerrado

Ahora podemos crear el agujero en la superficie, de la siguiente manera:

1. Escogemos la opción *Geometry / Edit / Hole NURBS Surface*
2. Seleccionamos a superficie en donde haremos el agujero (Fig. 28)
3. Seleccionamos las líneas que definen el agujero en la figura, en este caso será el octágono. (Fig. 28)
4. Presionamos *ESC* para finalizar

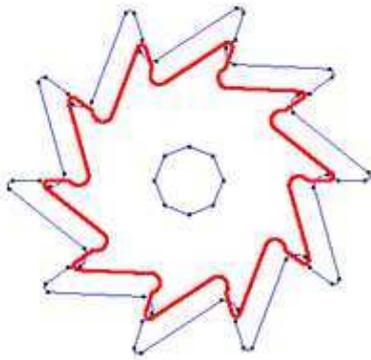


Figure 21. The selected surface in which to create the hole

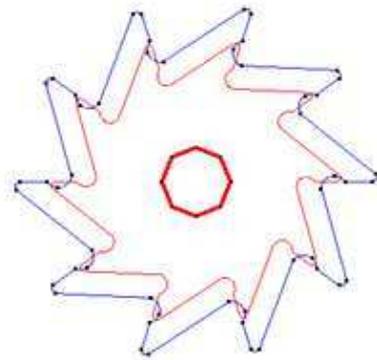


Figure 22. The selected lines that define the hole

Fig. 28 Selección de la superficie (izq) y de las líneas (der) que definen el agujero

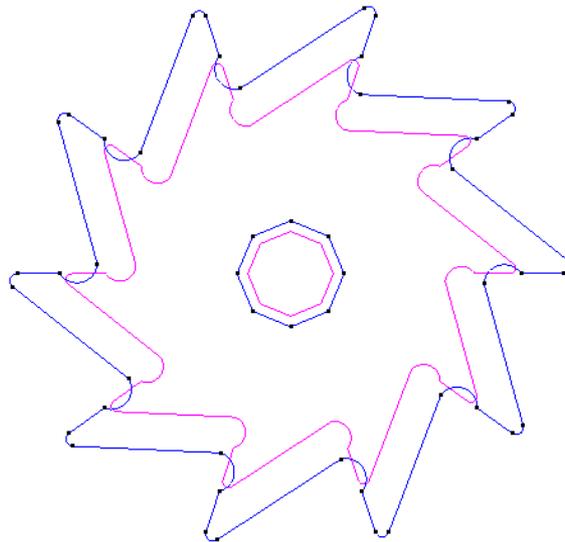


Fig. 29 Resultado del perfil con el agujero octagonal

4. CREACIÓN DE LOS VOLUMENES A PARTIR DE LAS SUPERFICIES

La parte mecánica estará compuesta por dos volúmenes, el volumen de la rueda dentada y del eje octogonal que se ajusta al agujero realizado en la superficie. El primer paso en esta parte será crear el prisma, el cual lo realizaremos en una nueva capa que llamaremos “prisma”

4.1. Creación de la capa “prisma” y traslado del octágono a esta capa

1. Abrimos la ventana de capas (Ctrl+L). Y creamos una nueva capa que la llamaremos “prisma” y la configuramos como la capa activa
2. Damos click en el botón “Send to” y seleccionamos líneas, para escoger las líneas que definen el octágono.
3. Finalizamos presionando *ESC*.
4. Desactivamos la capa “profile” para ver únicamente el octágono

4.2. Creación del volumen del prisma

1. Abrimos la capa de copiar (Ctrl+c). En la opción *Entities Type*: seleccionamos *Lines*, en la opción *Transformation* seleccionamos *Translation* (Fig. 28)
2. Primero copiamos el octágono a una distancia de 50 en el eje z (perpendicular al objeto).
3. Damos los puntos de inicio y final de (0,0,0) y (0,0,50) correspondientemente. (Fig. 28)
4. Presionamos seleccionar para escoger las líneas que forman el octágono. Presionamos *ESC* para terminar.
5. Para poder visualizar lo que realizamos usamos la opción de rotación que la encontramos haciendo click derecho con el *Mouse/ Rótate/ Trackball*. (Fig. 31)

Ahora crearemos una superficie con el perfil de los objetos copiados

6. Escogemos *Geometry / Create / NURBS Surface*. O también desde la barra de herramientas al lado izquierdo de la ventana.
7. Seleccionamos las líneas del octágono copiado. Presionamos *Esc* para finalizar la selección y nuevamente presionamos *ESC* para salir de la función. (Fig. 32)

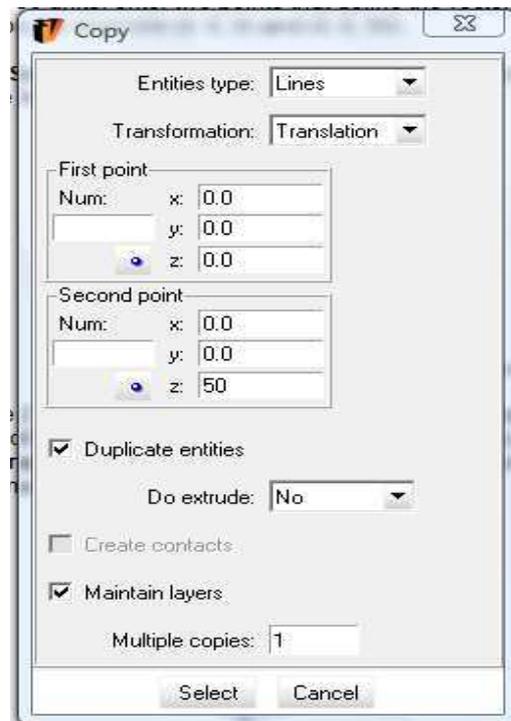


Fig. 30 Ventana de copia para la creación del volumen del prisma

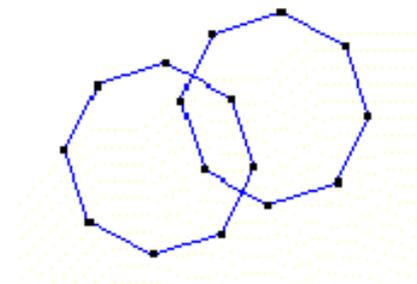


Fig. 31 Vista en perspectiva de la copia del octágono

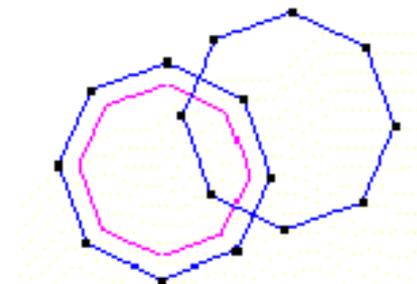


Fig. 32 Superficie creada a partir del octágono copiado

8. Nuevamente abrimos la ventana Copiar. En la opción *Entities Type*: seleccionamos *Surfaces*, en la opción *Transformation* seleccionamos *Translation* (Fig. 33)
9. Daremos un valor de traslación de 110 unidades. Para lo que tenemos que definir un vector que indique este movimiento. Los puntos que definen al vector serán (0,0,0) y (0,0,-110) (Fig. 33)
10. Para crear el volumen del prisma, en la opción *Do Extrude* y escogemos *Surfaces* (Fig. 33)
11. Finalmente damos click en *Select* y seleccionamos el área que copiamos anteriormente. Presionamos *ESC* para finalizar

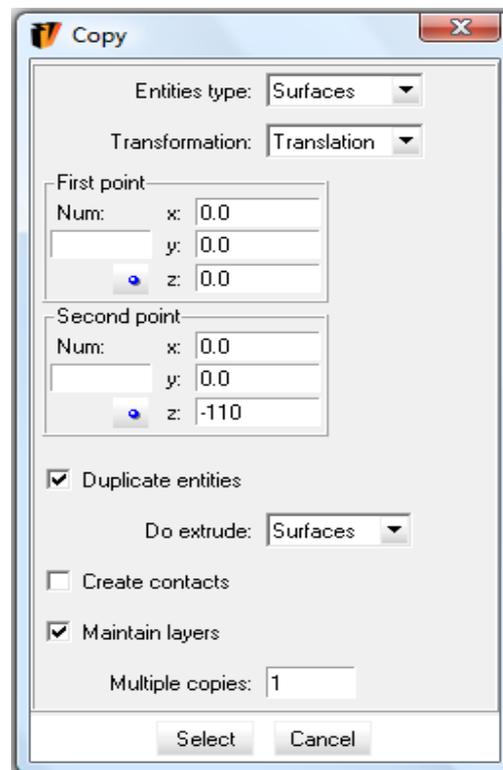


Fig. 33 Ventana de copia para la creación del volumen del prisma

12. Ahora transformaremos el área creada en el volumen del prisma. Click en *Geometry / Create / Volume / By Countour*.
13. Seleccionamos todas las superficies que forman parte del prisma. (Fig. 34)
14. Presionamos *ESC*, para salir de la función. (Fig. 35)

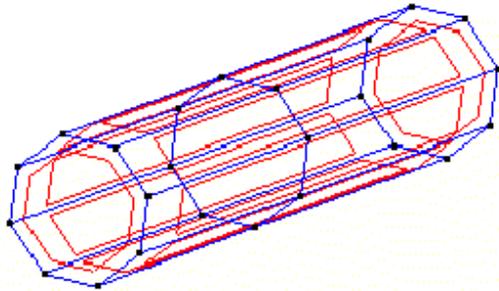


Fig. 34 Selección de las superficies del prisma

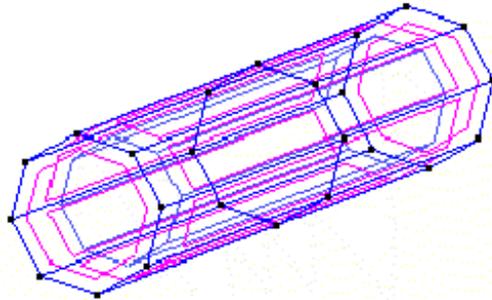


Fig. 35 Creación del volumen del prisma

Para poder observarlo al volumen de una manera más real, utilizaremos la opción *Render*. Click en la barra de menú en *View / Render / Flat*. Esto también lo podemos hacer desde el menú del mouse haciendo click derecho/ *Render / Flat*. Para regresar a la vista normal escogemos *Normal*. (Fig. 36)

El color del sólido está dado por el color que tenga la capa. Esto podemos modificarlo en la ventana de capas

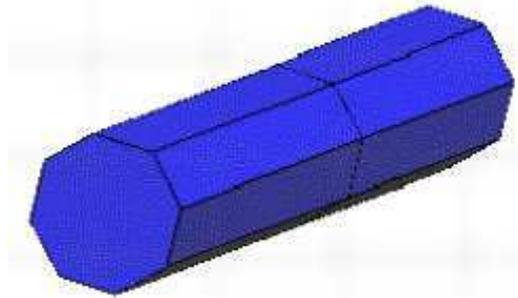


Fig. 36 Visualización del prisma con la opción Flat Lighting

4.3. Creación del volumen de la rueda dentada

1. Activamos la capa “perfil” y desactivamos la capa “prisma”. De esta manera solo visualizaremos la rueda dentada. El proceso es similar al del prisma
2. Abrimos la ventana de copiar (Ctrl+c). En la opción *Entities Type*: seleccionamos *Surfaces*, en la opción *Transformation* seleccionamos *Translation* (Fig. 37)
3. La copia del objeto estará a 10 unidades de distancia. Así que debemos definir el vector que ubique en esta posición. Los puntos que daremos serán (0,0,0) y (0,0,-10)
4. En la opción *Do Extrude* seleccionamos *Surfaces* (Fig. 37)
5. Presionamos el botón de *Select*. Seleccionamos el perfil que queremos copiar y presionamos *ESC* para finalizar.

Ahora ya tenemos toda la superficie que definirán el volumen de la rueda dentada. Finalmente para crear el volumen hacemos lo siguiente:

6. Vamos al menú *Geometry / Create/ Volume / By Contour*
7. Seleccionamos todas las superficies y presionamos *ESC* para finalizar (Fig. 38).

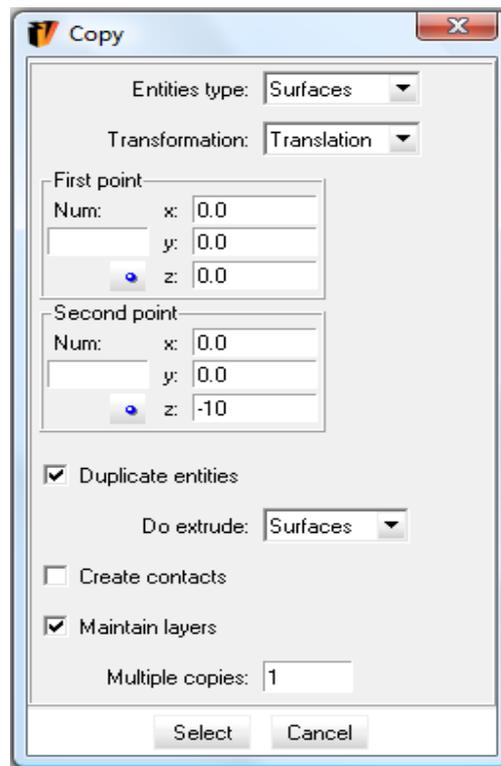


Fig. 37 Ventana de copia para la creación del volumen de la rueda dentada

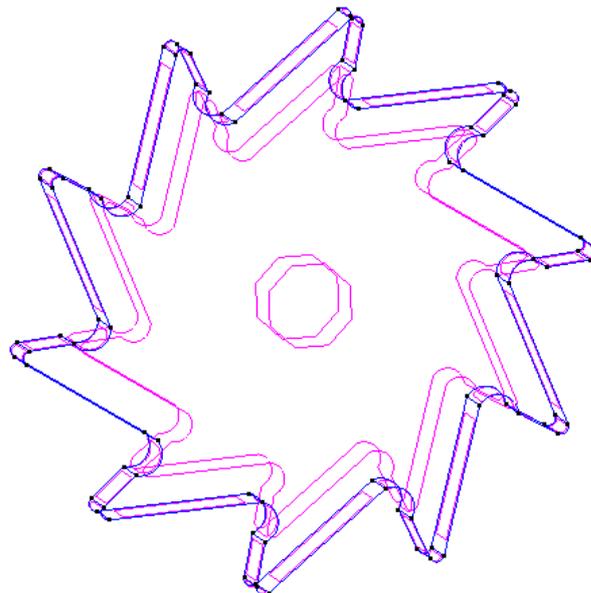


Fig. 38 Resultado de la copia para la creación del volumen de la rueda dentada

Para poder visualizar de una manera más real usamos la opción de *Render*. Click en la barra de menú en *View / Render / Flat*. Esto también lo podemos hacer desde el menú del mouse haciendo click derecho/*Render / Flat*. Para regresar a la vista normal escogemos *Normal*.

El color del solido esta dado por el color que tenga la capa. Esto podemos modificarlo en la ventana de capas

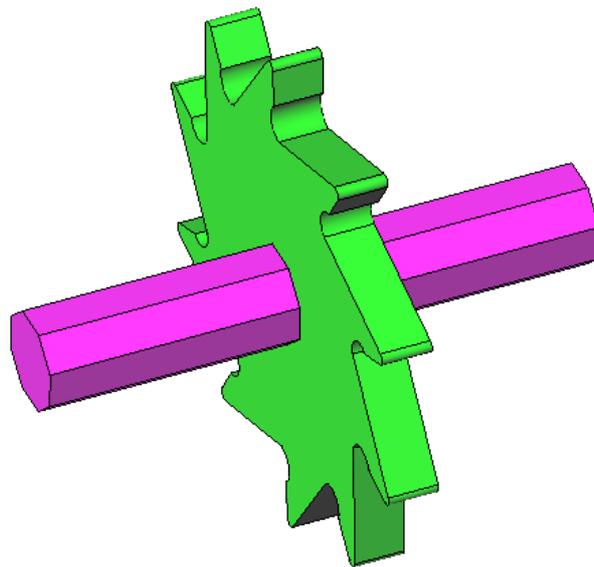


Fig. 39 Resultado final del volumen de rueda y eje terminados

5. MALLADO

Ahora que se ha creado los volúmenes, el siguiente paso es generar la malla. Primeramente realizaremos la malla por defecto que nos ofrece el programa. Dependiendo de la forma del objeto a ser mallado, Vulcano automáticamente corrige el tamaño de la malla. Esta opción de corrección, la cual es activada automáticamente por defecto, puede ser modificada desde la ventana de preferencias, en la pestaña de mallado en la parte de corrección automática de tamaño. La corrección automática en algunas ocasiones no es suficiente. En estos casos el usuario debe indicar en qué partes necesita una mayor precisión. En este ejemplo, incrementaremos la cantidad de elementos alrededor del perfil de la

rueda dentada por dos métodos: 1) Asignando el tamaño de los elementos alrededor de los puntos y 2) Asignando el tamaño de los elementos alrededor de las líneas.

5.1. Mallado por defecto

1. En la barra de menú, damos click en *Mesh / Generate mesh*. Se desplegará una ventana en la que ingresamos el tamaño de los elementos de malla que se generarán (Fig.40). Dejamos el valor que nos muestra el programa y damos click en OK

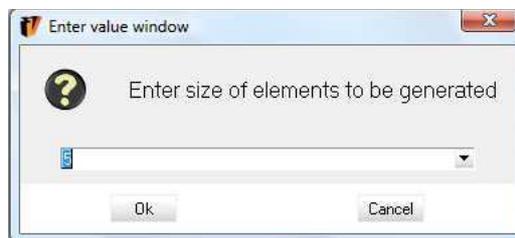


Fig. 40 Ventana en al cual se ingresa el tamaño máximo del elemento

2. Una vez terminado el proceso, se muestra una ventana con la información acerca de la malla que se generó mostrando el número de elementos y nodos generados.
3. Para poder visualizar la malla generada. Damos click en *Mesh / View mesh boundary*

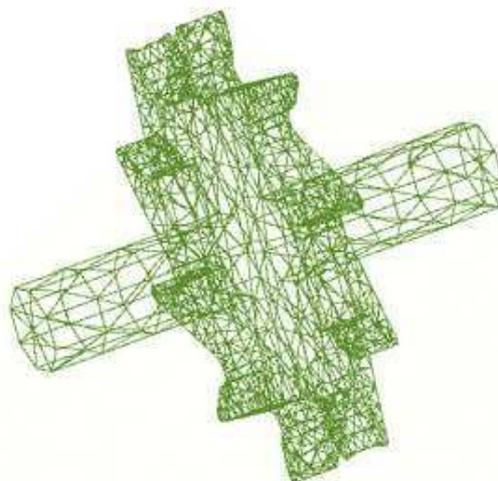


Fig. 41 Visualización del mallado con la opción de bordes

5.2. Mallado asignando el tamaño de los elementos alrededor de los puntos

1. Nos ubicamos en la vista X-Y. Vamos a la barra de menú y damos click en Mesh / Unstructured / Assign sizes on points. Se abre una ventana en la que debemos ingresar el tamaño de la malla alrededor del punto. En este caso daremos un valor de 0.7
2. Luego damos click en *Assign* y seleccionamos los puntos en el perfil de la rueda dentada. Una forma fácil de hacer esto es seleccionando todo completamente y luego cancelando al selección de los puntos que son parte del agujero.
3. Presionamos ESC para concluir el proceso
4. Ahora vamos a la ventana de mallado automático presionando Ctrl+g. En esta nos pedirá que ingresemos un valor, nosotros dejaremos el valor por default y presionamos ok.

Aparecerá una ventana de resumen del mallado. Y finalmente tenemos el mallado. Si no lo podemos visualizar, vamos al menú *Mesh / View mesh boundary* (Fig. 42). Ahora podemos visualizar como en los puntos del borde se concentran mayor cantidad de elementos.

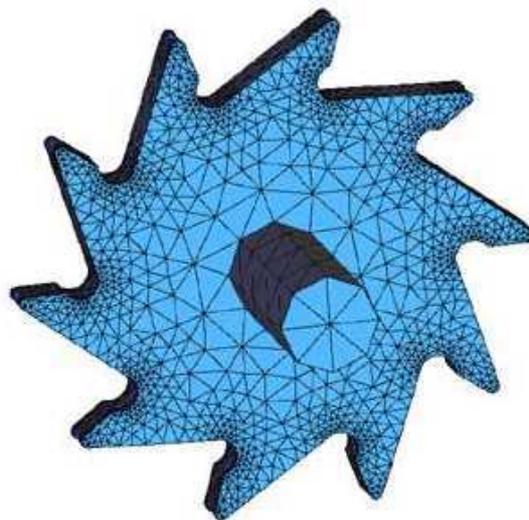


Fig. 42 Mallado asignando el tamaño alrededor de los puntos en el perfil de la rueda

5.3. Mallado asignando el tamaño de los elementos alrededor de líneas

1. Abrimos la ventana de preferencias. Utilities / Preferences / Meshing. En esta ventana (Fig. 43) hay una opción llamada *Unstructured Size Transitions*, la cual define el tamaño del gradiente de los elementos. Un valor grande de gradiente permite al usuario concentrar más elementos en el perfil. En este caso daremos un valor de 0.8, y presionamos el botón aceptar.
2. En la barra de menú, damos click en *Meshing / Reset mesh* Para borrar el tamaño asignado previamente.
3. En la barra de menú, damos click en *Meshing / Unstructured / Assign sizes on lines*. Se abrirá una ventana en donde ingresaremos el valor del tamaño de los elementos alrededor de la línea a seleccionar. Daremos un valor de 0.7. Y procedemos a seleccionar la línea del perfil (Fig. 44)

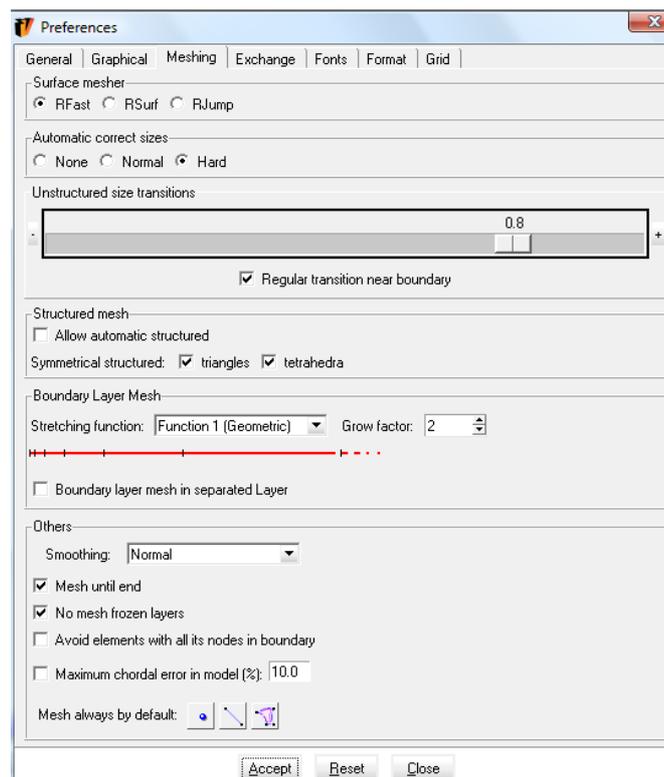


Fig. 43 Ventana de preferencias en la cual se puede definir el tamaño del gradiente de los elementos

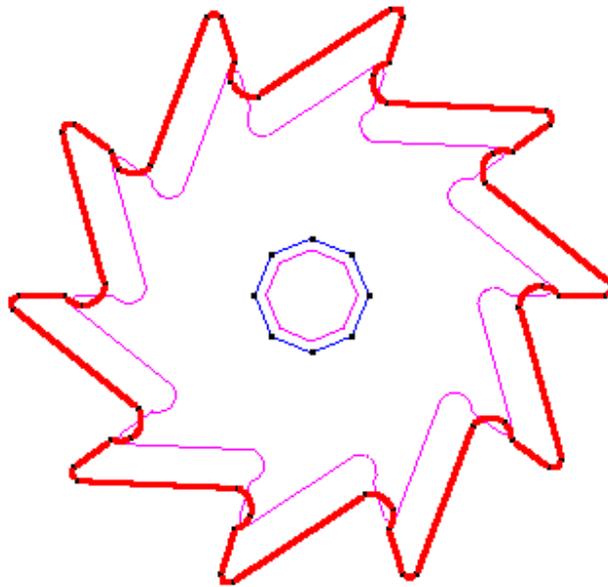


Fig. 44 Selección de las líneas que definen el perfil de la rueda

4. Click en *Mesh / Generate mesh*. Una ventana aparecerá preguntando si deseamos eliminar el mallado anterior, damos click en ok. Se mostrara una ventana del tamaño de la malla, en donde dejamos el valor que sale por defecto.
5. Presionamos Ok, y finalmente obtenemos el mallado de la rueda dentada, con una mayor concentración de elementos en todo el rededor del perfil.

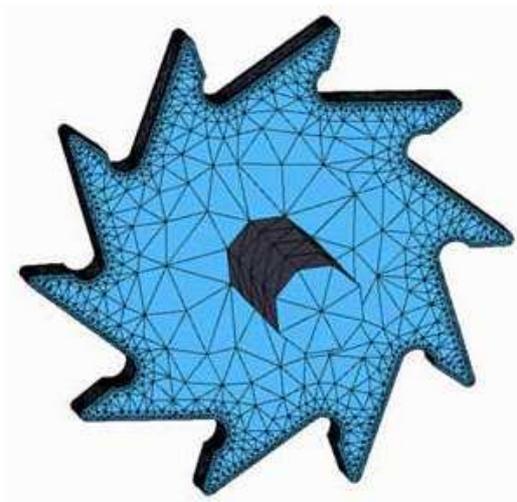


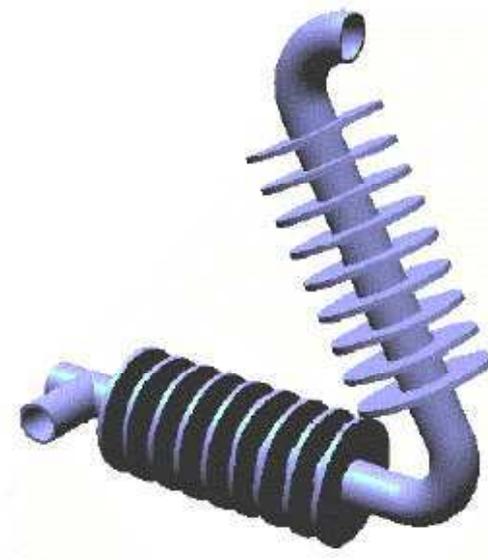
Fig. 45 Resultado del mallado concentrado en las líneas

ANEXO A2

TUTORIAL PARA LA CREACION DE UNA TUBERIA DE ENFRIAMIENTO

En este tutorial se mostrará cómo utilizar nuevas herramientas mediante el desarrollo del dibujo, importado y mallado de objetos. Cuando se haya alcanzado un vasto conocimiento del manejo del programa nos daremos cuenta que existen variadas y probablemente más fáciles maneras de realizar el mismo ejemplo, pero la idea de realizarlo de esta manera es aprender la mayor cantidad de herramientas y formas para utilizar el programa.

El modelo que se utilizará para este tutorial, será un par de tubos con aletas, unidos mediante un codo de 60° como se muestra en la figura



1. CREACIÓN DE CAPAS

En la ventana de capas (Ctrl+L), creamos dos capas, a las que llamaremos “Auxiliar” y “Perfil”. Y seleccionamos como capa activa, a la capa “Auxiliar”.

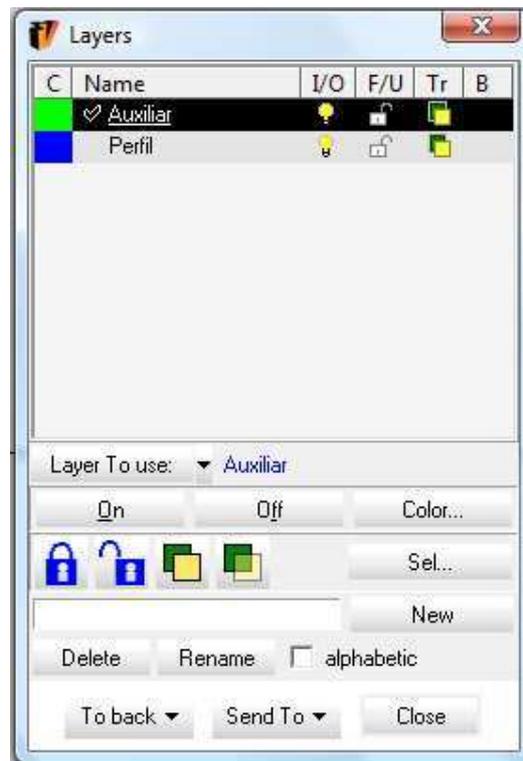


Fig.1 Ventana de gestión de capas

2. CREACION DE LINEAS AUXILIARES

2.1. Creación de los ejes

La creación de las líneas auxiliares en este ejemplo, nos servirán como ayuda para realizar el dibujo del objeto, en este caso para determinar el centro de rotación del tubo y el centro tangencial del codo.

1. Escogemos la herramienta de línea en : *Geometry / Create / Straight Line*
2. La longitud de la línea será de 200mm. Por lo que las coordenadas de la línea serán (0,0) y (200,0)
3. De igual manera creamos otra línea de la misma longitud a una distancia de 25mm separación. Las coordenadas serán (0,25) y (200,25)



Fig.2 Líneas auxiliares de 200mm de longitud

1. Abrimos la ventana copiar (Ctrl+C). En el menú “*Transformation*”, seleccionamos *Rotation* y en el “*Entities Type*” seleccionamos *Lines* (Fig. 3)
2. Damos un valor de -60 grados para el ángulo, y seleccionamos la opción de “*Two dimensions*” (Fig. 3)
3. El punto que definirá el centro de rotación será el extremo derecho de la primera línea (200,0)
4. Damos click en el botón “*Select*” para seleccionar la línea que queremos copiar.
5. Presionamos *ESC* para indicar que el proceso de copia ha terminado. La copia de las líneas se muestra en la figura 4

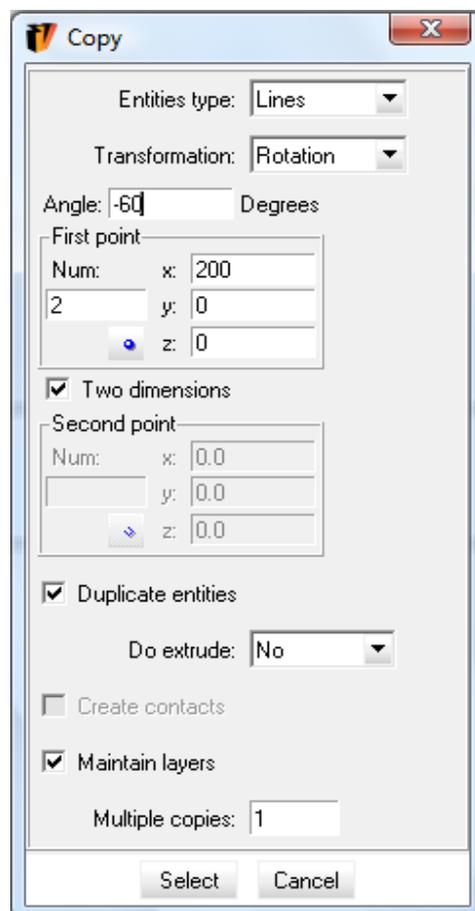


Fig.3 Ventana de Gestión de copia

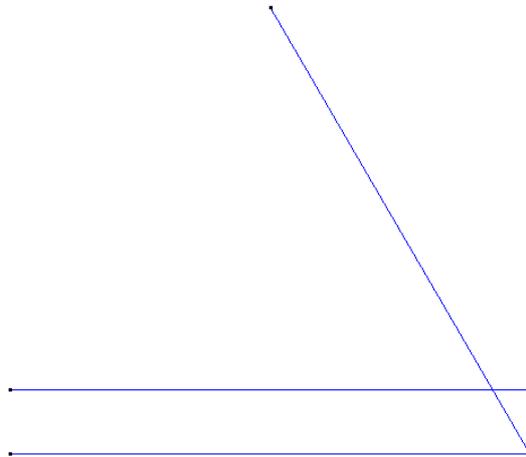


Fig.4 Copia de la línea a -60 grados

2.2. Creación del Centro Tangencial para el Codo

1. Crearemos una línea que una el extremo izquierdo de las dos rectas paralelas. Las coordenadas de la recta serán $(0,0)$ y $(0,25)$. Luego presionamos *ESC*. (Fig.5)
2. Ahora copiamos la línea que acabamos de crear a un ángulo de 120 grados en sentido antihorario. Abrimos la ventana de copiar y en el menú "*Transformation*", seleccionamos *Rotation* y en el "*Entities Type*" seleccionamos *Line*. Damos un valor de 120 grados (Fig.6).
3. Seleccionamos la opción *Two dimensions* y como punto de rotación escogemos el punto de coordenadas $(0,25)$ (Fig.6).

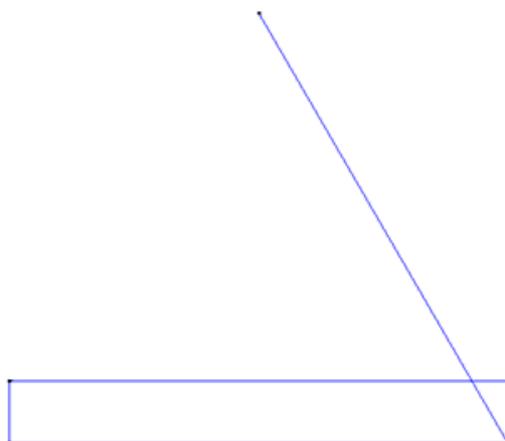


Fig.5: Creación de la línea de coordenadas $(0,0)$ y $(0,25)$

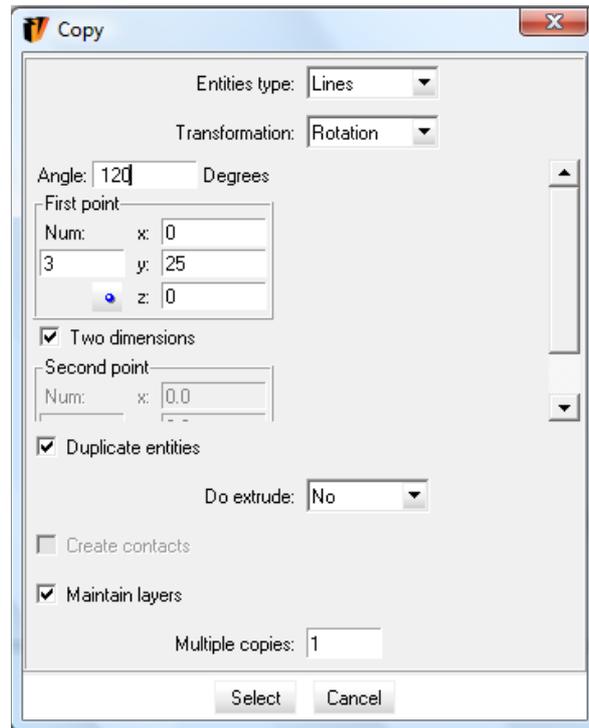


Fig.6: Ventana de Copia para el segmento a 120°

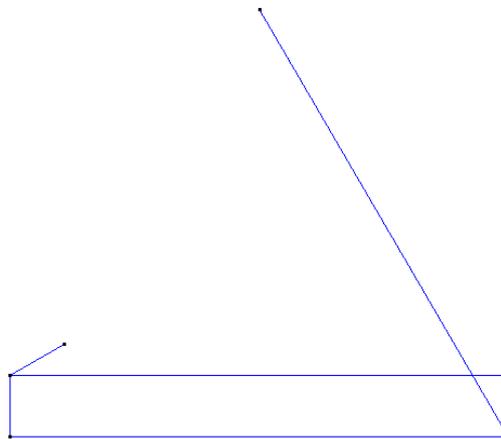


Fig.7 Segmento copiado a 120°

Esta línea que copiamos la creamos para tomarla como vector auxiliar para poder establecer la dirección perpendicular a la línea inclinada a -60 grados y a una separación de 25mm

1. Nuevamente abrimos la ventana copiar (Ctrl+C), en el menú “*Transformation*” (Fig.8) seleccionamos *Translation* y en “*Entities Type*” seleccionamos *Lines*. El vector que definirá la traslación serán los puntos de la línea copiada a 120 grados. De esta manera tendremos una copia completamente paralela y a una distancia de 25mm de la línea creada a -60°
2. Damos click en el botón *Select* y escojemos la línea creada a -60 grados
3. Presionamos *ESC* para indicar que el proceso ha finalizado

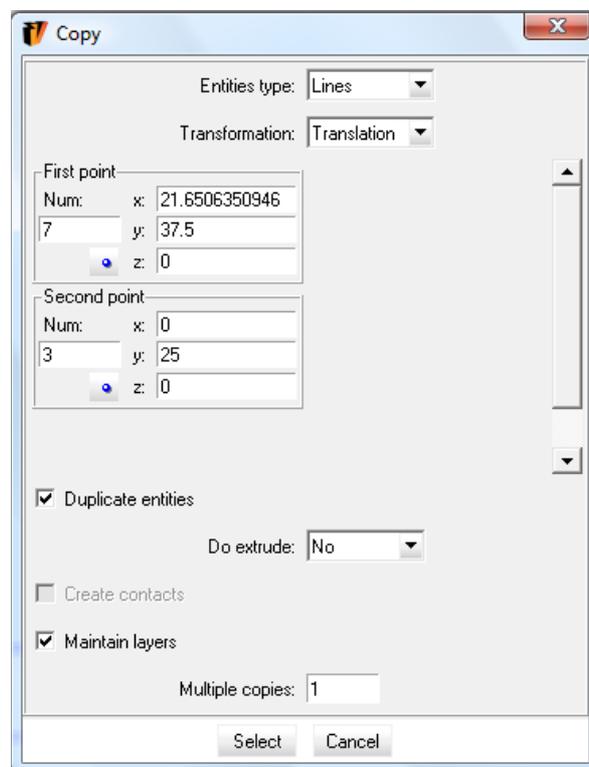


Fig.8 Opciones para la copia de una recta paralela a 60°
De inclinación y 25 mm de separación

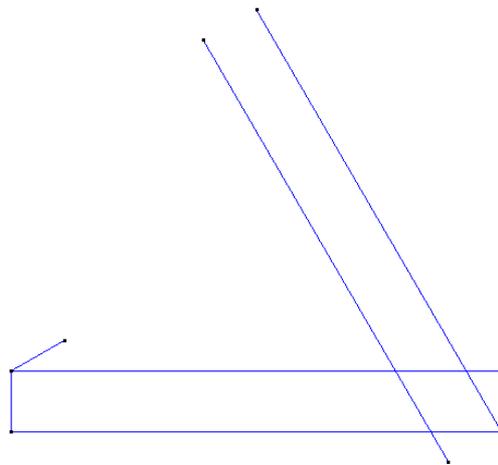


Fig.9 Copia de la línea recta a 60° y 25 mm de Separación

El punto de rotación al intersecar las dos líneas interiores

1. En el menú *Geometry / Edit / Intersección / Line- line*. Seleccionamos las dos líneas internas que deseamos intersecar.
2. Presionamos *ESC* para indicar que el proceso ha terminado. Esta acción nos ha creado un punto, que nos servirá como centro de rotación para la creación del codo de la tubería (Fig. 10)

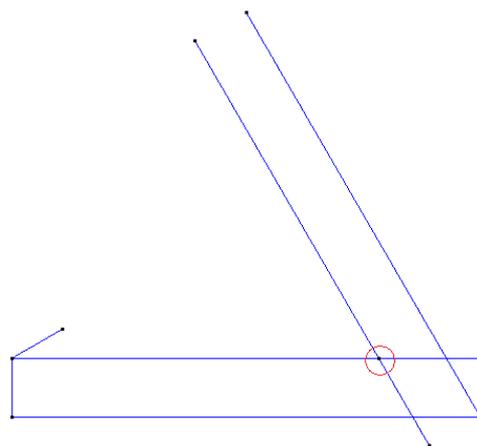


Fig.10 Intersección del punto de rotación para la creación del codo de unión

3. CREACIÓN DE LA PRIMERA COMPONENTE

En esta sección crearemos todo el modelo a excepción de la unión en T. El modelo a ser creado está compuesto por dos tubos que forman un ángulo de 60°

3.1. Creación del Perfil

1. Abrimos la ventana de capas (Ctrl+L) y activamos la capa "Perfil", y desde ahora todo lo que dibujemos pertenecerá a esta capa.o
2. Escogemos la herramienta para hacer líneas desde el menú de herramientas o vamos a *Geometry / Create / Line*.
3. El perfil está definido por las siguientes coordenadas: (0,11), (8,11), (8,31), (31,11), (11,11) y (15,11). Presionamos *ESC* para indicar que el proceso finalizó. (Fig. 11)
4. Ahora con el perfil creado, copiamos por 8 veces uno tras otro, para ello abrimos la ventana de copiar. Escogemos *Lines y Translation* (Fig. 12)
5. Los puntos que definen el vector desplazamiento del objeto a copiar son: (0,11) y (15,11). Que viene a ser la distancia de 15mm de longitud del perfil creado. Los puntos que damos pueden ser cualquier vector que defina una diferencia de 15mm en el eje x por ejemplo podrían ser (2,0) y (17,0) ó (15,2) y (30,2), etcétera.
6. Presionamos "*Select*" y seleccionamos las líneas creadas en el paso anterior
7. Ahora creamos una línea que vaya desde el punto final del último objeto copiado hasta quedar alineado con las líneas guía iniciales (Fig14). Para facilidad de selección del punto, presionamos las teclas Ctrl+a y luego de seleccionar el primer punto damos el punto (200,11)
8. Con la herramienta de *Line* creamos una línea que será la pared del tubo, que tiene un espesor de 2mm, por lo que los puntos que definirán la línea serán (0,9) y (200,9). (Fig14)

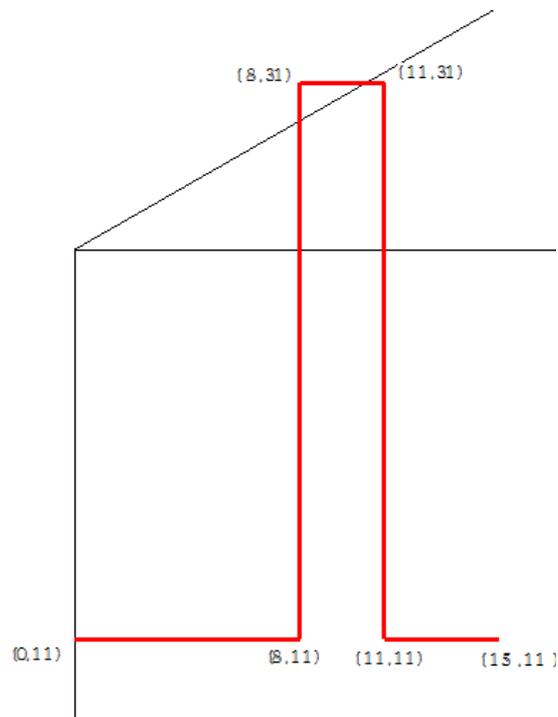


Fig. 11 Puntos que definen el perfil

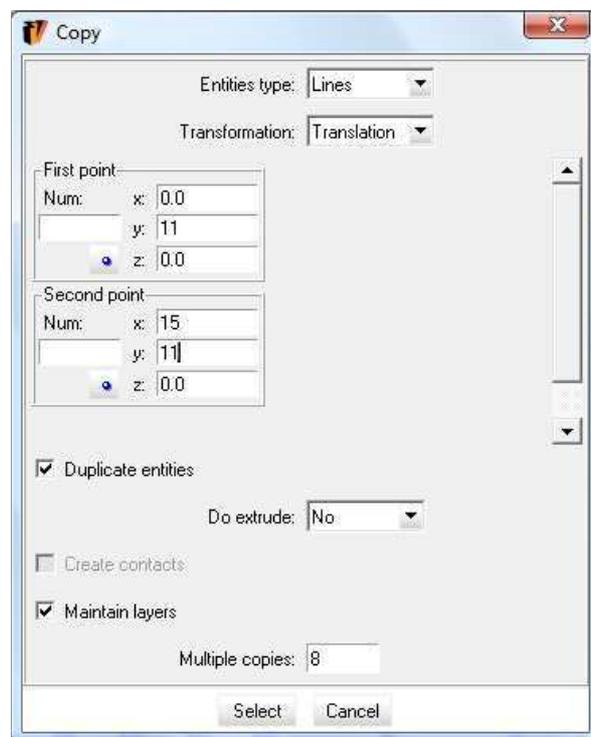


Fig. 12 Ventana de Copia

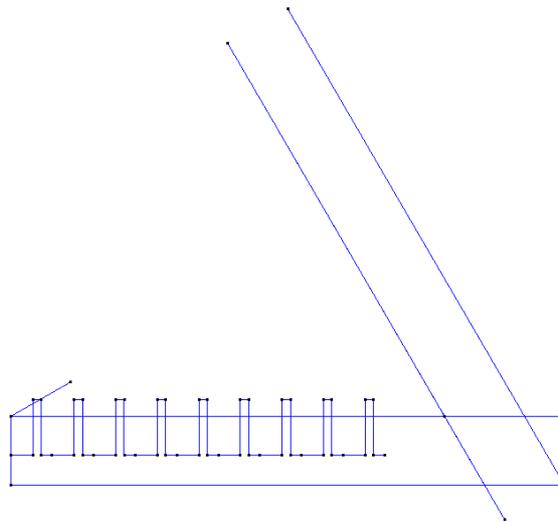


Fig.13 Objetos copiados

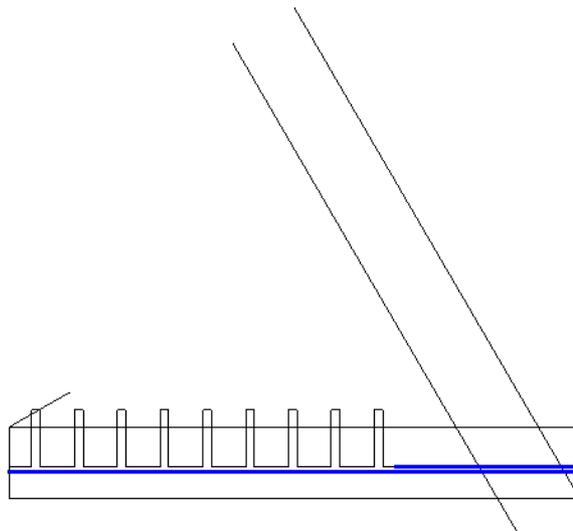


Fig.14 Línea que define la pared del tubo

9. Nuevamente abrimos la ventana copiar (Ctrl+c) y seleccionamos *Lines* y *Translation* en los respectivos menús desplegables (Fig15). Los puntos que definirán el vector de copia serán: (0,25) punto extremo izquierdo, y (156.698,25) punto de intersección entre las dos rectas internas (Fig 15)

10. Presionamos el botón “*Select*” para seleccionar la línea vertical izquierda que une los dos extremos de las líneas de eje horizontales. Y finalmente presionamos *ESC* para indicar que el proceso ha terminado

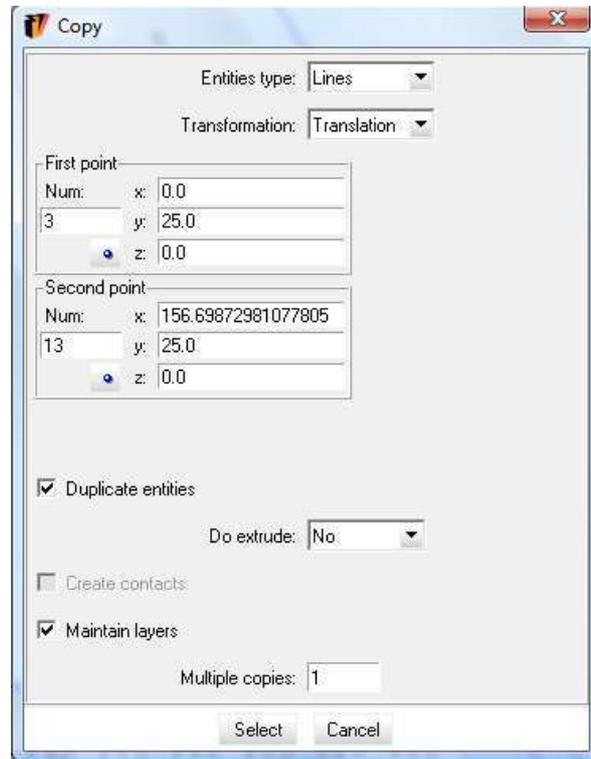


Fig.15 Ventana de Copia para el segmento que definirá el extremo del tubo horizontal

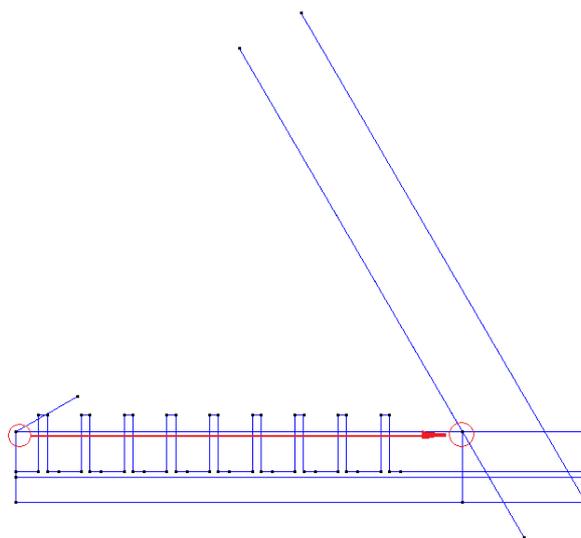


Fig.16 Copia del segmento que definirá el extremo del tubo horizontal

11. Con la línea recién creada vamos a crear los puntos que se obtienen al intersecar las dos líneas horizontales con la última segmento de línea copiado
12. Damos click en *Geometry / Edit / Intersection / Multiple Lines*. Y seleccionamos las dos líneas horizontales y el segmento vertical anteriormente copiado. (Fig 17)
13. Presionamos *ESC* para indicara que le proceso ha terminado y obtenemos dos puntos. Estos puntos definen la longitud del primer tubo. (Fig 17)

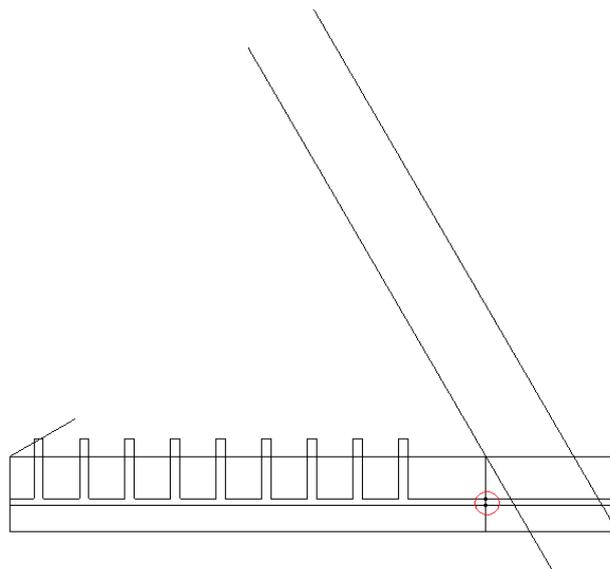


Fig17. Puntos de intersección

3.2. CREACIÓN DEL VOLUMEN DE REVOLUCIÓN

La rotación del perfil, se llevará a cabo en dos rotaciones de 180 grados cada una.

1. Abrimos la ventana copiar (Ctrl+c), seleccionamos *Lines* y *Rotation* en los correspondientes menús. Ingresamos el valor de 180° como valor angular y seleccionamos *Two dimensions*. Además seleccionamos la opción *Surfaces* en el menú “*Do Extrude*” (Fig 18)

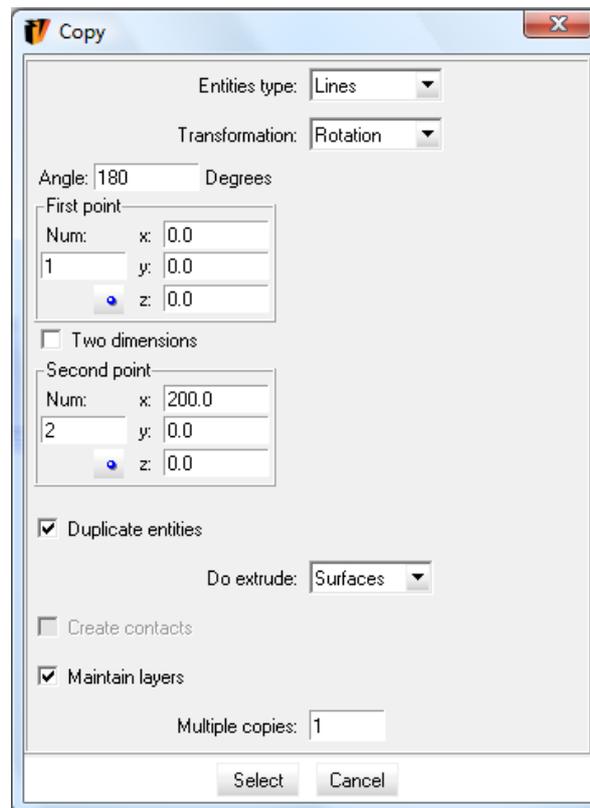


Fig 18. Ventana de Copia para la creación del perfil

2. Hacemos click en "Select" y seleccionamos todas las líneas pertenecientes a la capa "Perfil". Presionamos *ESC* para indicar que el proceso a terminado (Fig19)

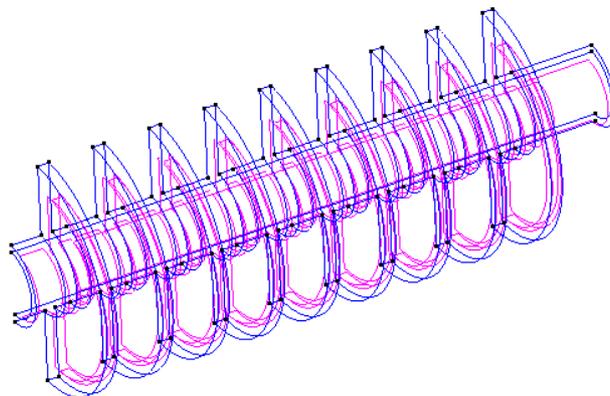


Fig.19 Copia del perfil a 180°

3. Repetimos el paso anterior pero para un valor de -180° (Fig 20)
4. Para poder visualizar de una mejor manera cambiamos a una vista diferente con la herramienta *Rotate trackball*. La cual la podemos localizar en el menú de herramientas o haciendo *click derecho con el mouse / Rotate / Trackball*
5. Para visualizar de una manera más realística utilizamos la opción *Render* localizada en el menú *View / Render / Flat*

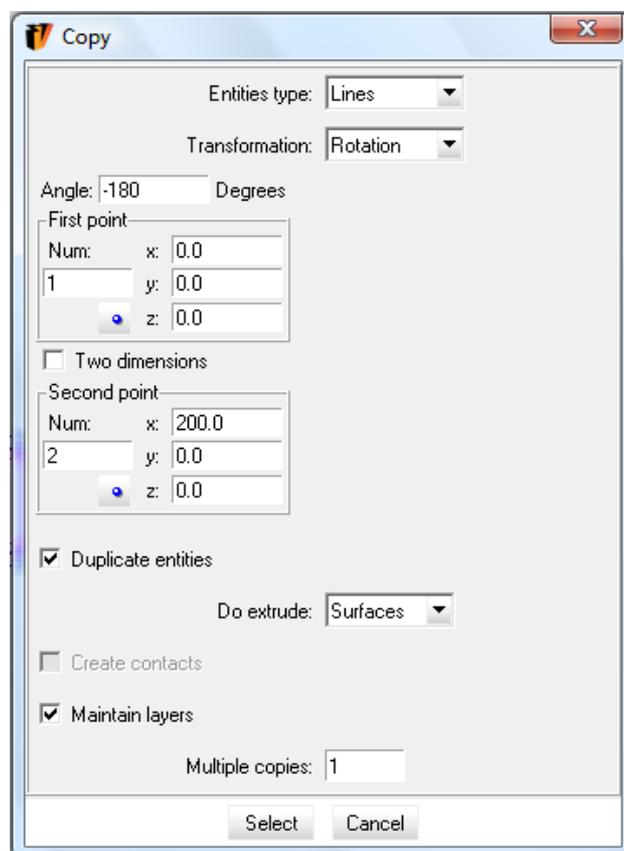


Fig20. Copia del perfil a -180°

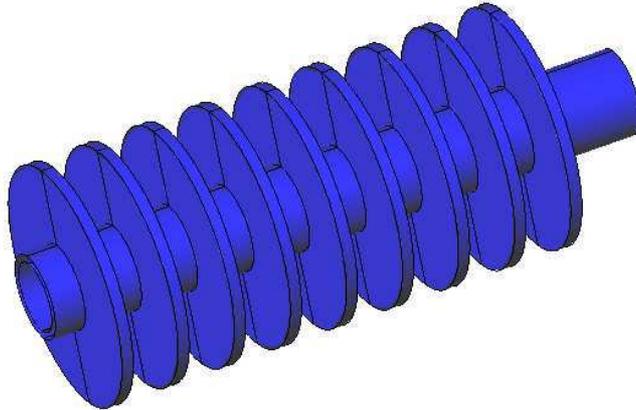


Fig. 21 Tubo con discos creado por la rotación doble del perfil

3.3. CREACIÓN DE LA UNIÓN ENTRE LOS DOS TUBOS

1. Escogemos la opción *Zoom in* desde el menú contextual de mouse o en el menú de herramientas. Y aumentamos la visibilidad del extremo derecho del modelo. (Fig 22)
2. Asegurarse que la capa "Auxiliar" este visible
3. Abrimos la ventana de copia (Ctrl+c), seleccionamos *Lines* y *Rotation* de sus respectivos menús (Fig. 22). Ingresamos 120° como valor angular. Del menú "*Do extrude*" seleccionamos *Surfaces*. (Fig 23)
4. Dado que la rotación será en dos dimensiones seleccionamos *Two dimensions*. El punto centro de rotación será el punto de rotación tangencial creado anteriormente. (Fig 23)
5. Damos click en *Select* y seleccionamos las líneas que definen el extremo derecho del tubo
6. Finalmente presionamos *ESC* para indicar que el proceso ha terminado (Fig 24)

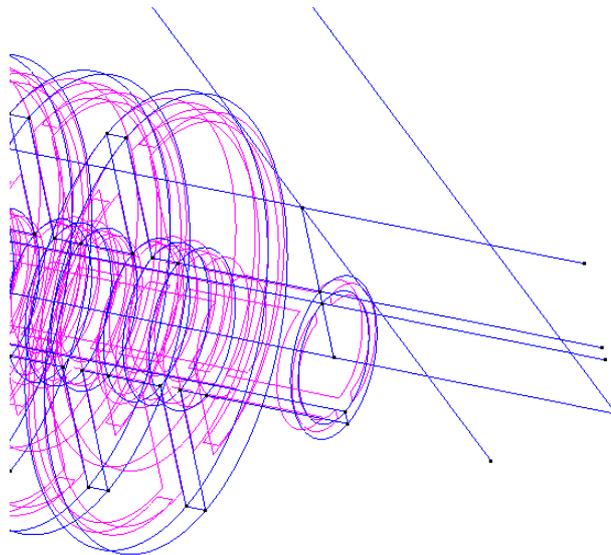


Fig 22. Acercamiento del extremo derecho del tubo

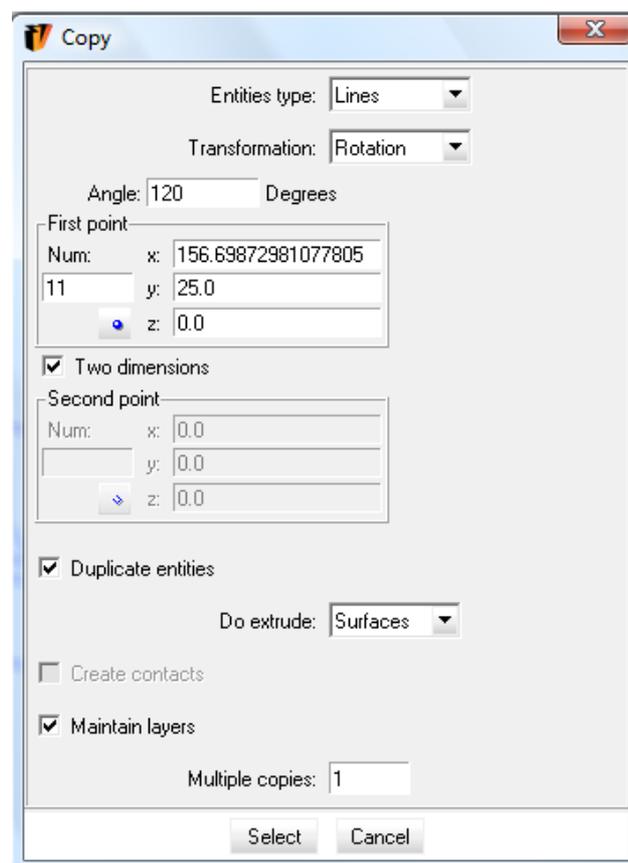


Fig. 23 Ventana de copia para crear el codo de unión entre los dos tubos

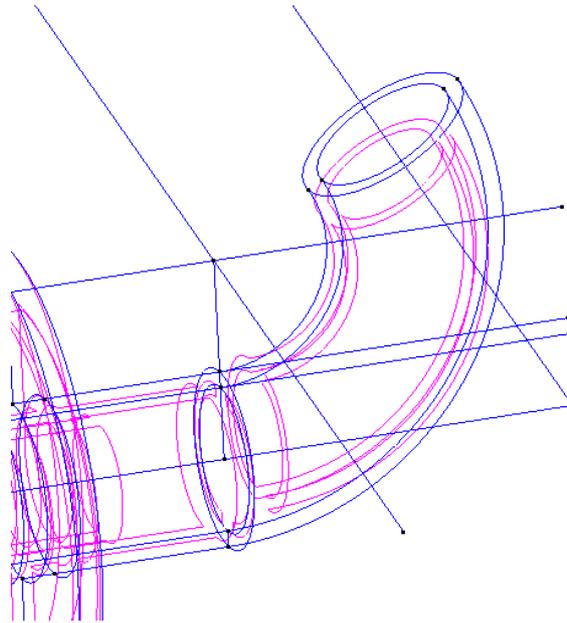


Fig. 24 Resultado de la rotación

3.4. ROTACIÓN DEL TUBO PRINCIPAL

1. Abrimos la ventana de copiar, seleccionamos *Surfaces* y *Rotación* de los respectivos menús. Damos un valor de -60 grados. (Fig. 25)
2. Seleccionamos la opción de *Two dimensions*. Como punto de rotación seleccionaremos el punto común de los dos ejes designado con las coordenadas (200,0). (Fig. 25). Se debe asegurar que la opción *Do extrude* esta desactivada
3. Damos click en el botón *Select* y seleccionamos todo lo que hemos dibujado excepto la parte del codo.

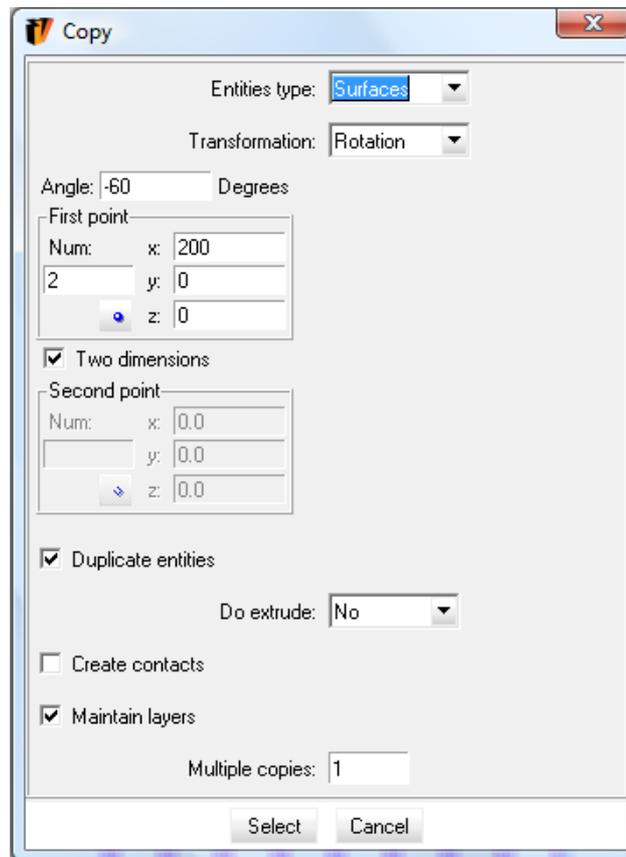


Fig. 25 Ventana de copia para la creación de la parte superior del tubo

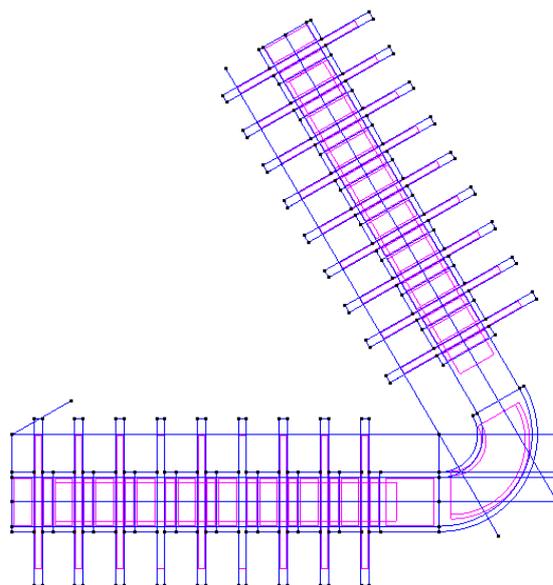


Fig. 26 Resultado de la copia de rotación a 60° del tubo principal

3.5. CREACIÓN DE EXTREMO FINAL DEL CONDUCTO

1. Abrimos la ventana de copiar (Ctrl+C). Seleccionamos *Superficies* y *Rotación* de los correspondientes menús. Ingresamos un valor de 180° y seleccionamos trabajar en dos dimensiones. (Fig 27)
2. El centro de rotación será el punto izquierdo más alto del codo. (Fig. 28). Asegurarse que la opción de “Do Extrude” se encuentre desactivada
3. Damos click en *Select* y seleccionamos las superficies que pertenecen al codo de unión entre los dos conductos.
4. Presionamos *ESC* para indicar que el proceso a terminado. (Fig. 29)

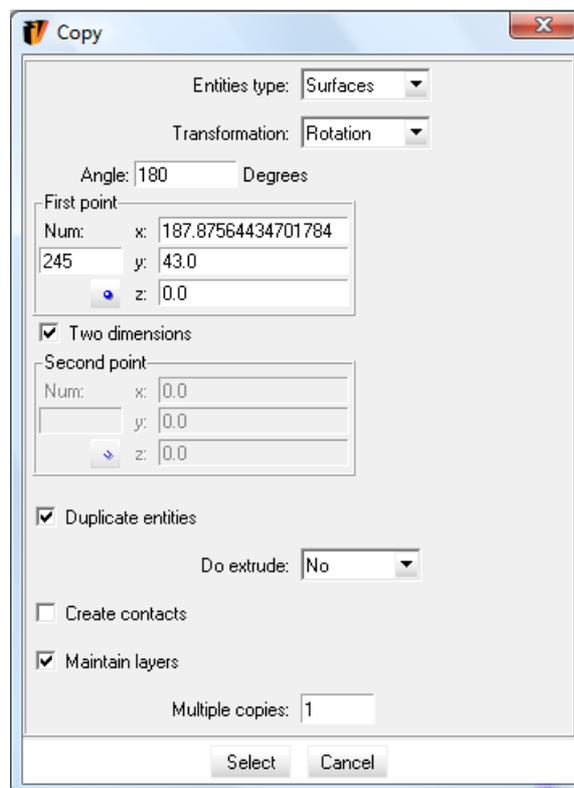


Fig. 27 Ventana de copia para la unión final del conducto

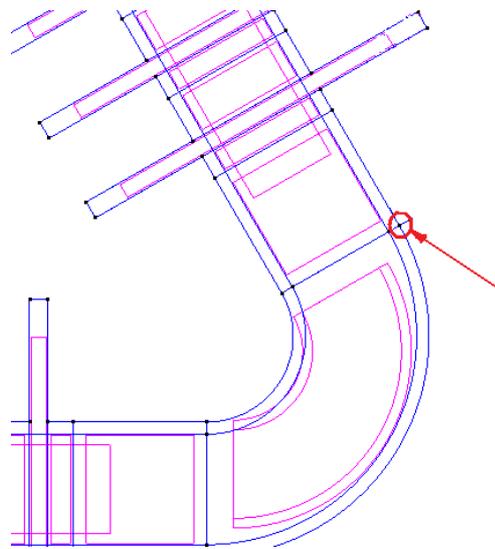


Fig. 28 Punto de rotación para copiar el codo a 180 grados

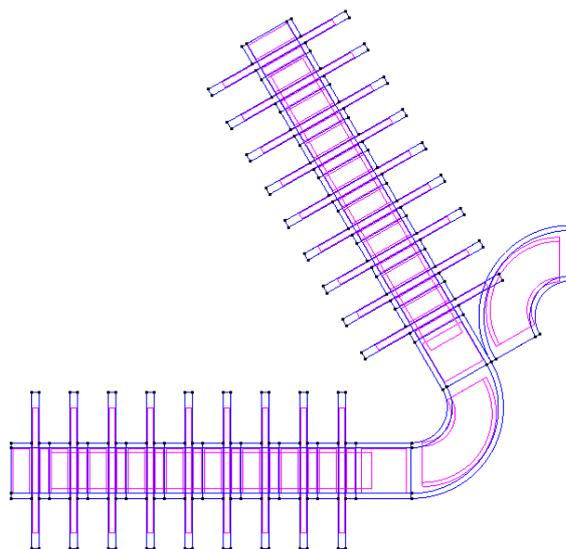


Fig. 29 Copia del codo a 180° de su posición inicial

5. Abrimos la ventana de mover (Ctrl+v). Seleccionamos *Surfaces* y *Translation*. (Fig 31)
6. Los puntos que definen el vector de traslación son el punto que sirvió como centro para la copia del codo y el punto izquierdo superior de todo el modelo. (Fig 30)

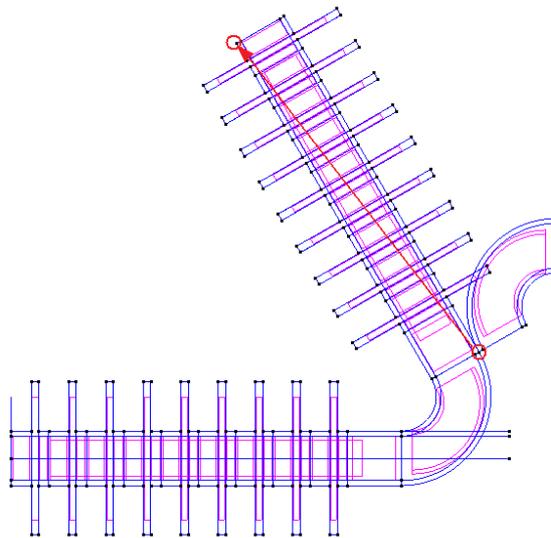


Fig. 30 Puntos que definen el vector para la traslación del codo

7. Presionamos el botón *Select* y seleccionamos la superficie del codo copiada en el anterior paso. Y finalmente presionamos *ESC* para concluir con el proceso

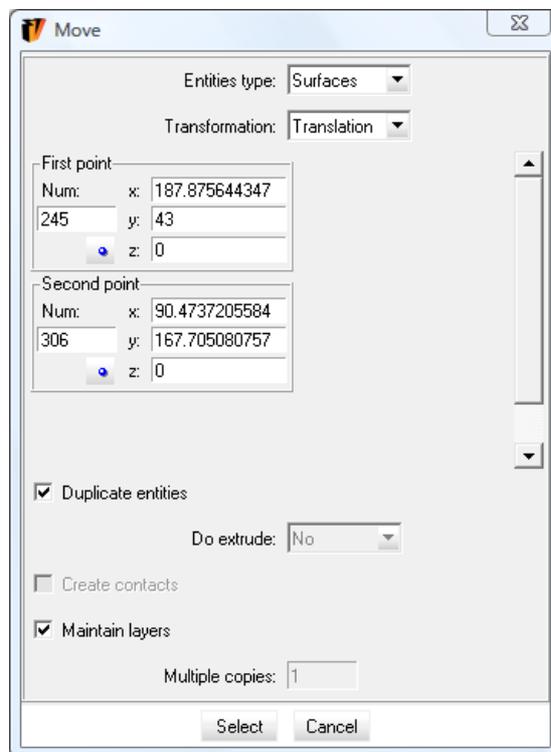


Fig. 31 Ventana de copia para la unión final del conducto

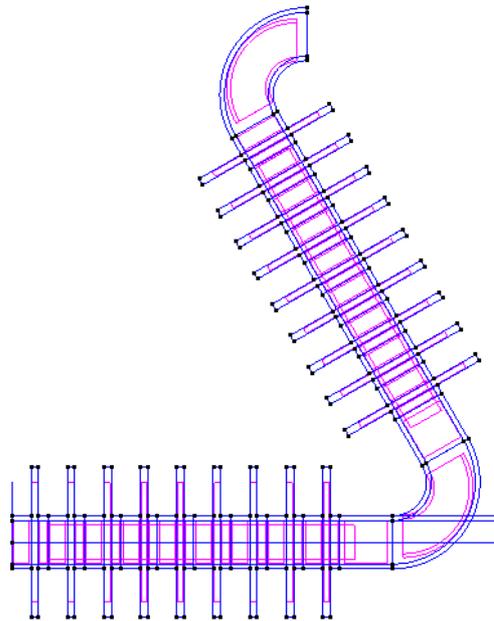


Fig. 32 Resultado final del primer componente

8. En el menú *File* damos click en *Save* y damos un nombre para guardar el archivo.

4. CREACIÓN DEL SEGUNDO COMPONENTE: UNION EN T

En esta sección se creará la unión en T por medio de la intersección de dos superficies cilíndricas, para luego ser importado al modelo original para completar la pieza

4.1. Creación de la primera de las secciones de la unión.

1. Abrimos un nuevo documento. *Files / New*.
2. Damos click en el menú *Geometry / Create / Point /* e ingresamos los puntos (0,9) y (0,11). Presionamos *ESC* para indicar que la creación de puntos ha terminado
3. Abrimos la ventana de copia (*Ctrl+c*) Seleccionamos *Points* y *Rotation* de los correspondientes menús. Ingresamos el valor de 180° para el ángulo y seleccionamos *Lines* en la opción de "*Do Extrude*". (Fig.33)

4. El eje de rotación es el eje x, entonces ingresaremos dos puntos que definan el eje x, por ejemplo (0,0,0) y (10,0,0). (Fig.33)
5. Damos click en *Select* y seleccionamos los dos puntos creados. Para terminar presionamos *ESC*
6. Repetimos el proceso, pero en esta vez ingresaremos el valor de -180° . De esta manera completaremos la circunferencia que definirá la sección del tubo
7. Nuevamente abrimos la ventana de copiar y escogemos *Lines* y *Translation*. (Fig.36) Como primer punto escogemos (0,0,0) y como segundo punto escogemos (-40,0,0). De esta manera la longitud del tubo será de 40mm
8. Seleccionamos la opción *Surfaces* en el menú desplegable "*Do extrude*". (Fig.33)
9. Presionamos *Select* y seleccionamos la circunferencia que creamos anteriormente.
10. Presionamos *ESC* para finalizar el proceso. (Fig.37)

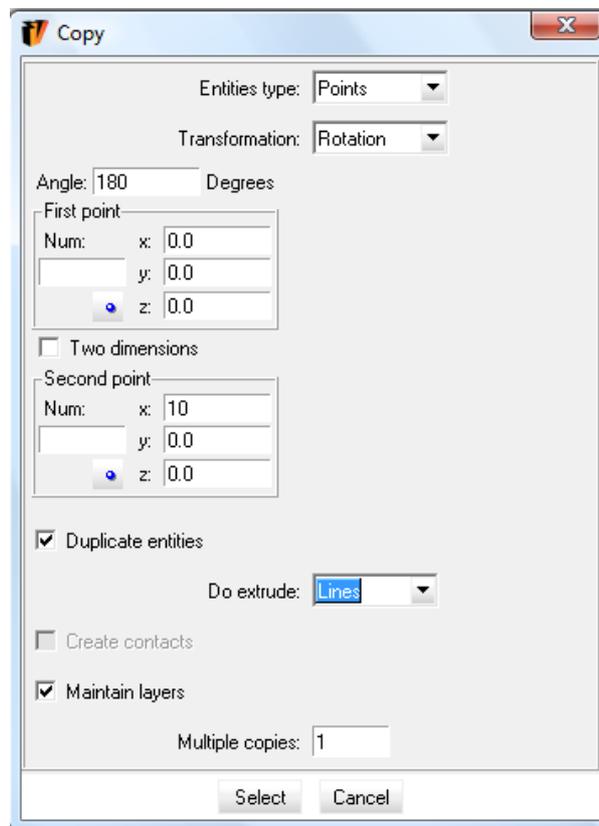


Fig.33 Ventana de copia para crear la semicircunferencia de la sección circular

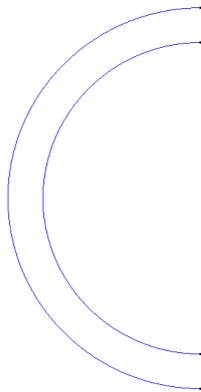


Fig.34 Resultado de la primera extrusión lineal a 180°

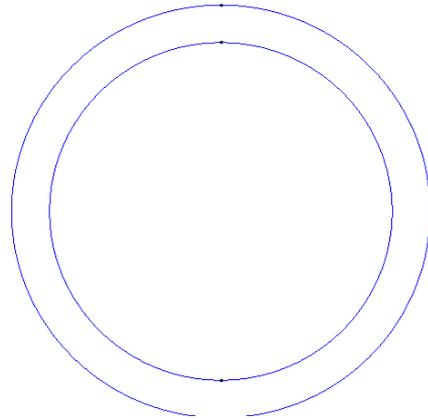


Fig.35 Resultado de la segunda extrusión lineal a -180°

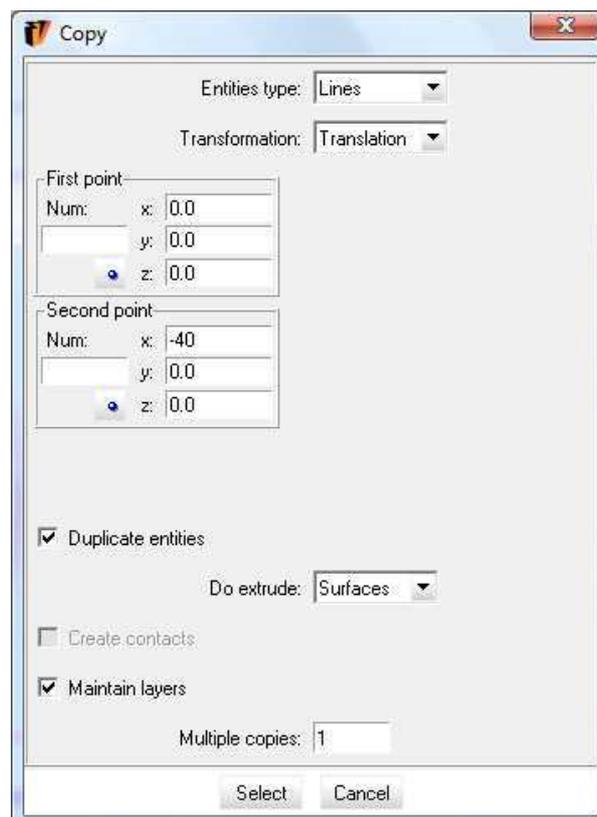


Fig. 36 Ventana de copia para la creación de la unión en T

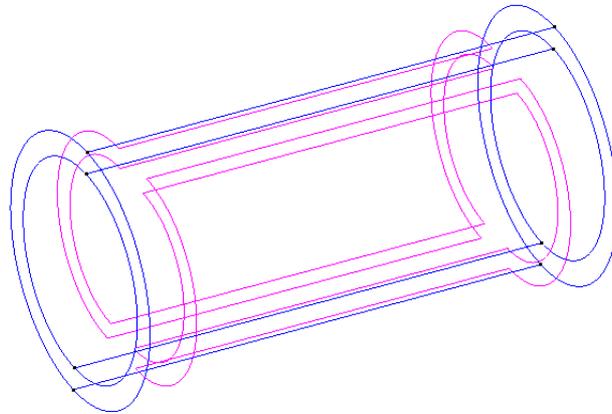


Fig. 37 Tubo resultante de la extrusión de la circunferencia

4.2. Creación de la segunda sección de la unión

1. Escogemos *Geometry / Create / Point* e ingresamos los puntos (-20,9) y (-20,11)
2. Abrimos la ventana copiar, seleccionamos *Points* y *Rotation*. Ingresamos el valor de 180° y en el menú “*Do Extrude*” seleccionamos *Lines*. (Fig. 38)
3. Dado que la rotación será realizada en el plano xy, escogemos “*Two Dimention*” y ponemos como centro de rotación el punto (-20,0,0). (Fig. 38)
4. Damos click en el botón *Select* y seleccionamos los puntos que hemos creado. Luego presionamos *ESC* para indicar que el proceso ha terminado. (Fig. 39)
5. Repetimos el mismo proceso pero ahora con un valor de -180°. Con lo cual obtendremos la segunda mitad de la circunferencia. (Fig 40)
6. Nuevamente abrimos la ventana de copia, y seleccionamos *Lines* y *Translation*. EL vector que define la traslación esta dado por los puntos (0,0,0) y (0,0,40). (Fig. 41)
7. Seleccionamos *Surfaces* del menú desplegable “*Do extrude*” (Fig. 41)
8. Damos click en select y seleccionamos las líneas que definen la circunferencia. Para concluir presionamos *ESC*

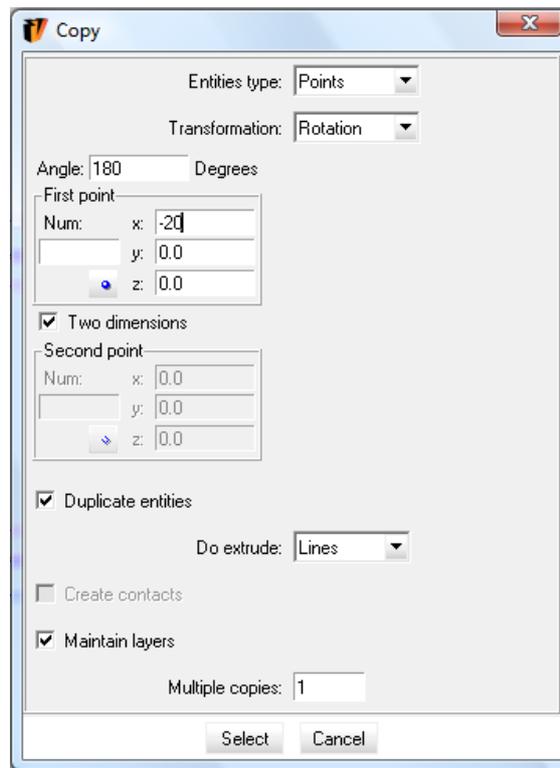


Fig. 38 Ventana de copia para crear la semicircunferencia de la unión en T

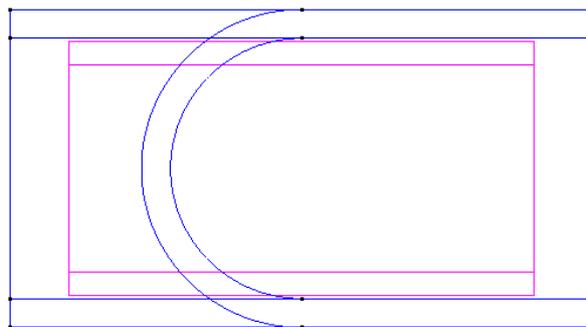


Fig. 39 Resultado de la extrusión lineal en 180° para crear la semicircunferencia

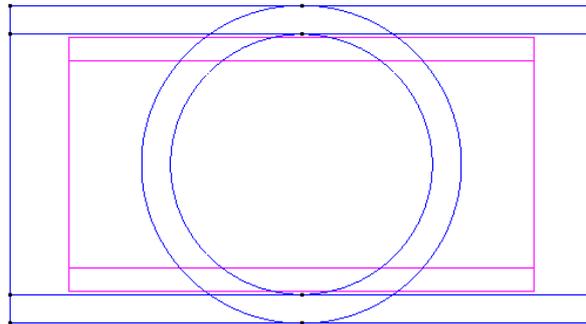


Fig. 40 Resultado de la extrusión lineal en -180° para completar la circunferencia

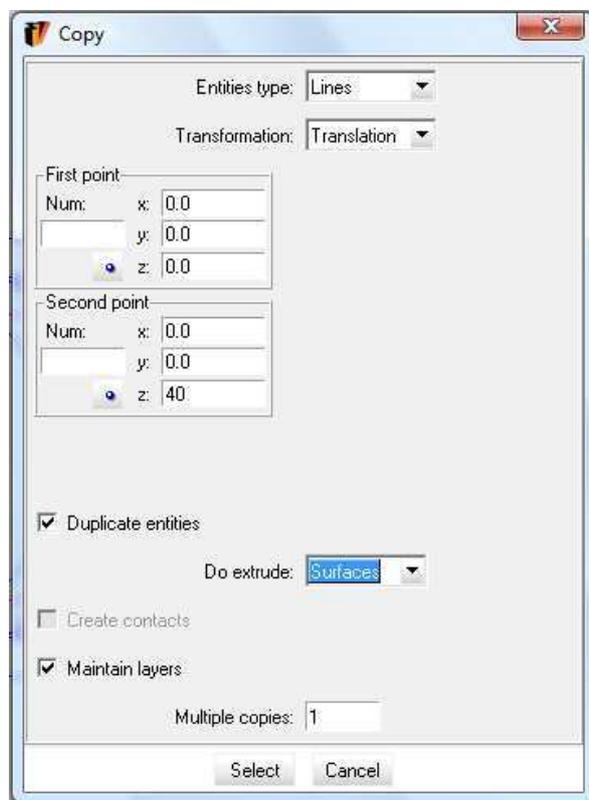


Fig. 41 Ventana de copia para la extrusión del segundo tubo de la unión en T

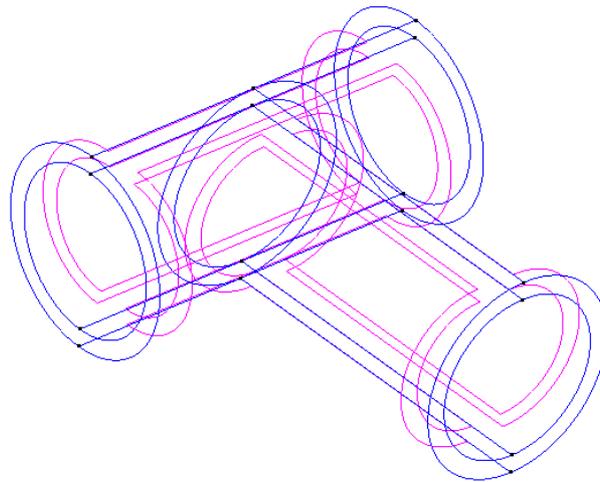


Fig. 42 Unión en T terminada

4.3. Creación de las líneas de intersección

1. Escogemos *Geometry / Edit / Intersection / Surface-surface*
2. Seleccionamos las superficies exteriores de cada tubo, de esta manera se formara la intersección de las superficies seleccionadas
3. Repetimos el proceso hasta obtener las cuatro líneas de intersección (Fig.43)

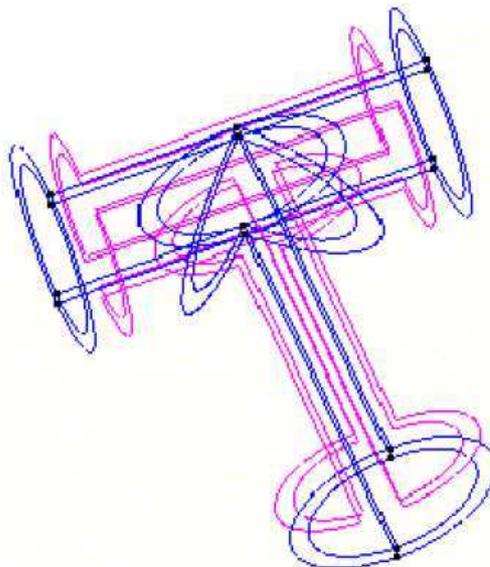


Fig. 43 Creación de las líneas de intersección entre las superficies

4.4. Eliminación de las superficies y líneas

1. Escogemos *Geometry / Delete / Surface*. Seleccionamos las superficies interiores. (Fig. 44) Presionamos Esc para concluir la operación
2. Escogemos *Geometry / Delete / Lines*. Seleccionamos las líneas que definen los extremos del segundo tubo creado, en cual se encuentra dentro del primer tubo.

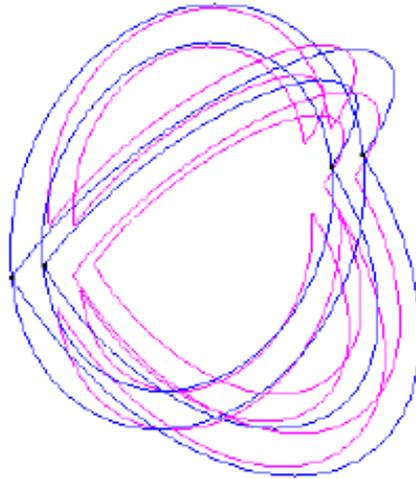


Fig. 44 Superficies que deben ser eliminadas

4.5. Cerrando el Volumen

Ahora el modelo tiene tres entradas. Las dos entradas más alejadas del origen deberán cerrarse y la tercera se conectara con el resto de la pieza al ser importada.

1. Escogemos *Geometry / Create / Nurbs Surface / By contour* y seleccionamos las dos líneas que definen las entrada. Presionamos *ESC* para concluir

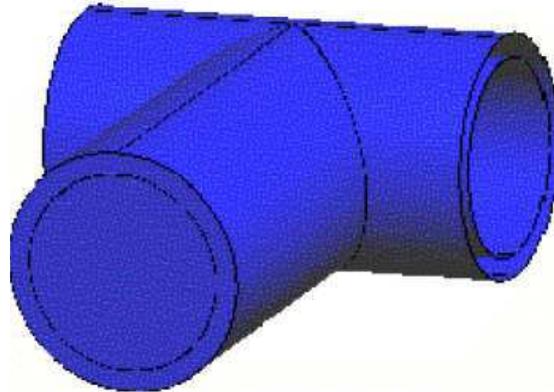


Fig. 45 Creación de una superficie NURBS en dos de los ingresos de la unión

2. Click en *Geometry / Edit / Hole NURBS surface*. Seleccionamos la superficie que acabamos de crear. Y luego seleccionamos las líneas que definen el agujero. Presionamos ESC para indicar que el proceso ha terminado. (Fig. 46)
3. Repetimos el proceso para cerrar la otra entrada.
4. Guardamos el archivo haciendo click en *File / Save*. Damos un nombre al archivo y guardamos

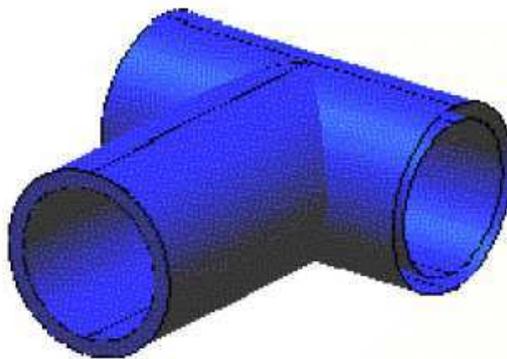


Fig. 46 Creación del agujero para cerrar una de las entradas

5. IMPORTACION DE LA UNIÓN EN T AL ARCHIVO PRINCIPAL

Ahora que tenemos dibujadas las dos partes del modelo, debemos unir las en un solo archivo para completar el volumen y luego realizar el mallado.

5.1. Importación

1. Abrimos el archivo donde queremos importar el objeto previamente creado, y nos ubicamos en la capa donde queremos colocarlo.
2. Damos click en *File / Import / Insert vulcan geometry*. Se abrirá una ventana en donde seleccionamos el archivo que vamos a importar y damos click en *Open*.

Ahora la unión en T aparecerá en la pantalla, junto con la otra parte del tubo. El extremo de unión de la tubería y de la unión en T tiene líneas en común que al momento de importar se superponen y esto no debe ocurrir por que ocasionará errores posteriores, para corregir esto hacemos lo siguiente.

3. Damos click en *Geometry / Edit / Collapse / Lines*. Seleccionamos las líneas sobrepuestas y presionamos *ESC* para terminar.

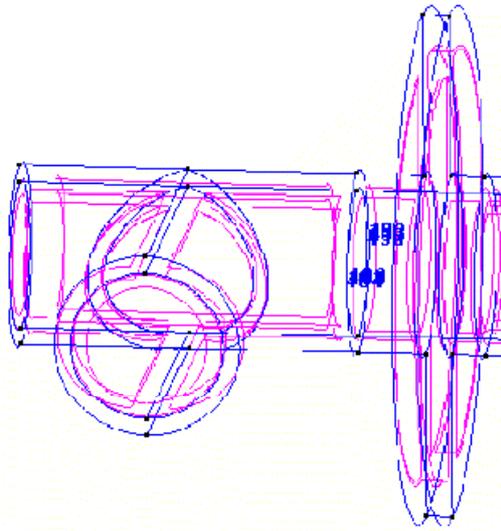


Fig. 47 Importación de la unión en T al archivo principal.
Algunos puntos están duplicados y deben ser colapsados

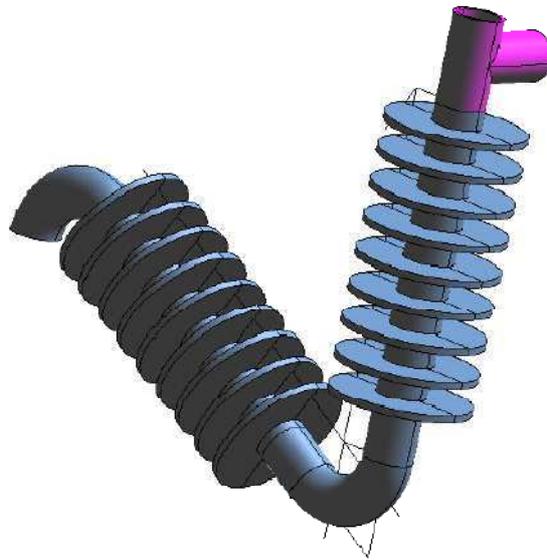


Fig. 48 Visualización del codo importado en diferente capa

5.2. Creación del volumen final

1. En la barra de menús damos click en *Geometry / Create / Volume / by contour*. Seleccionamos las superficies que definen el volumen y presionamos escape para indicar que terminamos.
2. Para visualizar el modelo de una manera más realística, escogemos *View / Render / Smooth*.

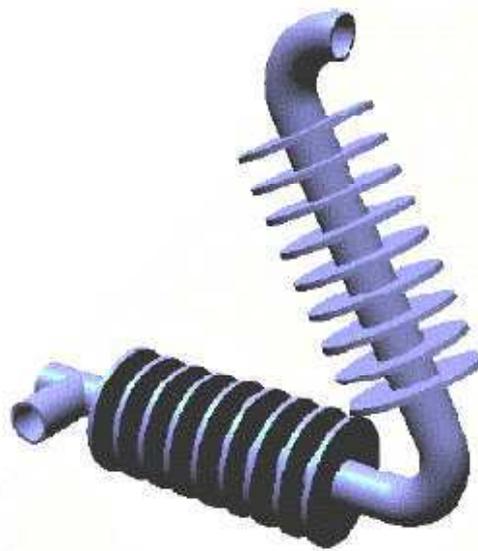


Fig. 49 Renderizado de la pieza terminada

6. MALLADO

Ahora que el modelo está terminado, está listo para mallarlo. El mallado lo realizaremos utilizando el “error de la cuerda” para alcanzar el mayor precisión en la discretización de la geometría. De esta manera los elementos mallados serán más pequeños en zonas con gran curvatura.

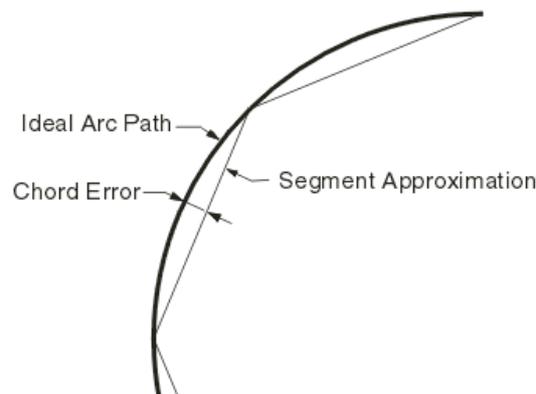


Fig. 50 Explicación ilustrativa del “error cordal”

El Error de la cuerda es la diferencia entre la sección ideal de un arco y la aproximación a este usando segmentos. A diferencia de la utilización de otro error, este se caracteriza por usar más segmentos para radios mas grandes, y menos segmentos para arcos más pequeños.

6.1. Creación de la malla usando “Chordal Error”

1. En la barra de menús damos click en *Mesh / Unstructured / By Cordal error*. Automáticamente se seleccionará el mínimo tamaño
2. El programa preguntará cual será el máximo valor para el tamaño del elemento. Ingresamos el valor de 10
3. Luego nos preguntará cual será el valor para el error. Damos un valor de 0,1
4. En la barra de menús damos click en *Mesh / Generate*. Se abrirá una ventana en donde se ingresará el valor del tamaño del máximo elemento de la malla a generarse. En este caso dejamos el valor que aparece por defecto y damos click en OK.

5. Cuando el proceso de mallado haya terminado, aparecerá una ventana de información acerca de la malla creada. Damos click en OK para cerrar esta ventana y visualizar el mallado.
6. Para visualizar el contorno del volumen mallado damos click en *Mesh / View mesh boundaries*

6.2. Creación de la malla asignando el tamaño en las superficies.

1. En la barra de menú damos click en *Mesh / Unstructured / Assign sizes on surfaces*. Aparecerá una ventana en la cual debemos ingresar el tamaño del elemento para las superficies a seleccionar. En este caso ingresamos el valor de 1
2. Seleccionamos las superficies que pertenecen al codo
3. Click en *Mesh / Generate mesh* o presionamos *Ctrl+g*. Aparecerá una ventana preguntando si deseamos eliminar la malla generada previamente. Damos click en Yes para aceptar la petición.
4. Ahora aparece una ventana en la cual se ingresa el valor del tamaño del máximo elemento. En este caso dejamos el valor que sale por defecto y damos click en OK
5. Para visualizar el contorno del volumen mallado damos click en *Mesh / View mesh boundaries*
6. De esta manera se genera una malla de elementos más pequeños y concentrados en la superficie designada.(Fig. 51)

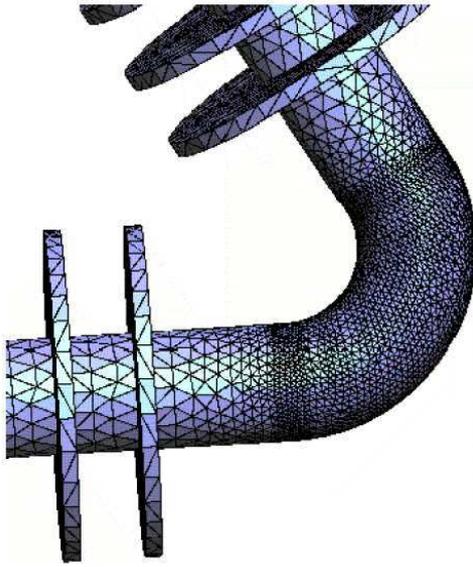


Fig. 51 Mallado concentrado en la superficie especifica