

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ARAGÓN

ANÁLISIS DE LLENADO DE UN MOLDE EN INVESTIMENTO PARA
MICRO-FUNDICIÓN CENTRÍFUGA CON ALUMINIO 6063-T5

TESIS QUE PRESENTA:
RAMÍREZ JIMÉNEZ FERNANDO

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO

ASESOR DE TESIS:
M. EN I. SABINO HENRY ESCAMILLA TOLOZA

CIUDAD NEZAHUALCOYOTL, EDO. DE MÉXICO, 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS

Mi profundo agradecimiento a todas las personas, docentes, compañeros que apoyaron mi desarrollo, directa o indirectamente dentro de la FES Aragón.

Gracias a mis padres Verónica y Fernando por apoyarme en todo momento, por los valores que me han inculcado y por haberme dado la oportunidad de acceder a una excelente educación en el transcurso de mi vida. Sobre todo, por ser un excelente ejemplo de vida a seguir. Gracias a mi hermano Alejandro por llenar mi vida de alegrías y buenos momentos

Gracias al M. en I. Henry por su apoyo en el desarrollo de esta investigación, por brindarme su amistad e impulso en el desarrollo personal y académico.

Gracias a Miroslava por su amor y por su apoyo incondicional en todo momento

Contenido

1.- ANÁLISIS DEL MOLDE PARA LA MICRO FUNDICIÓN EN MÁQUINA DE CENTRIFUGADO DENTAL	1
1.1 DATOS Y CRITERIOS NECESARIOS PARA EL LLENADO DEL MOLDE DE CRISTOBALITA PARA MICRO FUNDICIÓN UTILIZANDO ALUMINIO ASTM 6063 T5 EN MÁQUINA DE CENTRIFUGADO DENTAL.....	1
1.1.1 Criterios mínimos necesarios de la máquina de centrifugado dental.....	1
1.1.1.1 Fuerza.....	1
1.1.1.2 Aceleración.....	1
1.1.1.3 Momento angular	2
1.1.2 Datos de la máquina de centrifugado dental	2
1.1.2.1 Alojamiento de los cubiletes	2
1.1.2.2 Crisol	3
1.1.2.3 Modelos de cera.....	4
1.1.3 Aluminio ASTM 6063 T5.....	6
1.1.3.1 Viscosidad	7
1.1.3.2 Hidrógeno	9
1.1.3.3 Nitrógeno	11
1.1.3.4 Fusión.....	11
1.1.4 Inventario	12
1.2 CARACTERÍSTICAS DE LA MÁQUINA DENTAL	14
1.2.1 Descripción	14
1.2.2 Torque.....	16
1.2.3 Fuerza	21
1.2.4 Velocidad	22
1.2.5 Aceleración	23
1.2.6 Momento Angular	25
1.2.7 Energía Cinética.....	29
1.2.8 Presión	31
1.2.9 Numero de Reynolds.....	33
1.2.10 Modificaciones.....	37
1.2.10.1 Brazo	37
1.3 ANÁLISIS DE FLUJO DE ALUMINIO EN EL MOLDE DE CRISTOBALITA	39
1.4 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS.....	41
1.4.1 Cera de 1.5 mm.....	41
1.4.2 Cera de 6.35 mm.....	42
1.5 MODELOS A UTILIZAR.....	45
2.- COMPROBACIÓN DE LLENADO EN EL MOLDE DE CRISTOBALITA	48
2.1 PARÁMETROS DEL ESTUDIO	48
2.2 ECUACIONES USADAS PARA LA SIMULACIÓN.....	49
2.2.1 Ecuaciones de transferencia de calor con calor latente.....	49
2.2.2 Ecuaciones de flujo de fluidos con transición de fase	50
2.3 USO DEL PROGRAMA.....	51
2.4 SIMULACIÓN.....	52
2.4.1 Probeta de 1/8"	52
2.4.2 Probeta de 5/32"	53
2.4.3 Probeta de 1/16"	55
2.4.4 Probeta de 1/32	57
2.5 COMPROBACIÓN PRÁCTICA.....	59
2.5.1 Manufactura de moldes.....	59

2.5.1.1	Prototipo de la cámara de vacío.....	59
2.5.1.2	Preparación del molde y del investimento.....	63
2.5.1.2.1	Preparación del cubilete.	63
2.5.1.2.2	Preparación del investimento.	63
2.5.1.2.3	Desencerado.	64
2.5.2	<i>Preparación del aluminio para fundición.....</i>	<i>64</i>
2.5.3	<i>Fusión y vaciado.</i>	<i>66</i>
3.-	CONCLUSIONES.....	69
4.-	BIBLIOGRAFÍA	71

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 ALOJAMIENTO DE CUBILETES	3
FIGURA 2 CRISOLES ADMITIDOS EN MÁQUINA DENTAL.....	4
FIGURA 3 MODELOS DE CERA	5
FIGURA 4 ALAMBRE DE CERA DE 1.5MM DE DIÁMETRO.....	6
FIGURA 5 (INTERNATIONAL, 2012).....	6
FIGURA 6 (ZHANG, DU, LIU, & JIE, 1977-2015).....	8
FIGURA 7 (ASM, 1998)	13
FIGURA 8 MÁQUINA DE CENTRIFUGADO DENTAL	14
FIGURA 9 COMPONENTES DE LA MÁQUINA	15
FIGURA 10 MEDICIÓN DE TORQUE CON LA MÁQUINA DENTAL ANCLADA POR MEDIO DE TORNILLOS EN UNA MESA DE TRABAJO UTILIZANDO LOS BARRENOS DE UN TORNILLO DE BANCO.....	17
FIGURA 11 MODIFICACIÓN DE DADO PARA PODER MEDIR EL TORQUE DEL RESORTE	18
FIGURA 12 TORQUIMETRO DE CARATULA UTILIZADO	19
FIGURA 13 LECTURA OBTENIDA.....	20
FIGURA 14 MEDICIÓN DEL BRAZO CON ESCALA MILIMÉTRICA	21
FIGURA 15 CARACTERIZACIÓN DE LA MAQUINA DENTAL HACIENDO USO DE TACÓMETRO LASER MARCA UNI-T MODELO UT372	23
FIGURA 16 VECTOR DE POSICIÓN OC DEL ORIGEN DEL GIRO A LA ENTRADA DEL CUBILETE EN EL PLANO Z-Y.....	26
FIGURA 17 VECTOR DE POSICIÓN OC EN EL PLANO X-Y.	27
FIGURA 18 GRAFICA EN EXCEL DE RESULTADOS PARA EL CÁLCULO DEL MOMENTO ANGULAR CON LAS DIFERENTES COMBINACIONES DE POSICIONES QUE PUEDEN TENER TANTO EL BRAZO COMO LAS PESAS.	28
FIGURA 19 VALORES MÁXIMOS DEL MOMENTO ANGULAR EN N^*M , EL CUAL PERTENECE A LA POSICIÓN DE LAS PESAS MÁS CERCANA AL CENTRO Y A UN ÁNGULO DE INCLINACIÓN DE 170° EN SENTIDO CONTRARIO A LAS MANECILLAS DEL RELOJ.....	29
FIGURA 20 (ZHANG, DU, LIU, & JIE, 1977-2015).....	34
FIGURA 21 BRAZO SIN REFUERZOS PARA SEGURIDAD	37
FIGURA 22 GUARDA DE SEGURIDAD PARA EVITAR QUEMADURAS.....	38
FIGURA 23 MODELO PARA PRUEBA DE FLUIDEZ EN FUNDICIÓN A PRESIÓN AMBIENTE	39
FIGURA 24 ROLLO DE CERA CRESTOMATÍA	40
FIGURA 25 MODELO DE CERA PARA PRUEBA DE FLUIDEZ	40
FIGURA 26 RESULTADO DE LA ESPIRAL PARA PRUEBA DE FLUENCIA EN ALAMBRE DE CERA DE CALIBRE 1.5 MM.....	41
FIGURA 27 FALTANTE DE MATERIAL EN MUESTRA.....	42
FIGURA 28 DEFECTOS POR MOLDE "HÚMEDO" QUEDANDO LA SUPERFICIE OPACA Y POROSA.	43
FIGURA 29 MODELO PROPUESTO, YA QUE ESTE MODELO FUE UTILIZADO PARA UNA PRUEBA DE CUÁL ES EL DIÁMETRO MÍNIMO AL CUAL PUEDE LLENAR. POR LO QUE EL MODELO FINAL A UTILIZAR PUEDE TENER LIGERAS VARIACIONES.	45
FIGURA 30 PRUEBA DE LLENADO CON MODELO EN FORMA DE PALMERA	47
FIGURA 31. VARIABLES CON LAS CUALES SE REALIZA LA SIMULACIÓN.....	48
FIGURA 32 ECUACIÓN DE CALOR.	49
FIGURA 33 EDUCACIÓN USADA PARA DETERMINAR EL CALOR LATENTE LIBERADO	49
FIGURA 34 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL CALOR LATENTE NECESARIO PARA REALIZAR LA FUSIÓN.	49
FIGURA 35 MODELO USADO PARA DELIMITAR EL RANGO EN LA TEMPERATURA DE FUSIÓN.	50
FIGURA 36 ECUACIÓN SIMPLIFICADA DE NAVIER-STOKES EN FORMA SIMPLIFICADA VECTORIAL.	50
FIGURA 37 MATRIZ DE FRACCIÓN DE FASE SÓLIDA.....	50
FIGURA 38 ECUACIONES UTILIZADAS PARA LLEVAR A CABO LA SIMULACIÓN.	50
FIGURA 39 EJEMPLO DEL MODELO UTILIZADO PARA REALIZAR LAS SIMULACION.	51
FIGURA 40 TRANSICIÓN DE VELOCIDAD DEL FLUIDO EN LA PROBETA DE $5/32''$	54
FIGURA 41 ANÁLISIS TÉRMICO PARA PROBETA DE $5/32''$	54
FIGURA 42 ANÁLISIS TÉRMICO DE PROBETA DE $1/16''$	55
FIGURA 43 ANÁLISIS DE VELOCIDAD PARA PROBETA DE $1/16''$	56

FIGURA 44 ESTUDIO DE VELOCIDAD EN PROBETA DE 1/32"	57
FIGURA 45 ESTUDIO DE TEMPERATURA EN PROBETA DE 1/32"	58
FIGURA 46 PRIMER MODELO DE CÁMARA DE VACÍO	59
FIGURA 47 LECTURA DE MANÓMETRO INCLUIDO EN EL MÓDULO SMC	60
FIGURA 48 CÁMARA DE VACÍO COMENZANDO EL COLAPSO	60
FIGURA 49 CÁMARA DE VACÍO TOTALMENTE COLAPSADA	61
FIGURA 50 OTRA VISTA DEL COLAPSO	61
FIGURA 51 MOLDE RESULTANTE DE LA CÁMARA DE VACÍO	62
FIGURA 52 BURBUJA RESULTANTE DEL USO DE CÁMARA DE VACÍO.	62
FIGURA 53 MODELO DE CERA LISTO PARA PESAR.	65
FIGURA 54 MAQUINA CON CRISOL Y MOLDE.	66
FIGURA 55 FUSIÓN DEL ALUMINIO CON SOPLETE DE OXIACETILENO.	66
FIGURA 56 MAQUINA EN POSICIÓN PARA APROVECHAR EL GIRO AL MÁXIMO.....	67
FIGURA 57 PIEZA EXTRAÍDA DEL AGUA DESPUÉS DEL ROMPIMIENTO DEL MOLDE	67
FIGURA 58 PIEZA RESULTADO DEL VACIADO DEL MODELO DE 1MM.	69
FIGURA 59 PIEZA RESULTADO DEL VACIADO DEL MODELO DE 6.35 MM	69
FIGURA 60 PIEZA RESULTADO DE LA COLISIÓN POR NO PODER ENTRAR AL MOLDE.	70

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1 HIDROGENO PRESENTE A DIFERENTES TEMPERATURAS DENTRO DEL ALUMINIO (KING, 1992) 10

INDICE DE ECUACIONES.

ECUACIÓN 1 RELACIÓN ENTRE ACELERACIÓN ANGULAR Y VELOCIDAD ANGULAR DONDE: A: ACELERACIÓN ANGULAR, $\Delta\Omega$: CAMBIO EN LA VELOCIDAD ANGULAR, ΔT : CAMBIO EN EL TIEMPO.....	1
ECUACIÓN 2 SEGUNDA LEY DE NEWTON	2
ECUACIÓN 3 LEY DE HOOKE.....	16
ECUACIÓN 4 TORQUE ACUMULADO POR EL RESORTE TORSIONAL	20
ECUACIÓN 5 MOMENTO PAR VECTORIAL (BEER, JOHNSTON, & EISENBERG, 2007)	21
ECUACIÓN 6 MOMENTO PAR ESCALAR	21
ECUACIÓN 7 SUSTITUCIÓN DE ECUACIÓN 4.....	21
ECUACIÓN 8 FUERZA GENERADA POR EL RESORTE TORSIONAL.....	22
ECUACIÓN 9 SEGUNDA LEY DE NEWTON	23
ECUACIÓN 10 SUSTITUCIÓN DE VARIABLES CONOCIDAS.....	24
ECUACIÓN 11 ACELERACIÓN GENERADA POR LA FUERZA DEL RESORTE TORSIONAL.....	24
ECUACIÓN 12 FUERZA G DESARROLLADA POR LA DESCOMPRESIÓN DEL RESORTE TORSIONAL.....	24
ECUACIÓN 13 ACELERACIÓN NORMAL PARA EL PUNTO DE MÁXIMA VELOCIDAD ANGULAR	25
ECUACIÓN 14 VALOR PARA ACELERACIÓN TANGENCIAL.....	25
ECUACIÓN 15 VALOR PARA ACELERACIÓN EN RELACIÓN CON ACELERACIÓN DE LA GRAVEDAD.	25
ECUACIÓN 16 PARA CÁLCULO DE ENERGÍA CINÉTICA	29
ECUACIÓN 17 REDUCCIÓN DE ECUACIÓN PARA EL CÁLCULO DE LA ENERGÍA CINÉTICA.....	30
ECUACIÓN 18 RESULTADO DE CÁLCULO DE ENERGÍA CINÉTICA.	30
ECUACIÓN 19 ANÁLISIS DE UNIDADES.....	30
ECUACIÓN 20 CALCULO DE ENERGÍA CINÉTICA MEDIANTE MOMENTO ANGULAR Y VELOCIDAD ANGULAR.	30
ECUACIÓN 21 ECUACIÓN BERNOULLI	31
ECUACIÓN 22 CALCULO DE PRESIÓN POR MEDIO DE ECUACIÓN DE BERNOULLI	31
ECUACIÓN 23 INCONGRUENCIA CON ANÁLISIS DE UNIDADES.	32
ECUACIÓN 24 ANÁLISIS DE UNIDADES CON ENERGÍA CINÉTICA CON RELACIÓN A LA MASA.....	33
ECUACIÓN 25 ANÁLISIS DE UNIDADES CORROBORANDO EL RESULTADO OBTENIDO.....	33
ECUACIÓN 26 RESULTADO DE PRESIÓN GENERADA POR LA MÁQUINA CENTRIFUGA DENTAL.	33
ECUACIÓN 27 NUMERO DE REYNOLDS	34
ECUACIÓN 28 CALCULO DE NUMERO DE REYNOLDS PARA FLUJO DEL ALUMINIO GENERADOS POR LA MAQUINA CENTRIFUGA DENTAL	35
ECUACIÓN 29 ANÁLISIS DIMENSIONAL PARA CALCULO DE NUMERO DE REYNOLDS	35
ECUACIÓN 30 VOLUMEN INICIAL ES IGUAL A VOLUMEN FINAL.....	46
ECUACIÓN 31 EQUIVALENCIA DE VOLUMEN CON MASA Y DENSIDAD	46
ECUACIÓN 32 RELACIÓN DE MASAS Y DENSIDADES PARA OBTENER EL GRAMAJE DE LA PIEZA FINAL.....	46
ECUACIÓN 33 RESULTADO DE LA MASA A USAR EN EL ENSAYO.	46
ECUACIÓN 34 EXPRESIÓN USADA PARA LOS PROCESOS DE FORJA Y FUNDICIÓN.....	64
ECUACIÓN 35 RELACIÓN ENTRE VOLUMEN FINAL Y VOLUMEN INICIAL EN FUNCIÓN DE LA MASA.....	65

INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se analiza el comportamiento del flujo de aluminio 6063 T5 dentro de los canales de llenado en moldes de cristobalita, usado como investimento cerámico, este material tiene propiedades físicas que le permiten soportar fundiciones de alta temperatura. El proceso de llenado es través de micro fundición centrífuga la cual se realiza en una máquina centrífuga para piezas dentales, con la finalidad de conocer el diámetro y la longitud mínimas para los canales de alimentación del molde en la cual aún es posible realizar un llenado completo del molde a través de la comparación de un modelo matemático propuesto y la simulación de llenado con software de dinámica computacional de fluidos (CFD por sus siglas en inglés), para comprobar la aproximación del modelo con parámetros reales, esto genera un antecedente para el estudio y aplicación de la fundición centrífuga para generar modelos con mayor detalle y calidad utilizados principalmente en joyería, ya que son reducidas las fuentes de información para este tipo de proceso de fundición centrífuga.

En el primer capítulo se presenta el modelo matemático correspondiente a la caracterización de una máquina de centrifugado dental ubicada en los Laboratorios L1 de la FES Aragón, con la finalidad de obtener los parámetros más importantes a utilizar en el llenado del molde haciendo hincapié en los fundamentos físicos que lo sustentan y conocer las dimensiones mínimas a las cuales aún se logra una pieza de calidad. El estudio del mecanismo es a través de las ecuaciones de movimiento para encontrar la configuración en la cual se presenta más aceleración para el molde y así beneficiar el llenado.

En el segundo capítulo se reporta el procedimiento de manufactura de los moldes. Los modelos utilizados y la comprobación de los datos obtenidos en el primer capítulo, se realizan a través de un software de CFD (COMSOL Multiphysics), en tres ensayos diferentes con las mismas condiciones para tener parámetros de comparación y se manifiestan los resultados obtenidos.

OBJETIVO GENERAL:

Analizar el llenado de un molde de investimento con un flujo de Aluminio 6065 T5 en un proceso de micro fundición centrífuga, para conocer el diámetro y longitud mínimos de los canales de alimentación que se pueden llenar mediante la caracterización matemática de una máquina de centrifugado para piezas dentales, perteneciente al laboratorio L1 de diseño y manufactura, de la FES Aragón.

1.- Análisis del molde para la micro fundición en máquina de centrifugado dental

1.1 Datos y criterios necesarios para el llenado del molde de cristobalita para micro fundición utilizando aluminio ASTM 6063 T5 en máquina de centrifugado dental

1.1.1 Criterios mínimos necesarios de la máquina de centrifugado dental

1.1.1.1 Fuerza

La fuerza es la piedra angular para la caracterización de la máquina de centrifugado para piezas dentales, ya que a partir de las leyes de Newton se puede relacionar la fuerza con las demás variables necesarias para el análisis.

La fuerza del giro en el llenado nos permite conocer la presión que se genera en los canales del molde, partiendo de que los canales son de área constante, se puede calcular la fuerza. Para impulsar una masa se requiere de una aceleración la cual, en este estudio, se obtiene con la medición de un tacómetro digital y la masa es una variable que se puede medir al fabricar el modelo. La velocidad angular se puede calcular mediante ecuaciones de movimiento, que la relacionen con la aceleración angular.

$$\alpha = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{t_2 - t_1}$$

Ecuación 1 Relación entre aceleración angular y velocidad angular donde: α : aceleración angular, $\Delta\omega$: cambio en la velocidad angular, Δt : cambio en el tiempo.

La deducción de esta fuerza, ayudara a limitar el alcance en cuanto dimensiones de los modelos. Mediante los ensayos de fluidez se delimita el tipo de formas que se pueden manufacturar.

En el movimiento centrifugo, implican dos fuerzas: centrífuga y centrípeta. Mediante un análisis a la máquina se puede deducir su valor y si es afectado o beneficiado el llenado. Así mismo, que tanto es afectado por la articulación con la que cuenta el brazo, los contrapesos y si la posición del ángulo aumenta o disminuye la fuerza del giro.

1.1.1.2 Aceleración

Es uno de los principales criterios necesarios para deducir un buen llenado de moldes ya que por la segunda ley de newton: la aceleración de un objeto es directamente proporcional a la fuerza neta que actúa sobre él e inversamente proporcional a su masa.

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

Ecuación 2 Segunda Ley de Newton

Este criterio será obtenido mediante la deducción de la fuerza y la masa del sistema que estará en movimiento. En este caso será la masa del brazo de la centrifuga dental.

Dado que el movimiento es circular se generarán aceleraciones normales y tangenciales las cuales con un análisis se deducirá cuál de las dos es más importante para el llenado y si son afectadas por el ángulo de inclinación del brazo articulado.

Serán deducidas a través de ecuaciones de dinámica una vez obtenido el valor de la aceleración.

1.1.1.3 Momento angular

El cálculo del momento angular tiene una relevancia para deducir cuanta energía es generada durante el giro del brazo de la máquina, que tanto es afectado por diferentes posiciones de los contrapesos y en qué punto se tiene máxima energía disponible, nos ayudara a determinar la configuración en la cual la energía cinética es máxima y por lo tanto se obtiene la velocidad máxima del fluido a la cual se inyecta dentro del molde de cristobalita, de esta manera se conoce la presión para posteriormente, analizar el movimiento mediante ecuaciones de mecánica de fluidos como las ecuaciones de Navier-Stokes.

1.1.2 Datos de la máquina de centrifugado dental

Estos datos son las características de la máquina y son constantes que nos permitirán conocer las dimensiones de los modelos a utilizar, los cubiletes y crisoles ayudando a marcar los límites y centrar el alcance de esta investigación.

1.1.2.1 Alojamiento de los cubiletes

Este criterio nos marca los límites de los cubiletes que pueden ser utilizados en la máquina y por ende delimita los tamaños de los modelos a ser revestidos en cristobalita.

También es importante recalcar que el análisis práctico nos permitirá observar si la forma que tiene es adecuada para la seguridad o será necesario manufacturar una barrera para protección en caso de evitar que por alguna extraña razón como puede ser el mal cálculo de material a fundir o un defecto en el vaciado del investimento pueda detonar en que el material salga disparado provocando una quemadura en

alguien cercano a la inyección, por ese motivo se planea trabajar con equipo de seguridad y el menor público presente a manera de disminuir el riesgo por quemadura.

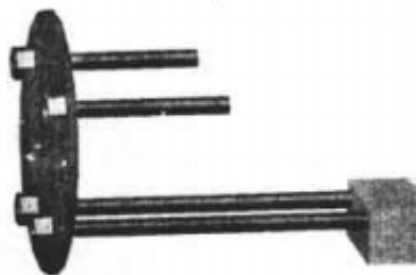


Figura 1 Alojamiento de cubiletos

1.1.2.2 Crisol

El crisol para el cual tiene alojamiento la máquina es de tipo joyero y serán utilizados hechos en barro ya que este material tiene una buena resistencia a altas temperaturas, siendo de fácil obtención ya que no se necesita una tienda especializada ya que pueden ser conseguidos tanto en tiendas de materiales para joyeros como en depósitos dentales y son de bajo coste. pudiendo utilizar de dos tamaños como se observa en la ilustración.

Los crisoles deberán ser sometidos a un proceso en el cual serán curados haciendo uso de sal de bórax para evitar que el material se deposite en los poros del barro ya que el bórax al ser calentado a altas temperatura tiende a vitrificar y crea una capa de esmalte el cual ayuda al metal a fluir sin quedar atrapado en los poros del barro además de funcionar como aislante y ayudar a mantener la temperatura y con eso conservar la viscosidad necesaria para obtener una buena inyección del metal en el molde. Este procedimiento también es vital para evitar que el crisol se agriete o resquebraje por lo cual, si se quiere cuidar el crisol, es una acción más que necesaria.



Figura 2 Cisoles Admitidos En Máquina dental

1.1.2.3 Modelos de cera

Los modelos de cera son una parte medular de esta investigación ya que a partir de pruebas prácticas se deducirá el área mínima a la cual el aluminio ASTM 6063 T5 aún puede fluir dentro del molde de investimento.

Es necesario conocer la densidad de la cera a utilizar para hacer un correcto cálculo del material a fundir y que no sobre pase el límite de seguridad. En este caso la cera que se utilizara es cera toda estación, que es la misma que utilizan los dentistas para realizar sus modelos. La densidad de esta cera es de $900 \frac{kg}{m^3}$.

Esta cera tiene un bajo punto de fusión con lo cual se facilita el trabajo para moldear ya que con la temperatura de las manos la cera se ablanda resultando en el menor uso de herramientas para moldear como estiques. Aunque eso no las excluye del trabajo ya que para formas un poco más complejas o detalladas es necesario el uso de herramientas para dar forma.

Para realizar las uniones entre el modelo y los canales de distribución se hace por medio de un flamín y una espátula lecrón la cual se calienta y hace contacto con la cera fundiéndola y soldando las piezas; Pero se puede también realizar haciendo uso de una máquina de soldaduras para cera la cual tiene el mismo principio de trabajo que un caudín, solo que las puntas son de mucho menor tamaño.

Para trabajar las piezas de cera es necesario tener una peana y saber el peso de la misma para ser descontado al momento de pesar los modelos, los modelos por seguridad no deben sobre pasar los 7 gr.

La forma de trabajar es colocando en el orificio de la peana un poco de cera, esta pieza será el bebedero por donde se inyectará el material, esta pieza no debe ser

menor de un octavo ya que el aluminio solidificaría antes de llenar el molde con lo que se haría un tapón que no llenaría del todo el mismo.

Sobre ese bebedero se comienza a desarrollar el modelo, teniendo en consideración que debe estar separado de la pared del cubilete por lo menos 5 mm para evitar que pueda perforar el cubilete, y tener por lo menos 10 mm de separación respecto al nivel al que se llenara el cubilete para evitar que la velocidad del fluido pudiera romper la pared del investimento, generando que el metal saliera disparado.



Figura 3 Modelos de Cera

Ya que la cera toda estación viene en presentación de laminillas o bloques cuadrados no puede ser utilizada para los ejercicios de fluidez, aunque para estos ejercicios se utilizará cera que proviene de un proceso de extrusión por lo cual sus diámetros están perfectamente calibrados siendo el más pequeño de 1.5 mm y el más grande de 5 mm, esta cera tiene la misma densidad que la anterior de $900 \frac{kg}{m^3}$ ya que también es utilizada por los dentistas para hacer “cueles” coloquialmente conocidos por ellos y que no son más que los canales de distribución utilizados para el llenado de sus modelos.



Figura 4 Alambre de cera de 1.5mm de diámetro

1.1.3 Aluminio ASTM 6063 T5

De acuerdo a ASTM, haciendo uso de sus estándares para la aleación 6063 T5 que será utilizada en los ensayos prácticos está compuesta por:



TABLE 1 Chemical Composition Limits ^{A,B,C}

Alloy	Silicon	Iron	Copper	Manga- nese	Magne- sium	Chromium	Zinc	Vanadium	Titanium	Other Elements ^D		Aluminum
										Each	Total ^E	
6063	0.20-0.6	0.35	0.10	0.10	0.45-0.9	0.10	0.10	...	0.10	0.05	0.15	remainder

Figura 5 (International, 2012)

Como se puede observar en la tabla anterior extraídas de la norma ASTM la cual nos muestra la composición en porcentajes máximos y mínimos de los elementos que conforman la aleación, por medio del análisis práctico observaremos si es adecuado su uso en micro fundición centrífuga o afectara su composición tanto en puntos de fusión como en su viscosidad.

Una de las principales razones para usar aluminio radica que este material es de uso corriente en las prácticas de fundición impartidas en los laboratorios de

manufactura de FES Aragón por lo cual se cuenta con una experiencia previa en su manejo.

Por la masa necesaria para los modelos de cera es posible hacer uso de la viruta desechada de los tornos que se encuentran en los laboratorios de la FES Aragón para ser fundida, aunque esta práctica puede no ser la más recomendable ya que por los espesores tan pequeños que se tiene el material podría no solo fundirse sino terminar convertido en escoria y además de llenarse de hidrogeno el cual formaría burbujas al solidificar ocasionando una fundición de mala calidad por calentamiento excesivo y por prescindir de desgasificante. Por lo cual su uso se decidirá a partir de una prueba de fusión para saber qué tan viable es el uso de la misma.

Otra razón para hacer uso de esta aleación es por sus buenas propiedades para ser conformado por procesos en caliente, las cuales lo dotan de un buen acabado y de correcto acabado en la superficie, con buen color y brillo. Puede ser anodizado para muchas aplicaciones.

El dato del punto de fusión del aluminio obtenido anteriormente puede ser afectado ya ese valor corresponde a aluminio puro (designación ASTM familia 1xxx). En el caso de esta investigación se usará una aleación de la cual puede variar su punto de fusión por contener otros metales como magnesio, manganeso, zinc, acero, titanio y silicio.

La cual puede resultar en un punto de fusión mayor o menor, necesitar condiciones de fusión con diferente tipo de flama oxiacetilénica o el uso de un fundente. Por lo tanto, esas características serán obtenidas conforme la experimentación práctica avance.

1.1.3.1 Viscosidad

La viscosidad se usa para describir la resistencia del fluido al flujo, y es la relación entre el esfuerzo cortante y el gradiente de velocidad. Por lo tanto, la viscosidad es una propiedad física muy importante de las fundiciones, para la simulación de solidificación del metal fundido en la industria en la arena y el modelado asociado con el flujo de fluido. En general, la viscosidad varía con la temperatura y composición del líquido y puede ser medido utilizando técnicas experimentales, como el capilar y los métodos oscilantes del recipiente. (Zhang, Du, Liu, & Jie, 1977-2015)

La deducción de la viscosidad del aluminio nos permitirá hacer un análisis más detallado de su movimiento dentro del molde de cristobalita por medio de ecuaciones de dinámica de fluidos en este caso se utilizará Navier-Stokes, además como se hará uso de un programa computacional es una variable necesaria para el análisis de CFD.

En este caso se carecen de los instrumentos para realizar una prueba de viscosidad del aluminio 6063 T5 por esa razón el valor fue obtenido mediante investigación, se obtuvo un diagrama completo en el cual se ilustran los diferentes valores de la viscosidad del aluminio obtenidos por diferentes investigadores, es una gráfica de un promedio. Esos datos serán utilizados en los cálculos de la investigación.

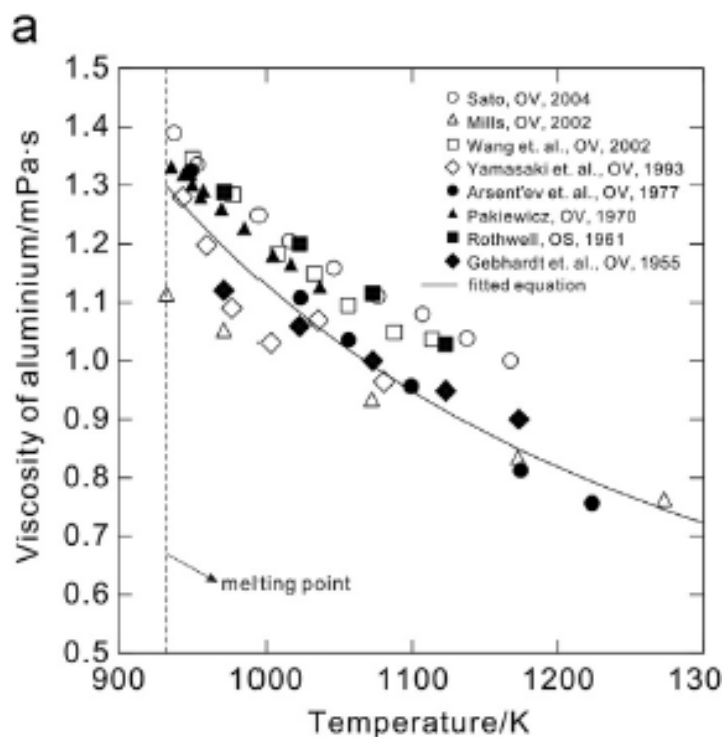


Figura 6 (Zhang, Du, Liu, & Jie, 1977-2015)

Del gráfico que se muestra en la figura 6 se obtiene el valor de la viscosidad del aluminio al 99.99% el cual es igual a 660.2°C o 933.35K y el calor necesario para llegar al punto de fusión es de 10 800J (2480 calorías) por gramo átomo (29.99g) o $387 \frac{J}{g}$ (King, 1992)

1.1.3.2 Hidrógeno

El aluminio y sus aleaciones son muy susceptibles a absorber hidrógeno durante la fusión y la colada. Debido a que la solubilidad del hidrógeno en el aluminio se incrementa exponencialmente al aumentar la temperatura, una gran cantidad de hidrógeno es captado por el metal durante la etapa de fusión y expulsado durante la solidificación formando burbujas; un porcentaje de éstas salen a la atmósfera, pero la cantidad remanente permanece en el aluminio causando porosidades en la pieza sólida.

El aluminio no se combina con el hidrógeno, pero este se disuelve tanto en el estado metálico sólido como en el líquido. El efecto de la temperatura sobre la absorción del hidrógeno por el aluminio viene dado en la tabla 1

En algunas aplicaciones industriales se utilizan gases como el nitrógeno y el argón, Los desgasificantes tradicionales (cloro, hexacloroetano y diclorodifluorometano (Freón 12)), tienden a ser sustituidos debido a su alta emisión de contaminantes, impulsando el desarrollo de nuevos métodos de desgasificación, tales como el uso de gases inertes que tienen una influencia directa en el aumento de calidad del producto y una completa eliminación de los gases contaminantes.

Este tipo de desgasificación no puede ser aplicada a este proyecto ya que el metal a fundir es muy poco como para tener un dispositivo que ayude a liberar el hidrógeno presente en la fusión.

	Temperatura metal °C	del Solubilidad del hidrógeno ml/100g Al	A un % de
	300	0.001	2.2×10^{-7}
	400	0.005	1.1×10^{-6}
	500	0.0125	2.8×10^{-6}
Sólido	660	0.036	8.1×10^{-6}
Fundido	660	0.69	1.55×10^{-4}
	700	0.92	2.07×10^{-4}
	750	1.23	2.77×10^{-4}
	800	1.67	3.74×10^{-4}
	900	2.80	6.1×10^{-4}
	1000	4.8	8.95×10^{-4}
	1000	5.2	11.6×10^{-4}

Tabla 1 Hidrógeno presente a diferentes temperaturas dentro del aluminio (King, 1992)

La cantidad disuelta aumenta con rapidez al incrementar la temperatura del metal fundido. Para obtener vaciados sin defectos ni porosidad causada por el gas, es preciso evitar el sobrecalentamiento del metal fundido y emplear tratamientos especiales para desgasificar. (King, 1992)

Debido a que se hará micro fundición no podemos hacer uso una pastilla desgasificante completa por lo cual será molida y la adicionaremos con una cuchara. La reacción generada por la pastilla libera ácido clorhídrico por lo cual se debe hacer en un área bien ventilada y con el equipo de PP pertinente.

Este procedimiento es necesario para obtener una pieza de calidad ya que al estar presente el hidrógeno, las burbujas de este se quedan atrapadas durante la solidificación por lo cual queda una pieza porosa y de mala calidad sin las mismas propiedades mecánicas que tiene el aluminio 6063 T5.

1.1.3.3 Nitrógeno

El aluminio se combina con el nitrógeno para producir nitruro de aluminio (AlN), el cual es un sólido duro. La formación de este compuesto se origina por sobrecalentamiento en la fusión. Su presencia en los productos vaciados o forjados resulta perjudicial para las propiedades. Se utiliza la filtración del metal fundido para evitar inclusiones de este tipo. (King, 1992)

De acuerdo a Frank King en su libro el aluminio y sus aleaciones, es riesgoso para el acabado de las piezas el sobre calentar el aluminio fundido por lo cual se tratará de evitar en lo posible la excesiva adición de calor una vez fundido el aluminio 6063 T5

Dado que el aluminio 6063 T5 que se utilizará no tiene pureza de 99.99% y debido a la falta de equipo graduado no se podrá hacer más que una aproximación a la temperatura real a la que se fundirá el aluminio por esta razón y debido a que se carecen de filtros, existe una elevada probabilidad de que se tengas piezas con inclusiones de nitruro de aluminio, el cual, afectaría si fueran piezas sometidas a cargas, pero como ese no es el objetivo la inclusión de AlN carece de sentido.

1.1.3.4 Fusión

Dadas las propiedades del aluminio, su punto de fusión y que la cantidad a utilizar es muy poca (menor a 15 gr por razones de seguridad), no puede ser fundido en el horno de gas ubicado en el laboratorio de manufactura L1.

El procedimiento para fundirlo será colocando el material en pequeños trozos dentro del crisol de barro y aplicando una flama con un soplete de gas. Por su punto de fusión un poco elevado, con un soplete de gas LP se necesitaría adición de aire comprimido, del cual se carece de conexión en el área de fundiciones del laboratorio L1 de la FES Aragón, por lo cual haciendo uso del equipo de oxiacetelino, presente en el área, se alcanzará la temperatura de fusión del aluminio. Para tener un control mayor de la fusión se hará con flama neutra en la boquilla y con la boquilla más pequeña disponible, para un mejor control de la temperatura y utilizando adicionalmente una pastilla desgasificadora para obtener los mejores acabados posibles, así como librar la inclusión de hidrogeno y evitar el desarrollo de escoria en el metal fundido.

1.1.4 Inversión

Investigando que tipos de inversiones son usualmente utilizados en micro fundición se propusieron yeso cerámico y cristobalita. Por las características del yeso cerámico de utilizar mucha agua, fue descartado ya que al fraguar queda contenida mucha humedad, por lo tanto, al vaciar el aluminio fundido a 660°C la humedad presente en el molde se evaporaría al contacto causando imperfecciones en el vaciado, como un colapso del mismo dejando solo un botón de material compactado.

La cristobalita es un inversión usado para vaciados de materiales de alto punto de fusión como pueden ser cromos, latones y aluminios, dado que el material a utilizar en esta tesis será aluminio 6063 T5 con elevado punto de fusión, la cristobalita es un material más que óptimo para hacer vaciados.

El único inconveniente que presenta la cristobalita es que necesita ser calentada entre 600°C y 550°C para su vaciado y que fluya óptimamente el aluminio. En esa temperatura su punto de expansión térmica que es de aproximadamente 1.3%, para alcanzar esta temperatura se utilizará una mufla, este horno eléctrico precalentará el cubilete a 600°C. al ser extraído del horno habrá transferencia de calor con el medio cediendo aproximadamente 200°C. con lo cual obtenemos un punto de temperatura óptimo para vaciar ya que estará lo suficientemente caliente como para que el metal fluya en todo su interior y para que solidifique rápido. La temperatura será mantenida al momento de fundir el aluminio en el crisol en su posición, con el equipo de oxiacetileno.

Sin embargo, como parte del experimento se harán vaciados en molde frío para comparar con molde caliente y observar cual es la variación de uno respecto al otro y que tanto afecta las propiedades finales o si no es necesario calentar los moldes.

Además de necesitar 48 horas para un fraguado óptimo en el cual se elimina la mayor humedad. La humedad restante será evaporada al introducir el molde en la

mufla dando como resultado un molde cien por ciento libre de humedad el cual será más amigable ya que en metal en su interior no tendrá solidificaciones bruscas ni defectos por humedad.

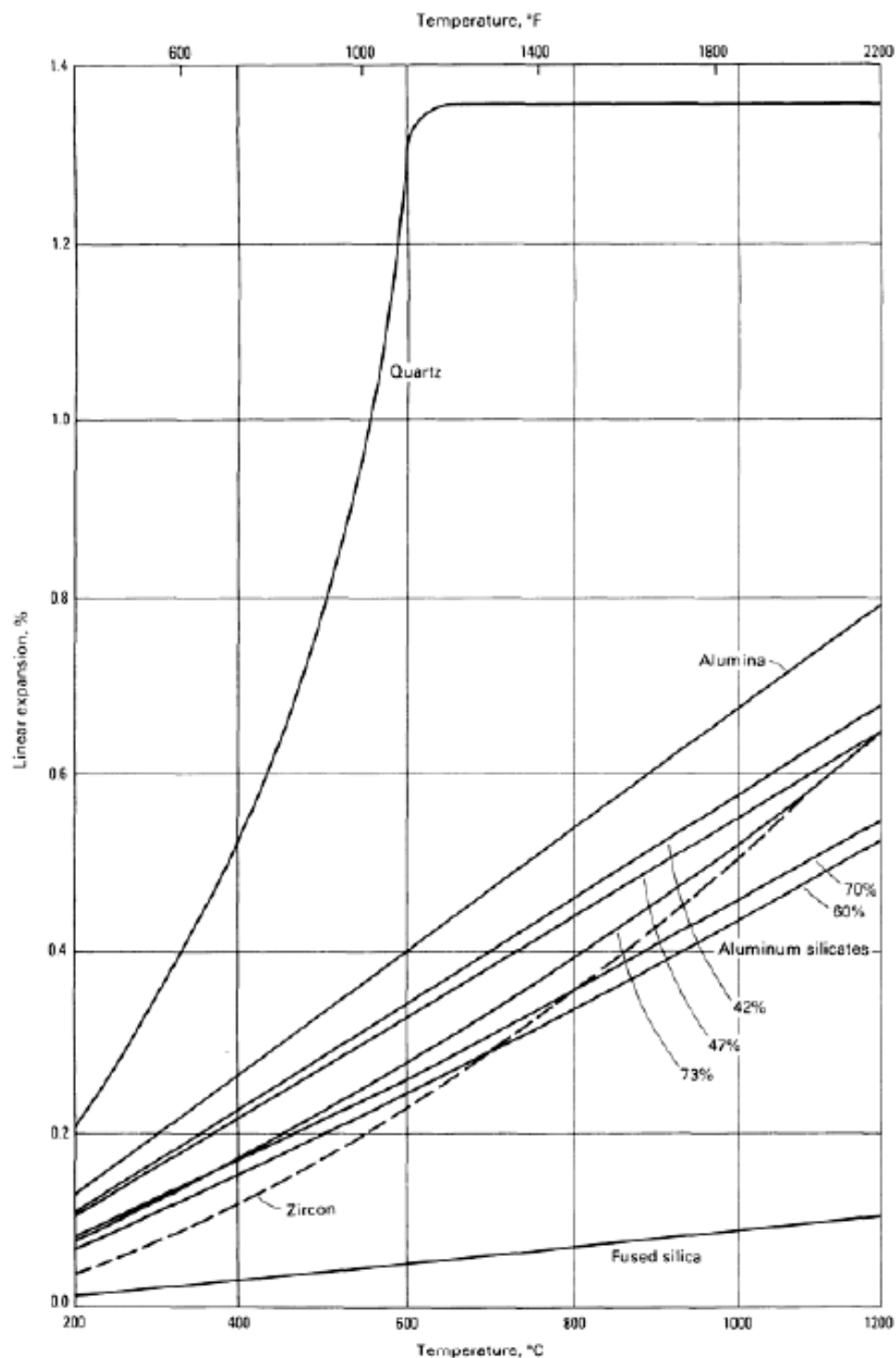


Figura 7 Gráfico de porcentaje de expansión térmica de materiales cerámicos (ASM, 1998)

En estas condiciones de temperatura las propiedades de la cristobalita son óptimas para obtener piezas de calidad.

Al quedar completamente fraguada y antes del desencerado se debe modificar la forma que tiene el canal de inyección ya que la marca dejada por la peana es una forma con filos por lo cual se modifica de manera que los cantos queden redondeados para ayudar a fluir el material en su interior.

1.2 Características de la máquina dental

1.2.1 Descripción

En la figura 8 y 9, se muestra la máquina de centrifugado para piezas dentales que se usó en la prueba experimental para llenar el molde. Fue propuesta y manufacturada en un trabajo anterior, por lo que los planos y la imagen de explosión son extraídos de la misma (Espinosa De Los Monteros Carmona & Herrera Alonzo, 2005)

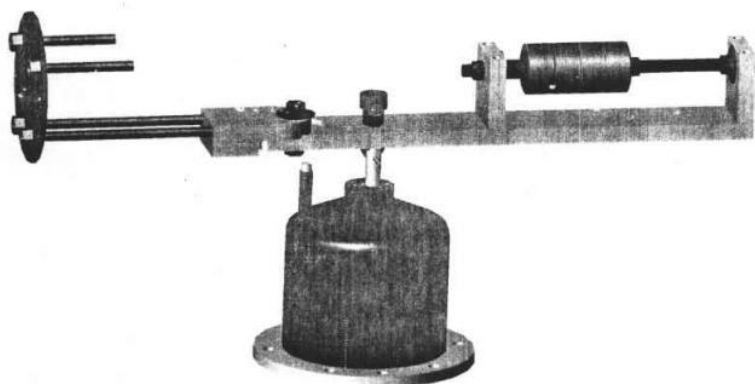


Figura 8 Máquina de centrifugado dental

La máquina cuenta en su base con barrenos pasados para ser empotrada a una mesa de trabajo.

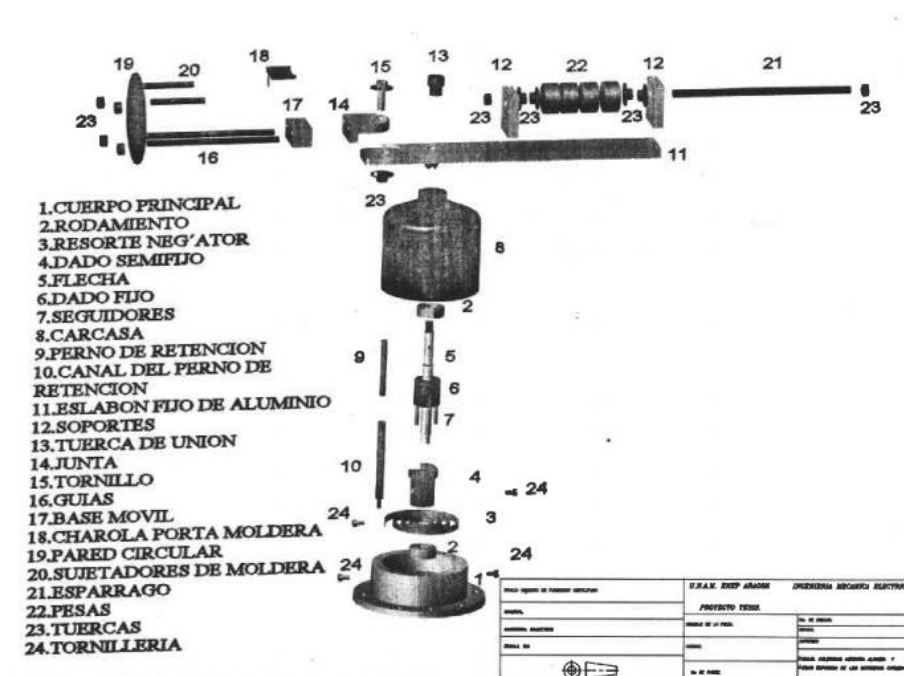


Figura 9 Componentes de la máquina

La máquina cuenta en un extremo con un brazo articulado el cual permite utilizar varios ángulos que pueden ayudar o perjudicar en la aceleración del giro de la máquina, en el otro extremo tiene una serie de pesas de acero ASTM A1018 CS tipo B (International, 2012) las cuales son usadas para dar equilibrio al giro y que no produzca vibraciones al momento de estar girando.

Cabe recalcar que esta máquina fue manufacturada en los laboratorios de la FES Aragón de manera que no es una máquina que línea que este fabricada bajo normas por lo cual se carecen de datos sobre los materiales utilizados o si se trabajaron bajo a alguna norma así como las tolerancias utilizadas en su fabricación por lo cual resulta pertinente realizar un análisis y comprobación de por lo menos las variables que afectaran al llenado de los moldes de cristobalita repitiendo por lo menos tres veces las pruebas realizadas para así obtener un promedio de datos con los cuales se podrá trabajo de una forma más controlada.

1.2.2 Torque

El mecanismo que brinda la fuerza para realizar el giro es un resorte torsional de tipo espiral, el cual al carecer de datos sobre que material está fabricado, el fabricante o de donde fue extraído no se conoce su constante elástica por lo cual dificulto un poco el análisis.

Por el tipo de resorte que es para obtener alguna pista sobre su constante elástica es imposible medirla con aparatos convencionales para resortes, ya que no se cuentan con ellos, se recurrió a el uso de un torquímetro de caratula el cual se encuentra en las instalaciones de los laboratorios de FES Aragón.

Por medio de la escala graduada en kilogramos fuerza-metro y libras fuerza-pie obtener una medición indirecta del torque que desarrolla el resorte la cual por el tipo de resorte esta expresada en $\frac{N-m}{rad}$.

En tanto el resorte no alcance su límite elástico obedecerá la forma angular de la ley de Hooke:

$$\tau = -k\theta$$

Ecuación 3 Ley de Hooke

En esta ecuación observamos que el coeficiente de elongación está representado por θ con lo cual la elongación es medida a partir de los radianes desplazados.

En este caso para obtener una medida lo más exacta posible y minimizar la incertidumbre que pueda generar la fricción entre el eje y el gabinete de la máquina la medida será tomada en 2π o en una revolución y será medida en tres ocasiones esperando obtener el mismo resultado en las tres pruebas.



Figura 10 Medición de torque con la máquina dental anclada por medio de tornillos en una mesa de trabajo utilizando los barrenos de un tornillo de banco.

Para el correcto acople entre el torquimetro y el eje de la maquina dental, se adaptó una llave de tubo, seccionado por la mitad para empatar con el perno prisionero del eje:



Figura 11 Modificación de dado para poder medir el torque del resorte

Se necesitó mecanizar la llave de tubo mediante un proceso de cilindrado interior haciendo uso de torno ubicado en el laboratorio L1 de la FES Aragón. Se barreno a una medida de media pulgada y posteriormente se limaron con limas de joyero las ranuras para el alojamiento del prisionero del perno del eje de la máquina dental.

Se realizaron tres pruebas para obtener una media en la medición, obteniendo en las tres el valor de $1 \frac{Kg-m}{rev}$ por lo cual utilizaremos ese valor para el análisis.

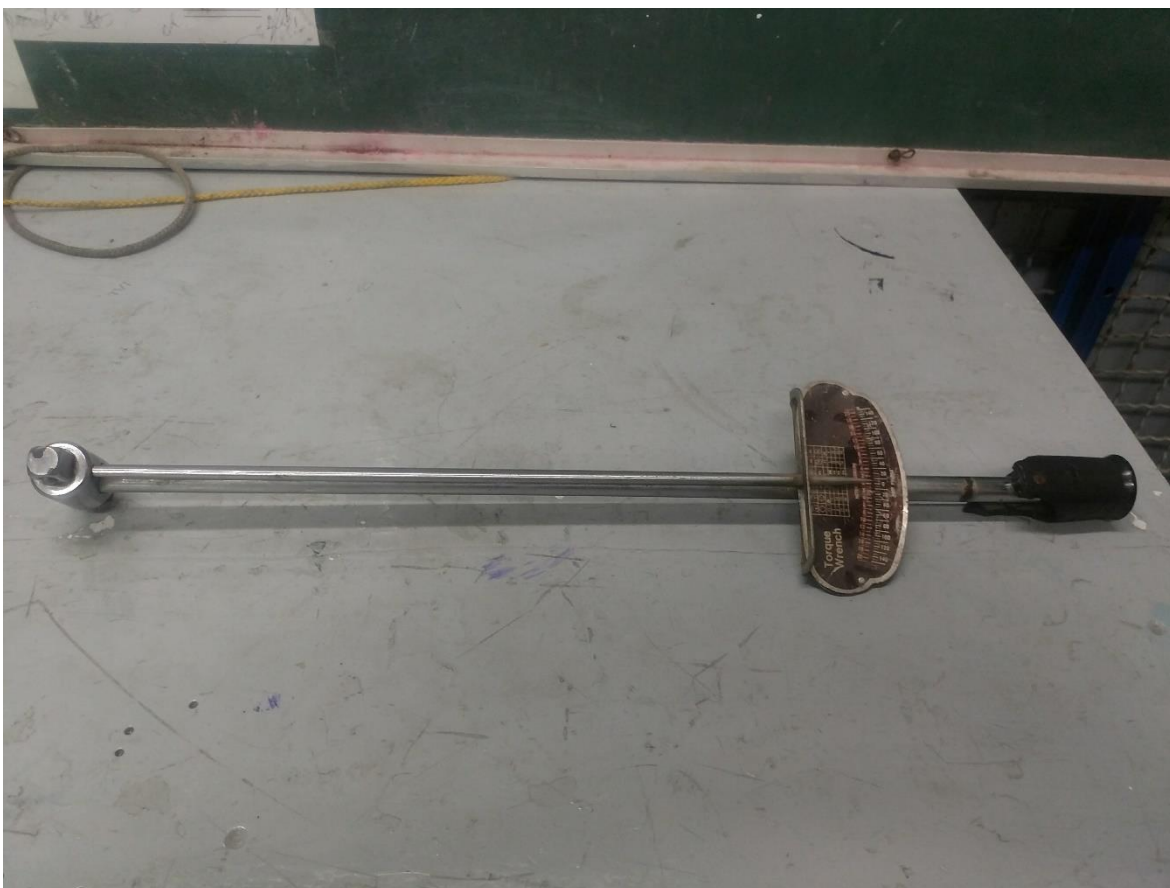


Figura 12 Torquímetro de Caratula Utilizado



Figura 13 Lectura obtenida

Sustituyendo el valor medido por el torquímetro en la ecuación 2 obtendremos:

$$\tau = -1 \frac{\text{kgf} - \text{m}}{\text{rev}} (2 \text{ rev}) = -2 \text{ kgf} - \text{m}$$

Ecuación 4 torque acumulado por el resorte torsional

Por lo tanto, de acuerdo al resultado obtenido el torque que se tendrá disponible en él resorte torsional de tipo helicoidal en dos giros será de 2kgf-m. el signo negativo que obtenemos en el resultado nos indica el sentido de la fuerza en este caso indica que es la fuerza que necesita para comprimirse y por lo tanto la fuerza que tendremos disponible al soltar el perno de traba.

1.2.3 Fuerza

Teniendo el torque desarrollado por la acumulación de energía en el resorte, con las dimensiones del brazo de la máquina podemos obtener la fuerza resultante por medio de la definición de momento de par:

$$M = r \times F$$

Ecuación 5 Momento par Vectorial (Beer, Johnston, & Eisenberg, 2007)

O

$$M = Fd$$

Ecuación 6 Momento par Escalar

Si utilizamos la ecuación 6 tendremos una ecuación de primer grado con dos incógnitas, una de las cuales puede ser obtenida por medio de medición del largo del brazo:

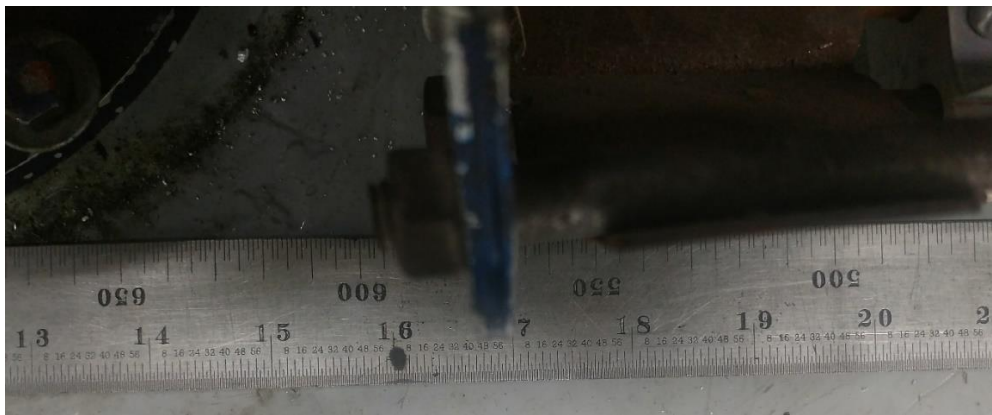


Figura 14 Medición del brazo con escala milimétrica

Con lo cual obtenemos el largo total del brazo, pero dada su naturaleza de equilibrio, la distancia a sustituir en la ecuación 6 es del eje de giro al extremo del brazo por lo cual suponiendo que el brazo está uniformemente distribuida la distancia, esta debería ser de la medida entre dos. Al sustituir en la ecuación 6 obtenemos:

$$2 \left[\frac{Kgf - m}{rev} \right] = F[N] * \frac{0.590}{2} [m]$$

Ecuación 7 Sustitución de ecuación 4

Si despejamos F obtendremos el valor de la fuerza generada por el resorte:

$$F[N] = \frac{2[kg - m]}{0.295[m]} = 6.7796 \left[\frac{kgf - m}{m} \right] * \frac{9.81[N]}{1 Kgf} 66.5078 \left[\frac{N * Kgf}{Kg} \right] = 66.5078[N]$$

Ecuación 8 Fuerza generada por el resorte torsional

Debido a la carencia del instrumento con resolución necesaria para comprobar si el resultado obtenido es diferente del real el resultado de la ecuación 7 será utilizado como la fuerza efectiva que es entregada por el resorte.

1.2.4 Velocidad

Con el uso de un tacómetro laser marca UNI-T modelo UT372 se obtiene las velocidades de giro de la máquina los datos utilizados corresponden a 4 ensayos, obteniendo la siguiente gráfica:

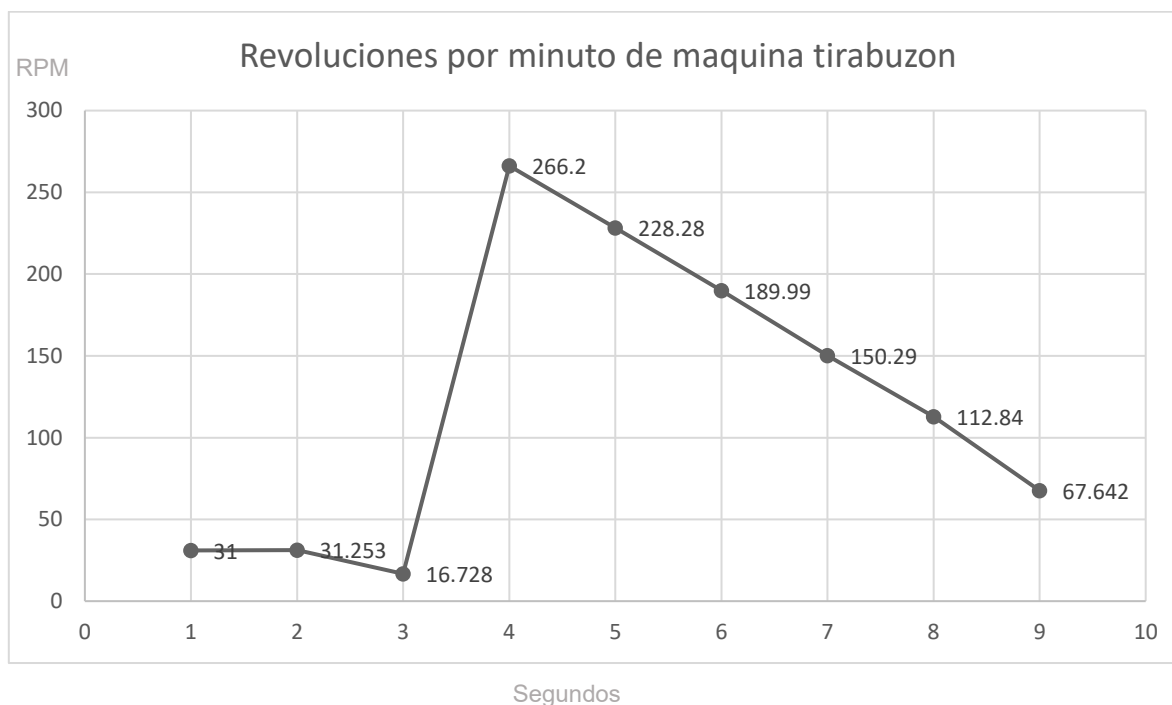


Figura 15 Gráfica de los valores obtenidos de lecturas de tacómetro digital

Se puede observar en el gráfico anterior que la velocidad máxima de giro se da a los 4 segundos por lo cual se utilizara la siguiente gráfica simplificada (Figura 16), ya que en este punto se tiene la máxima velocidad por lo cual todo el análisis a realizar será a partir de este instante, debido a que a partir de este punto la inyección se ha realizado y comienza la solidificación del aluminio.

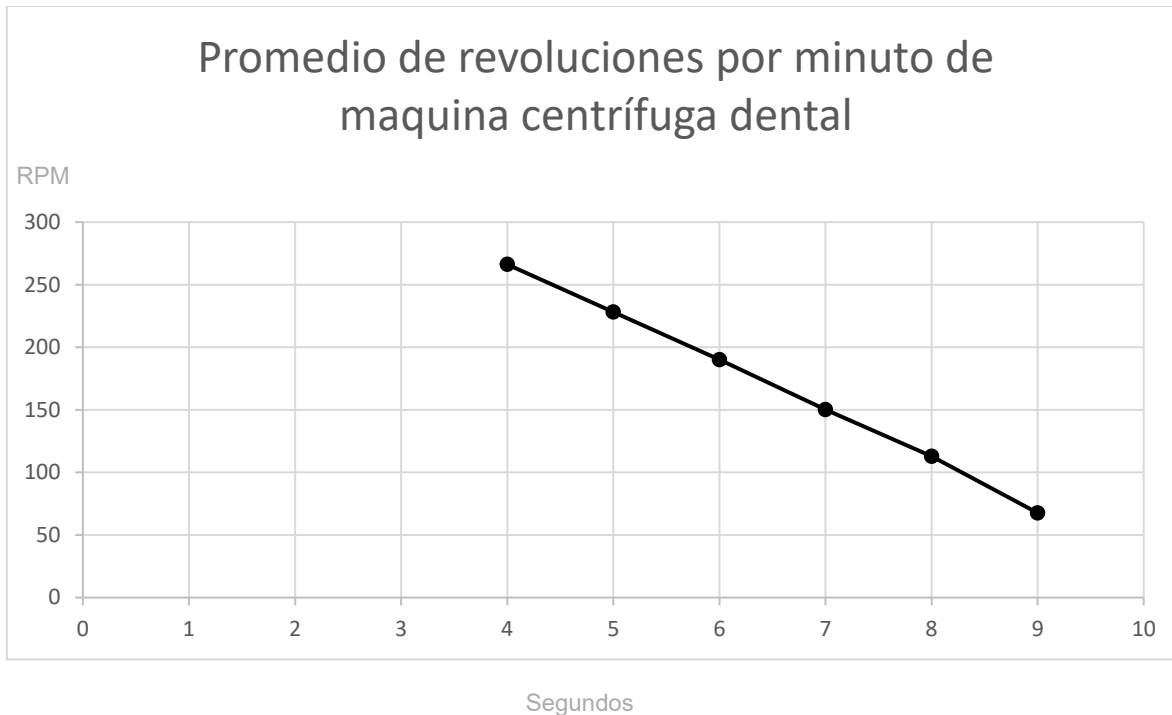


Figura 16 Grafica simplificada de la desaceleración del molde, haciendo uso de tacómetro laser marca UNI-T modelo UT372

De esta manera lo único que debemos hacer con los datos obtenidos es convertirlos de velocidad angular a velocidad lineal para facilitar los cálculos:

1.2.5 Aceleración

Ya que el principio del fenómeno físico que se encarga de hacer que el metal sea inyectado en el molde de cristobalita es la fuerza centrífuga, saber la aceleración generada por el resorte torsional que se encuentra en el interior de la máquina de centrifugado es muy importante.

Podemos encontrar el valor de la aceleración por medio de la segunda ley de Newton la cual enuncia:

El cambio de movimiento es proporcional a la fuerza motriz externa y ocurre según la línea recta a lo largo de la cual aquella fuerza se imprime. (Newton, 1690)

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

Ecuación 9 Segunda ley de Newton

La masa del brazo giratorio puede ser obtenida por medio de una báscula de contra peso. Con lo cual sustituyendo obtendríamos:

$$66.5078[N] = 2.7[kg] * a \left[\frac{m}{s^2} \right]$$

Ecuación 10 Sustitución de variables conocidas

Despejando la aceleración:

$$a = \frac{66.5078 \left[\frac{kg * m}{s^2} \right]}{2.7[kg]} = 24.6325 \left[\frac{kg * m}{kg * s^2} \right] = 24.6325 \left[\frac{m}{s^2} \right]$$

Ecuación 11 Aceleración generada por la fuerza del resorte torsional

para denotar aceleración se acostumbra expresarla en fuerza g o solamente en g siendo equivalente $1g$ a $9.81 \frac{m}{s^2}$ lo que es igual a la aceleración de la gravedad a nivel del mar. Por lo cual el resorte tipo torsional de la máquina de centrifugado dental entrega:

$$fuerza \ g = 24.6325 \frac{m}{s^2} * \frac{1g}{9.81 \frac{m}{s^2}} = 2.511g$$

Ecuación 12 fuerza g desarrollada por la descompresión del resorte torsional

Ese resultado es una aceleración lineal, pero por la naturaleza de nuestro movimiento que es circular el resultado sería la resultante de la suma de magnitudes de la aceleración normal y tangencial por lo que es conveniente para el estudio conocer los valores de las dos aceleraciones que definen el movimiento circular.

Para obtener los valores recurrimos a el estudio de la dinámica para análisis de cuerpos sometidos a movimiento circular, con lo cual utilizaremos las ecuaciones definida para el análisis del mismo, en el cual se puede obtener de manera analítica, pero es conveniente realizar un análisis vectorial por medio de diagramas de cuerpo libre, con el cual tendremos una mejor apreciación de los sentidos de las aceleraciones y las magnitudes de los vectores por lo cual nos facilitara el análisis.

La magnitud de la aceleración puede ser relacionada con sus componentes usando $a = \sqrt{a_t^2 + a_n^2}$. Como $a_n = \frac{v^2}{\rho} = \omega^2 * r$ siendo ρ el radio de curvatura. (Hibbeler R. C., 2010)

Con las ecuaciones anteriores se facilita la obtención de las componentes de la aceleración para el movimiento circular.

Como se observa es necesario obtener la velocidad para completar el análisis de aceleraciones por lo cual tomaremos el valor del subtema anterior que fue obtenido con un tacómetro laser por lo tanto en el intervalo de tiempo que analizaremos la aceleración será de $t=4s$ a $t=5s$ ya que en ese punto la máquina alcanza la máxima aceleración y es el momento en que se realiza la inyección del material.

$$a_n = \frac{\left(\left(228.28 - 266.2 \frac{\text{rev}}{\text{min}} \right) \left(\frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}} \right) \left(\frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \right) \right)^2}{0.295 \text{ m}} = \frac{\left((-3.9709 \frac{\text{rad}}{\text{s}}) (0.295 \text{ m}) \right)^2}{0.295 \text{ m}}$$

$$a_n = \frac{\left(-1.1714 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2}{0.295 \text{ m}} = \frac{1.3722 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}{0.295} = 4.6115 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Ecuación 13 aceleración normal para el punto de máxima velocidad angular

Como se puede observar el resultado es mucho menor al resultado obtenido por medio de la fuerza esto es por las características del movimiento circular el cual la aceleración tangencial será mayor que la normal para obtener un buen llenado del molde. Siendo el valor de la aceleración tangencial:

$$a_t = \sqrt{(24.6325)^2 - (4.6115)^2} = \sqrt{606.76 - 21.2659} = \sqrt{585.4941} = 24.1968 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Ecuación 14 Valor para aceleración tangencial

Siendo la aceleración tangencial casi la misma que la aceleración obtenida por la fuerza del resorte. Convirtiéndolo en fuerza g :

$$a_g = 24.1968 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \left(\frac{1 \text{ g}}{9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} \right) = 2.46g$$

Ecuación 15 Valor para aceleración en relación con aceleración de la gravedad.

Cabe recalcar que esta aceleración es solo del peso del brazo ya que no se tomaron en cuenta ni el peso del cubilete lleno de cristobalita ni del crisol con el material.

1.2.6 Momento Angular

Para el cálculo de la energía cinética es necesario primero conocer el momento angular que se desarrolla por el giro de la máquina se hará un análisis por medio de momentos y productos de inercia utilizando el método de ejes paralelos (Hibbeler R. C., 2010) y así poder cuantificar la energía cinética. Este cálculo estará afectado por las posiciones tanto del cubilete como de las pesas que conforman en contrapeso con lo cual si se calculará para las combinaciones existentes se obtendrá un resultado de 990 valores, ya que los contrapesos pueden tener 11

posiciones diferentes y el cubilete tiene 90 diferentes posiciones medibles, por lo cual este cálculo se realizará con ayuda de MathCad un software matemático el cual ayudará a facilitar el manejo de todos los datos que conforman el estudio de las diferentes combinaciones, y el cual por facilidad se ilustrara en una gráfica.

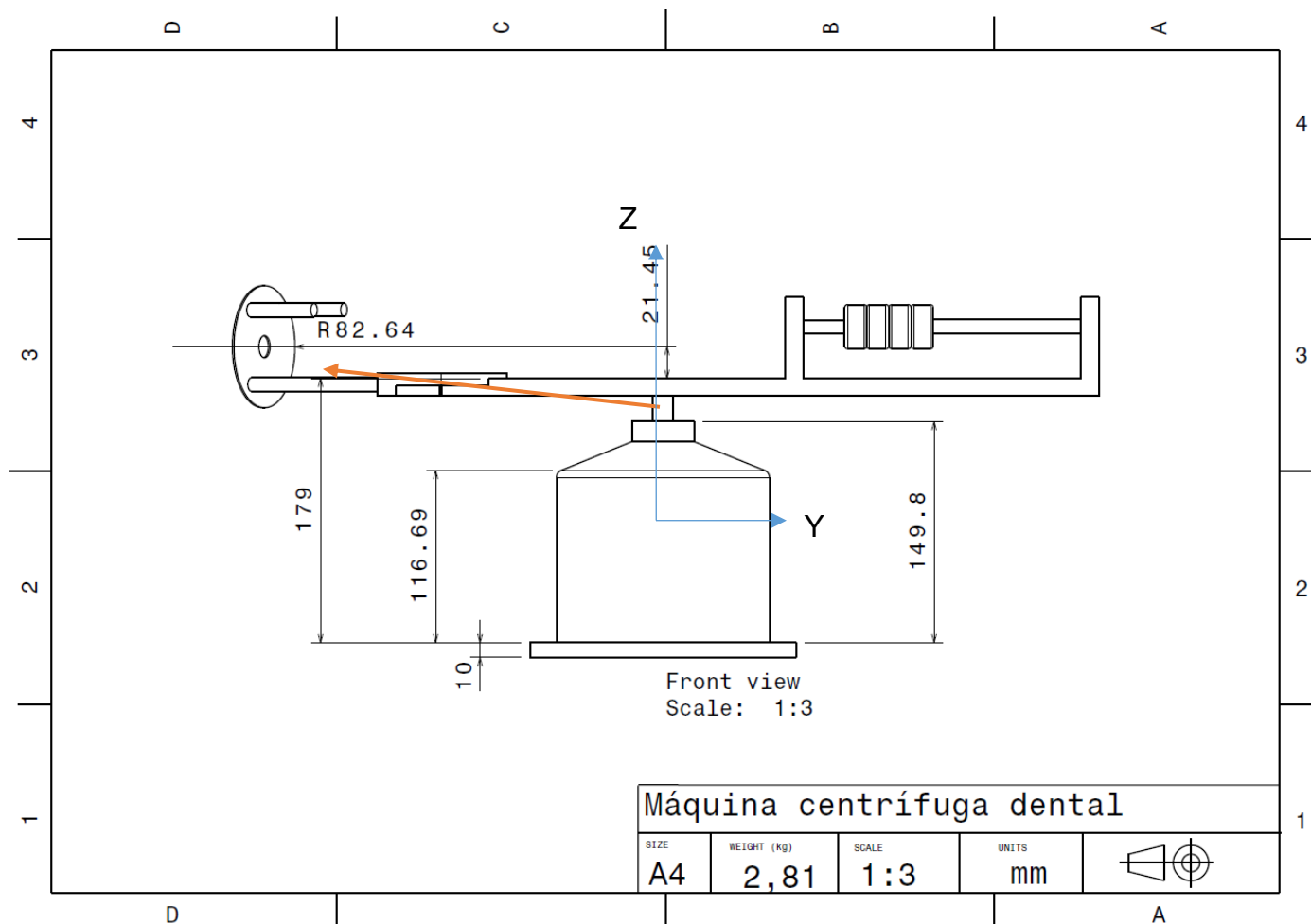


Figura 17 vector de posición OC del origen del giro a la entrada del cubilete en el plano Z-Y

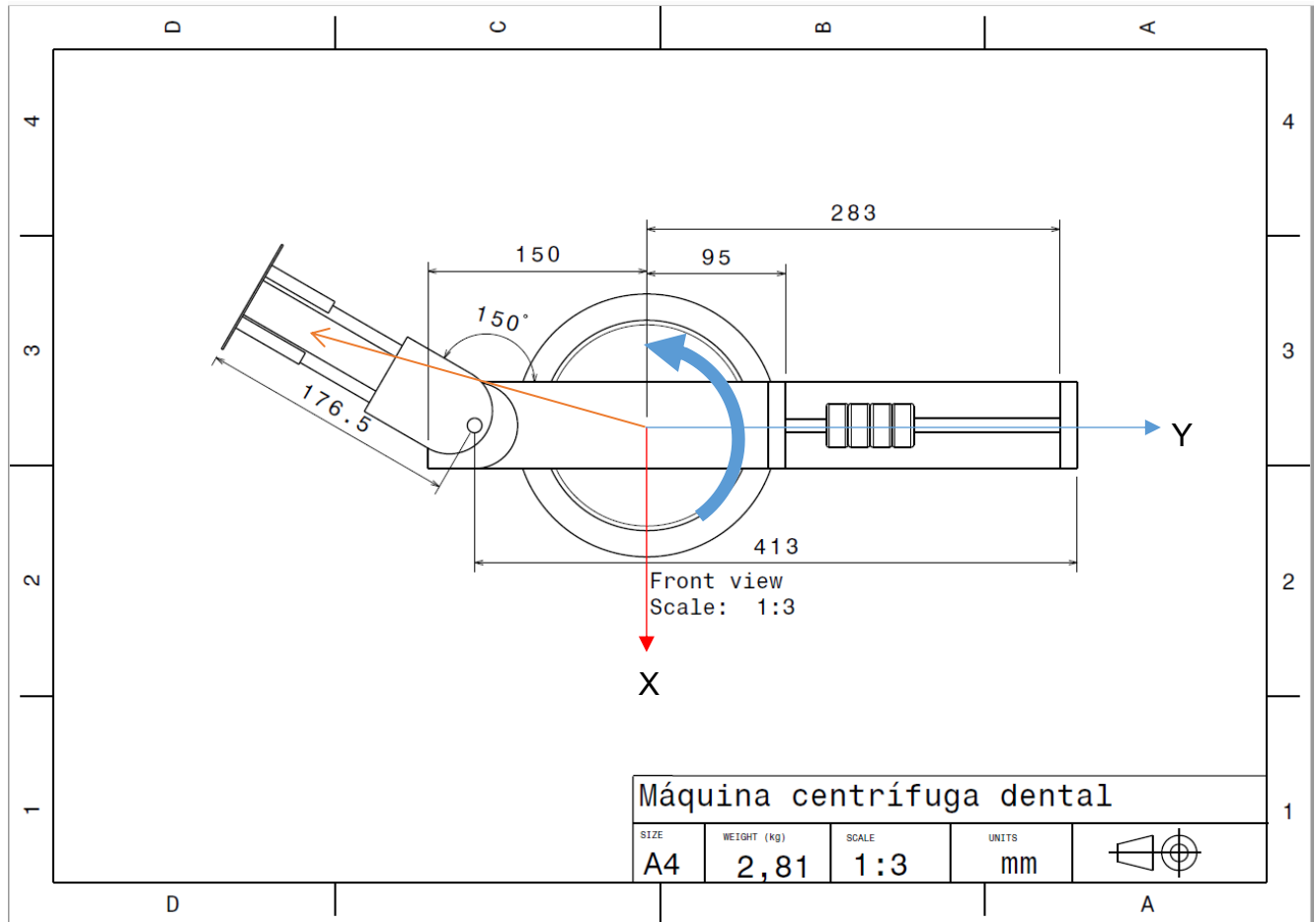


Figura 18 vector de posición OC en el plano X-Y.

Una vez que se tiene representado en qué punto se hace el análisis e identificar el instante en el cual se hará el mismo, siendo este caso donde velocidad angular es máxima es decir, 4 segundos en el cual la velocidad angular (n) tiene un valor de $n=279,845$ RPM el brazo tiene un peso de 2.7 kg y las dimensiones vienen indicadas en las imágenes anteriores por lo se tiene con los datos necesarios para llevar a cabo el análisis.

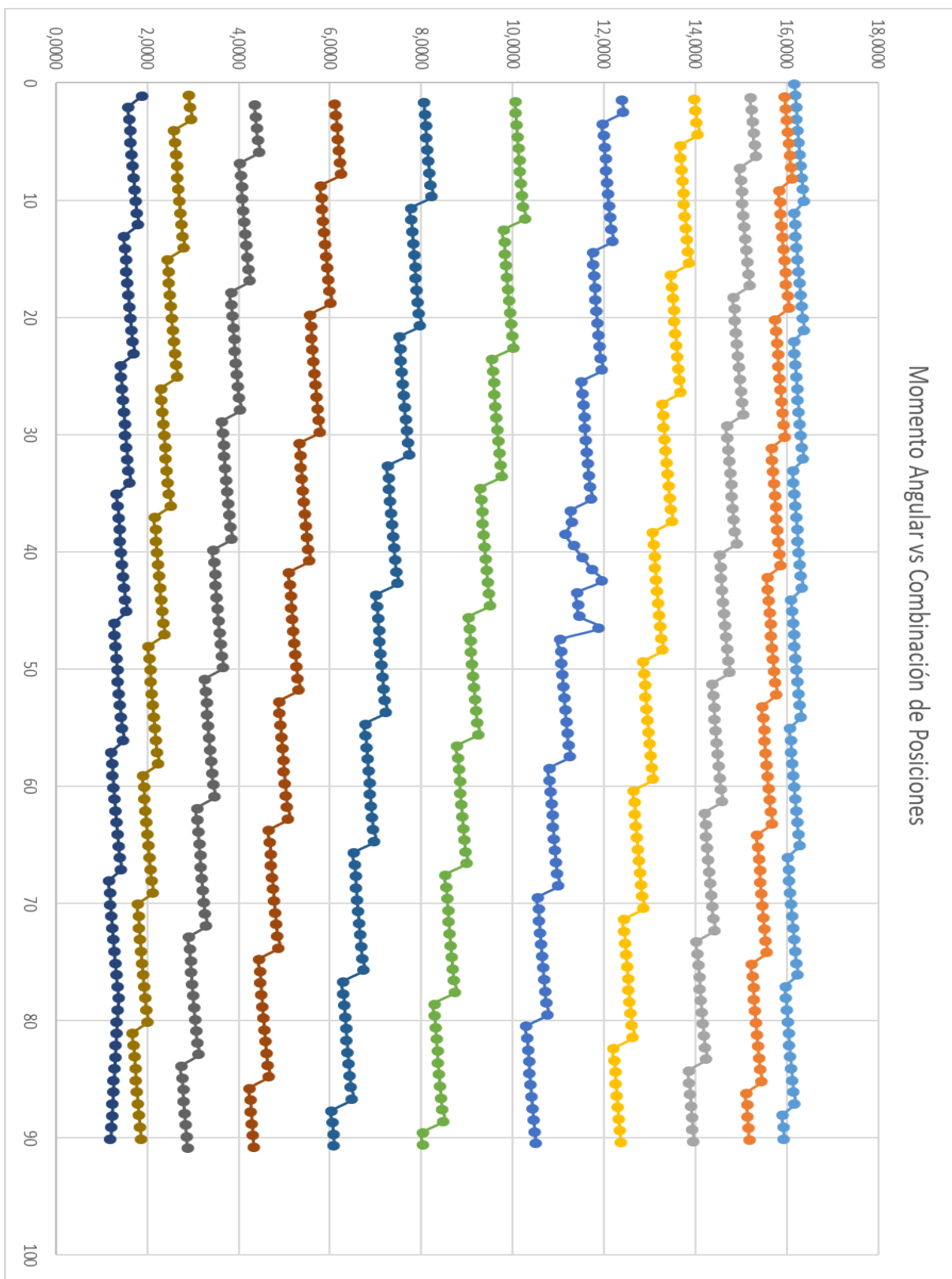


Figura 19 grafica en Excel de resultados para el cálculo del momento angular con las diferentes combinaciones de posiciones que pueden tener tanto el brazo como las pesas.

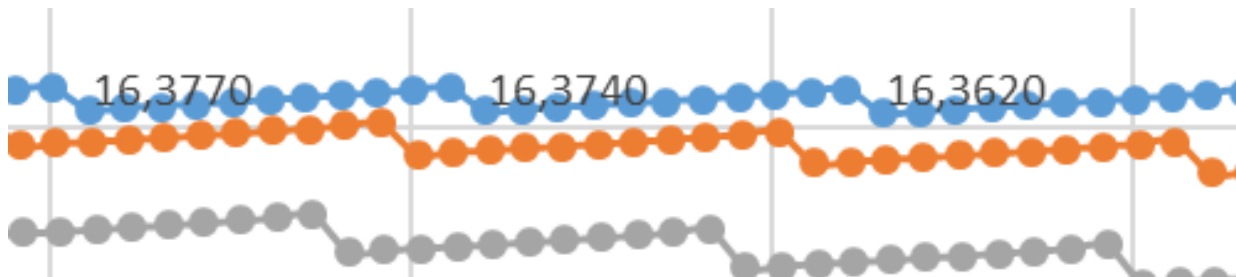


Figura 20 valores máximos del momento angular en $N \cdot m$, el cual pertenece a la posición de las pesas más cercana al centro y a un ángulo de inclinación de 170° en sentido contrario a las manecillas del reloj

Los resultados entregados por el software MathCad y graficados en Excel, nos indican la combinación de posiciones que generan mayor momento angular. Esta combinación es de 180° a 170° sentido anti horario en el cubilete y las pesas en la posición más cercana posible al centro. Este valor es de $16.3770 [N \cdot m]$. La obtención de este valor es muy importante ya que con el podemos calcular otros valores importantes para este estudio. Encontrando la combinación de mayor magnitud el siguiente paso es la energía cinética.

1.2.7 Energía Cinética

El valor de la energía cinética es el valor más importante ya que con este valor se podrá obtener analíticamente las restricciones y la forma que tendrán los modelos ya que derivado del valor de esta energía obtendremos la presión que se generara con el movimiento de rotación con la cual podremos saber si el modelo va a llenar completamente y determinar los puntos críticos.

Utilizando el valor máximo de momento angular se realizarán todos los cálculos:

Rotación con respecto a un eje fijo.

Cuando un cuerpo rígido gira alrededor de un eje fijo que pasa por el punto O, el cuerpo tiene energía cinética tanto de traslación como de rotación, de modo que:

$$T = \frac{1}{2}mv_G^2 + \frac{1}{2}I_G\omega^2$$

Ecuación 16 para cálculo de energía cinética

La energía cinética del cuerpo también puede formularse en este caso si observamos que $v_G = r_G\omega$, de modo que $T = \frac{1}{2}(I_G + mr_G^2)\omega^2$. Según el teorema de los ejes paralelos, los términos entre paréntesis representan el momento de inercia I_o del cuerpo con respecto a un eje perpendicular al plano de movimiento y que pasa por el punto O. Por tanto,

$$T = \frac{1}{2} I_o \omega^2$$

Ecuación 17 reducción de ecuación para el cálculo de la energía cinética

Por la derivación, esta ecuación dará el mismo resultado que la ecuación anterior, puesto que toma en cuenta las energías cinéticas tanto de traslación como de rotación del cuerpo. (Hibbeler R. C., 2010)

Del texto anterior obtenemos la ecuación que usaremos para determinar la energía cinética por medio del momento angular generado por el movimiento. Por lo que:

$$T = \frac{1}{2} (0.5588[k])(29.305)^2 = \frac{1}{2} (479.9279) = 239.9639J$$

Ecuación 18 Resultado de cálculo de energía cinética.

$$T = \frac{1}{2} (kg * m^2) \left(\frac{rad}{s}\right)^2 = (kg * m^2) \left(\frac{1}{s^2}\right) = \left(\frac{kg * m^2}{s^2}\right) = (J)$$

Ecuación 19 Análisis de unidades.

De lo anterior, los valores introducidos en la ecuación es el momento de inercia generado en el eje Z multiplicado por la velocidad al cuadrado y realizando el análisis dimensional observamos que la unidad es en joule.

Esta no es la única forma de obtener la energía cinética, otra manera de obtenerla es a partir del momento angular y multiplicarlo por la velocidad angular con lo cual tendríamos:

$$T = \frac{1}{2} (16.3770[k] * 29.305[k]) = \frac{1}{2} (479.9279) = 239.9639J$$

Ecuación 20 Calculo de energía cinética mediante momento angular y velocidad angular.

Como se observa el resultado obtenido es el mismo, de esa manera además de comprobar que el resultado es correcto también se ilustra otro método más sencillo de obtener la energía cinética disponible generada por el giro de la máquina.

1.2.8 Presión

La presión generada por el giro es el último de las variables más importantes que nos ayudaran a estudiar el llenado de moldes en fundición centrífuga, para este análisis será necesario recurrir a la mecánica de los fluidos para obtener el resultado a partir de ecuaciones de flujo que nos relacionan variables conocidas y otras que hemos calculado.

Partiremos del resultado de la energía cinética obtenido anteriormente, haremos uso de la ecuación de Bernoulli ya que en un principio lo estudiaremos como un fluido estático y más adelante con ayuda de software lo analizaremos dinámicamente.

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g h_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g h_2$$

Ecuación 21 Ecuación Bernoulli

Analizando la ecuación anterior, vemos que se divide en tres partes, las cuales son la presión a la cual está sometida el fluido, la velocidad a la cual genera una presión y la altura de presión o columna de agua. En este caso como no tenemos un cambio de altura podemos descartar la tercera parte de la ecuación. Quedando nos solo una variable desconocida la cual será P_2 y esa variable será la que nos resuelva el valor de la presión del flujo del aluminio.

En el punto anterior, obtuvimos la energía cinética. Dicho valor se sustituirá directamente en la ecuación de Bernoulli, solo se cambiará el signo a negativo por el sentido en el cual gira la máquina.

El valor de las condiciones iniciales, P y V lo tomaremos del valor de la presión atmosférica y la velocidad será igual a cero, dado que está en estado de reposo y sometido a la presión ambiente. El valor obtenido por la expresión anterior corresponde al valor de v_2 y con eso tenemos los datos para obtener el valor de P_2 .

$$101.3 \times 10^3 + \frac{1}{2}(2700)(0) = P_2 + \frac{1}{2}(2700)(-239.9639)$$

$$P_2 = 101.3 \times 10^3 + 323.951 \times 10^3$$

$$P_2 = 425.251 \times 10^3$$

Ecuación 22 Calculo de presión por medio de ecuación de Bernoulli

Realizando en análisis de unidades se encuentra un dato curioso:

$$Pa + \frac{kg}{m^3} \left(\frac{m^2}{s^2} \right) = Pa + \frac{kg}{m^3} (J)$$

$$Pa + \frac{N \cdot m}{m^3} = Pa + \frac{kg \cdot N \cdot m}{m^3}$$

Ecuación 23 Incongruencia con análisis de unidades.

Al observar el segundo término del lado derecho de la igualdad, podemos notar que la unidad resultante será Pa*kg lo cual no es una unidad coherente con el resultado que esperamos obtener ni coherente con él SI.

En Mecánica de los fluidos lo mismo que en Termodinámica se prefiere utilizar más que la energía total E que la energía específica e.

En el SI la energía específica, lo mismo que otras magnitudes específicas (volumen específico, entropía, etc.) se refieren a la unidad de masa; mientras que en el ST se refieren a la unidad de masa:

$$SI \quad e = \frac{E}{m}$$

$$ST \quad e = \frac{E}{W}$$

Ecuación de dimensiones

$$[e] = \frac{[E]}{[M]} = [L]^2 [T]^{-2}$$

Unidad

$$1 e = 1 \frac{m^2}{s^2} = 1 \frac{j}{kg}$$

(Mataix, 1986)

Basados en lo anterior y dado que el estudio que se realiza es del campo de la mecánica de los fluidos, utilizaremos la energía cinética obtenida como energía específica por lo cual nuestro análisis dimensional quedara:

$$Pa + \frac{kg}{m^3} \left(\frac{m^2}{s^2} \right) = Pa + \frac{kg}{m^3} \left(\frac{m^2}{s^2} \right)$$

Ecuación 24 Análisis de unidades con energía cinética con relación a la masa.

Con lo que se puede observar la igualdad cumple de ambos lados de la ecuación por lo cual la unidad obtenida será Pascal.

$$Pa + \frac{N \cdot m}{m^3} = Pa + \frac{N \cdot m}{m^3}$$

$$Pa + Pa = Pa + Pa = Pa$$

Ecuación 25 Análisis de unidades corroborando el resultado obtenido.

Obteniendo finalmente:

$$425.251 \times 10^3 Pa = 425.251 KPa$$

Ecuación 26 Resultado de presión generada por la máquina centrífuga dental.

El valor resultante es poco más de cuatro veces la presión ambiente. Este rango es aceptable para el tamaño de la máquina.

1.2.9 Número de Reynolds

La importancia que tiene el número de Reynolds en esta investigación es crucial para el acabado de las piezas ya que de esto depende la formación de burbujas las cuales ocasionan porosidad el cual es un defecto y se busca eliminar al mínimo para obtener piezas de calidad, para la obtención de este dato utilizaremos las variables que ya conocemos como velocidad y viscosidad del fluido, este último es un dato obtenido de una investigación publicada en un artículo de una página web de divulgación científica en el cual se hace una recopilación de varios datos

experimentales y los unifica en una gráfica, por lo que los resultados podrían variar ya que la obtención de este dato va más allá del alcance de esta investigación.

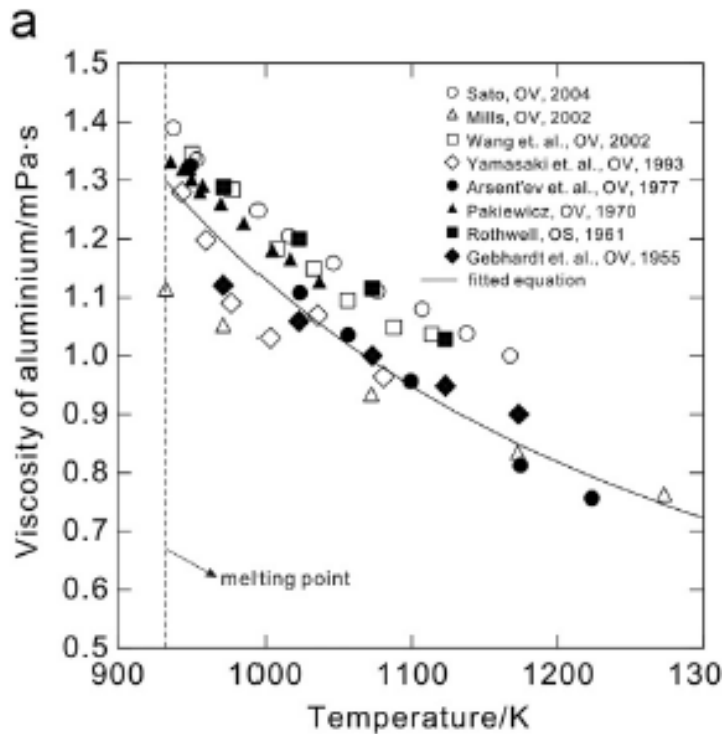


Figura 21 (Zhang, Du, Liu, & Jie, 1977-2015)

La gráfica anterior es el valor para la viscosidad dinámica por lo cual utilizaremos la siguiente ecuación para obtener el valor del número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho \cdot v_s \cdot D}{\mu}$$

Ecuación 27 Numero de Reynolds

Donde:

v_s : velocidad del fluido.

D : Diámetro de la tubería.

μ : Viscosidad dinámica.

ρ : Densidad del fluido.

Por lo que el número de Reynolds para nuestro fluido es:

$$v_s = r_g * \omega = (0.283)(29.305) = 8.2933 \frac{m}{s}$$

$$D = 6.35 \text{ mm calibre del rollo de cera.}$$

$$\mu = 1.3 \text{ mPa} \cdot \text{s lectura de la gráfica a } 600K$$

$$Re = \frac{(2700)(8.2933)(0.00635)}{0.0013} = 103347.2769$$

Ecuación 28 Calculo de numero de Reynolds para flujo del aluminio generados por la maquina centrifuga dental

$$Re = \frac{\left(\frac{kg}{m^3}\right)\left(\frac{m}{s}\right)(m)}{Pa \cdot s} = \frac{\left(\frac{kg}{m^3}\right)\left(\frac{m^2}{s}\right)}{\left(\frac{N}{m^2}\right) \cdot s} = \frac{\frac{kg}{m \cdot s}}{\left(\frac{kg \cdot m}{m^2 \cdot s^2}\right) \cdot s} = \frac{\frac{kg}{m \cdot s}}{\left(\frac{kg}{m \cdot s^2}\right) \cdot s} = \frac{kg/s}{kg/s}$$

Ecuación 29 Análisis dimensional para calculo de numero de Reynolds

Analizando el resultado anterior, observamos que es un número muy grande, por lo cual es de tipo turbulento, para tener un resultado laminar tendríamos que disminuir aproximadamente 5 veces la velocidad, con lo cual el valor de presión disminuirá y podría no llenar el molde, por lo cual no es opción reducir la velocidad, para evitar la formación de porosidades, la única opción viable será no calentar de más el fluido sino hasta su punto de fusión y desgasificarlo hasta donde sea posible para evitar que el hidrogeno presente en la fusión produzca defectos en la pieza final.

Con la obtención de este dato se obtiene el modelo matemático de la máquina centrífuga dental, por lo que esta máquina se encuentra caracterizada en sus variables más importantes y con estos datos podemos saber si nuestro molde y la geometría propuesta será llenada a partir de una simple sustitución de valores.

1.2.10 Modificaciones

La máquina a utilizar es producto de una manufactura de una tesis anterior, por lo cual aún tiene algunos puntos del diseño original los cuales se pueden corregir, la modificación de estos puntos es para mejorar la seguridad del personal que puede llegar a utilizarla, estas modificaciones fueron manufacturadas en el laboratorio L1 de diseño y manufactura perteneciente a la FES Aragón.

1.2.10.1 Brazo

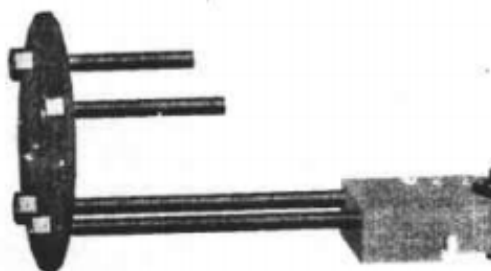


Figura 22 Brazo sin refuerzos para seguridad

Como se puede observar en la ilustración anterior el brazo original carece de protección en caso de que el metal sea expulsado por una causa extraordinaria, la solución para resolver este problema fue adaptar una lámina rolada a forma de dar un cinturón el cual en caso de que el material salga despedido será recolectado por la misma aportando un poco más de seguridad para evitar al usuario de la máquina accidente por quemaduras, el cinturón es corredizo y sujetado por soportes tipo grapa deslizantes, lo que permite la colocación de los cubiletes en su interior y a la vez vuelve seguro el uso de esta máquina.

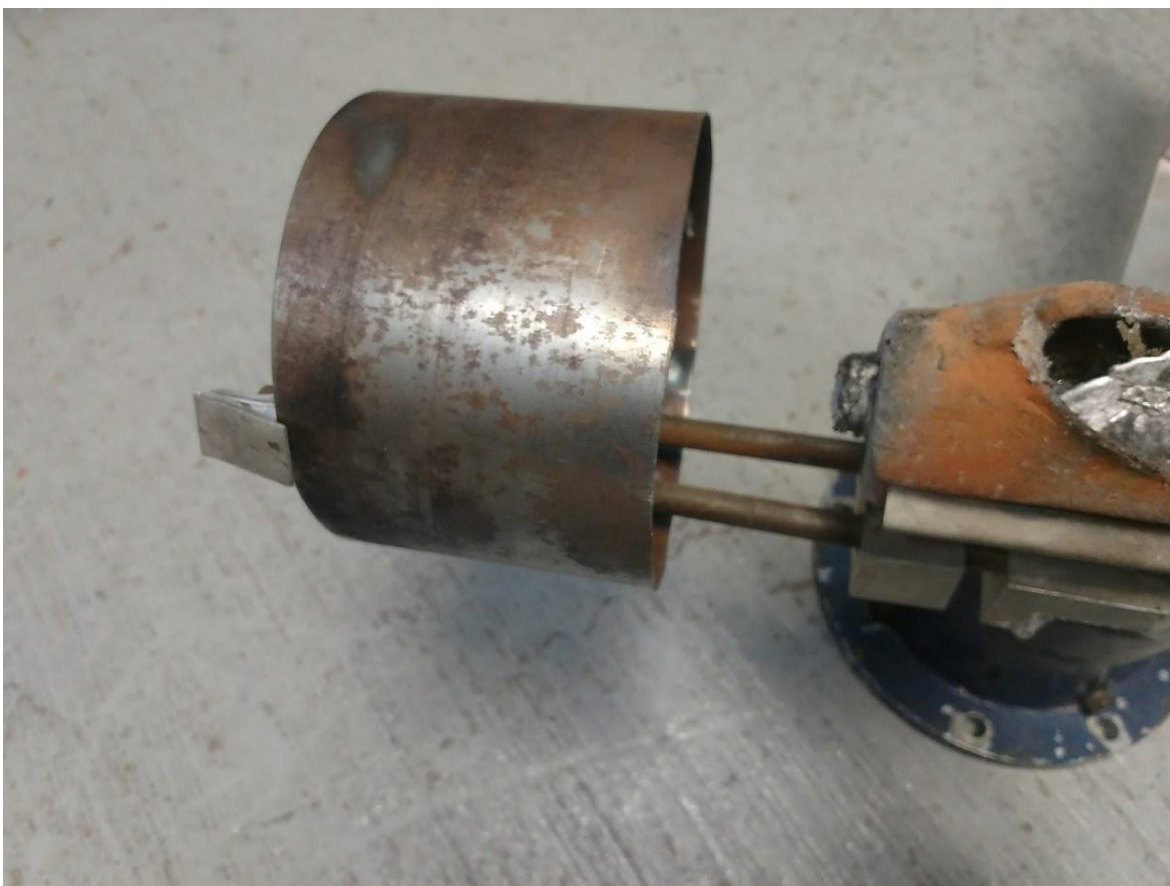


Figura 23 guarda de seguridad para evitar quemaduras

Dada la naturaleza de su manufactura la articulación del brazo no podía lograr un ángulo de 90° por lo cual se utilizó una máquina fresadora con cortador vertical de $\frac{1}{2}$ " para darle la holgura suficiente para que el brazo pueda alcanzar el ángulo. Para el tope se depositó aluminio por medio de soldadura SMAW para de esta manera limitar el alcance que se logra cuando el resorte libera su energía para hacer girar el brazo.

1.3 Análisis de flujo de aluminio en el molde de cristobalita

Para obtener las dimensiones y formas a las cuales aún se puede obtener un buen llenado se realizarán varias pruebas de fluidez para verificar y comprobar que los cálculos que se hicieron corresponden con los datos resultantes de la experimentación, comprobando datos muy importantes como por ejemplo el mínimo diámetro de llenado, el menor diámetro al cual se puede manufacturar los modelos de cera y las formas que se podrían hacer para aun tener llenado.

La forma en la cual se va a evaluar la fluencia que tiene el aluminio dentro del molde de cristobalita será a partir de un modelo propuesto para evaluar fluidez en vaciados a gravedad incluido en el libro: (Kalpakjian & Schmid, 2002)

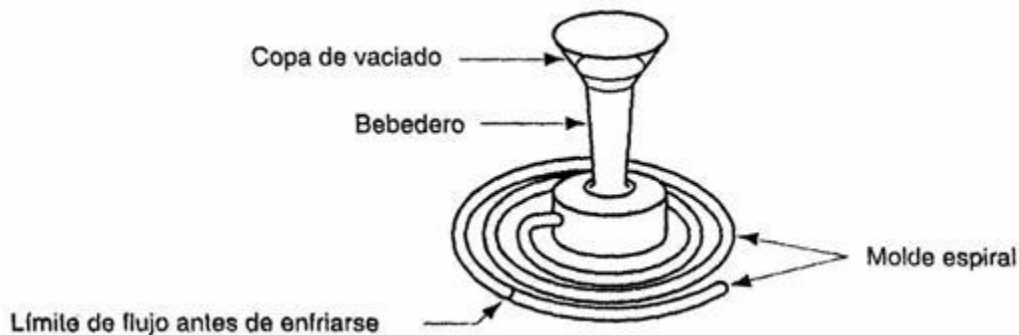


Figura 24 Modelo para prueba de fluidez en fundición a presión ambiente

De este modelo se obtendrá un antecedente para la realización de un modelo en cera y posteriormente revestirlo, se hará con dos diámetros de diferentes rollos de cera, uno es de 1.5 mm y el otro es de 6.35 mm la finalidad de hacer uso de diferentes diámetros es para tener un punto de partida en cuanto al límite que se tiene a la entrada para inyectar el aluminio fundido y que tanto fluye antes de solidificar dándonos un límite para las piezas a recrear.

El manejo de la cera es muy sencillo, pero en este caso ya que el espiral es de un diámetro muy pequeño, la espiral tiende a perder su forma plana y dejando una especie de cono en espiral, esto generado por el previo trabajo de las manos sobre la cera lo cual hace que este un poco caliente con lo cual pierde su estabilidad mecánica, por lo cual la opción que se encontró es introducirla en un congelador 5 minutos antes del vaciado del investimento. Esto para que al estar con una temperatura menor que la del ambiente se pueda mantener en su posición deseada al vaciar el investimento.



Figura 25 rollo de cera crestomatía



Figura 26 modelo de cera para prueba de fluidez

1.4 Resultados de las pruebas.

1.4.1 Cera de 1.5 mm.

El experimento se llevó a cabo en un molde el cual en su interior alojaba la cavidad de un espiral de 150 mm de largo y enrollado formando un espiral, esta espiral tiene un diámetro de 1.5 mm proveniente de un rollo de alambre de cera por lo cual se asume que el diámetro es constante en todo el largo del alambre.

Al realizar el llenado con los parámetros y condiciones descritas anteriormente, no se completó la inyección ya que en aluminio fundido se quedó impactado en el bebedero que deja la huella de la peana, se consiguió una inyección menor a dos mm

Sin embargo, se realizó una prueba en la cual la entrada del cubilete se amplió el diámetro del bebedero formando un cono de 20 mm de radio en su parte más ancha.

En esta prueba se consiguió una inyección de más material al interior del cubilete, sin embargo, una mala fabricación del cubilete permitió la formación de burbujas en el interior del molde por lo que el aluminio fundido se inyectó por otro camino y frustró el intento de la prueba en un solo espiral.

Aunque este error también proporciona buenos datos de fluencia ya que la espiral desviada consiguió casi la misma longitud que el camino original por lo cual sumando las dos longitudes obtenemos una longitud uniforme de 71 mm de inyección con los valores antes descritos.

El resultado es favorable para la investigación ya que se inyectó casi la mitad de la longitud total. Y nos da una idea del alcance que se puede crear con la máquina.



Figura 27 resultado de la espiral para prueba de fluencia en alambre de cera de calibre 1.5 mm

1.4.2 Cera de 6.35 mm

La longitud de la espiral utilizada para este experimento fue de 120 mm ya que por la longitud del alambre de cera no se podía alojar más diámetro en el cubilete. En este caso se consiguió inyectar en la espiral una longitud de 106 mm.

En la espiral se observa faltante de material, este faltante se quedó alojado en el bebedero del cubilete, ya que las condiciones a las cuales se realizó el vaciado no eran las correctas para esta operación, el material solidificó antes de tiempo por una inyección a baja temperatura.



Figura 28 faltante de material en muestra

Aunque las condiciones no fueron las favorables para el experimento se obtuvo un buen resultado de llenado y además de un punto que nunca se considero, los defectos que se pueden dar en las piezas. El defecto que se observa en esta pieza es el color y la forma que se obtuvo del molde, su color es opaco y la superficie es rugosa.

Estos defectos son resultado de un molde "húmedo", *El aspecto basto de la pieza se revela en su superficie que presenta un grado de tosquedad y de rugosidad mayores que el propio de un trabajo cuidadoso. Este defecto en las piezas en seco resulta de que la arena es poco refractaria, su grano es demasiado grueso, ha sido incompletamente secada, el grano es malo o de otras causas parecidas; en las piezas en verde deriva de la arena mal trabajada y de que el negro mineral no es adecuado. Otra causa es una temperatura de colada demasiado elevada. Puede haber una auténtica sinterización.* (Serrano, 2011-2012).



Figura 29 Defectos por molde "húmedo" quedando la superficie opaca y porosa.

El objetivo de estas pruebas era medir la fluencia del aluminio fundido en calibres de alambre de cera. Se obtuvieron datos relevantes para futuros experimentos:

La máquina es capaz de llenar un diámetro de 1.5 mm por una longitud de 10 mm, este dato nos abre un abanico de posibilidades para el modelo a utilizar ya que ahora se conoce el alcance de llenado.

Los defectos que pueden surgir en las fundiciones, el resultado obtenido nos da idea de los desperfectos que pueden surgir en la fundición y nos orilla a generar un dispositivo que sea capaz de extraer las burbujas cuando se realice el vaciado de la cristobalita para así obtener un resultado lo más parecido al modelo y para evitar las paredes delgadas o la comunicación entre las cavidades.

La necesidad de realizar la mezcla de cristobalita de una forma más controlada al adicionar agua, también de una buena “cocción” al desencerar los moldes ya que puede quedar en su interior cera dependiendo de las formas del molde.

El control de los parámetros de fundición para el aluminio ya que realizar la inyección por tanteó no nos garantiza la temperatura para conseguir la máxima viscosidad o en el caso contrario se puede exceder la temperatura y conseguir inclusión de hidrogeno y nitrógeno.

1.5 Modelos a utilizar

El modelo a utilizar es de suma importancia para esta investigación, es necesario que pueda ser recreado siempre con las mismas características y dimensiones. Por lo cual se propone un modelo de control en el experimento el cual se propone una figura con curvas parecido a una palmera. esta se observa en la siguiente figura:



Figura 30 modelo propuesto, ya que este modelo fue utilizado para una prueba de cuál es el diámetro mínimo al cual puede llenar. por lo que el modelo final a utilizar puede tener ligeras variaciones.

Para poder recrear de forma idéntica el modelo, se hará una matriz de caucho silicón en la cual se inyectará cera fundida para poder recrear el mismo modelo de control y así evitar errores o distorsiones por la manufactura.

La masa del modelo de cera, incluyendo la peana es de 16.3g. La peana tiene una masa de 13.6g por lo cual la masa del del modelo de cera es de: 2.7g. para saber cuál será la masa necesaria del aluminio partimos de la primicia que en los procesos de conformado de materiales los volúmenes se mantienen constantes por lo cual:

$$V_i = V_f$$

Ecuación 30 Volumen inicial es igual a volumen final.

Conociendo esta ecuación necesitamos un parámetro que nos relacione la masa con el volumen. Este parámetro es la densidad de material. Por lo cual si despejamos el volumen de esta relación de variables y sustituimos en la ecuación 13 obtenemos:

$$\frac{m_m}{\rho_m} = \frac{m_{Al}}{\rho_{Al}}$$

Ecuación 31 Equivalencia de volumen con masa y densidad

$$m_{Al} = \frac{m_m(\rho_{Al})}{\rho_m}$$

Ecuación 32 Relación de masas y densidades para obtener el gramaje de la pieza final.

Con la ecuación 14 se puede obtener el peso final y el material necesario para fundir. Cabe recalcar que en la fusión del material se producirá escoria, esta escoria afectará directamente en el material necesario por lo que a el peso obtenido se le sumará un rango entre el 10% y 15% ya que, en caso de exceder, es muy poco material el cual quedaría en el hueco que deja la peana sin correr un riesgo de provocar un accidente.

La masa del modelo de control será de:

$$m_{Al} = \frac{2.7g \left(2.7 \frac{g}{cm^3} \right)}{0.9 \frac{g}{cm^3}} = 8.1g$$

Ecuación 33 Resultado de la masa a usar en el ensayo.

Con 8.1 g de cera se puede obtener un modelo relativamente grande ya que es de 9 cm^3 .

Se realizó una prueba con el modelo de cera de la figura 29 utilizando la experiencia de las pruebas anteriores y se obtuvo un resultado consistente ya que el modelo de palmera con las curvas lleno del todo con lo cual también ayuda a saber el alcance ya que la máquina fue capaz de llenar ese modelo incluso los canales que tenían un regreso. El acabado de la pieza es aceptable ya que tiene un brillo consistente con el material, aunque por un error de la aplicación la máquina no giro con

suficiente velocidad por lo que el material no fue inyectado del todo solo llenado la corona de la palmera.

En base a los resultados prácticos y por facilidad para modelar esta forma, se decide que el modelo de control tenga esa forma.



Figura 31 prueba de llenado con modelo en forma de palmera.

2.- Comprobación de llenado en el molde de cristobalita

En este apartado se comprobará a través de mecánica de fluidos computacional (CFD), con uso del programa de simulación COMSOL Multiphysics 4.2 con el módulo de estudio de transferencia de calor y tipo de estudio transferencia de calor en fluidos.

2.1 Parámetros del estudio

Dentro del estudio que se realizó, se utilizaron 4 diámetros para las probetas que se modelaron para el análisis del modelo propuesto, estas son:

- $\frac{1}{32}$
- $\frac{5}{32}$
- $\frac{1}{16}$
- $\frac{1}{8}$

Los parámetros en los diferentes ejercicios serán los mismos, En cada caso de estudio solo se variará el diámetro de las probetas. Las variables con las que se realiza el experimento son las calculadas en el capítulo anterior.

1.1. PARAMETERS 1

PARAMETERS

Name	Expression	Description
rho1	2700[kg/m ³]	Density
k1	205[W/(m*K)]	Thermal conductivity
gamma1	1	Ratio of specific heats
mu1	1.3[Pa*s]	Dynamic viscosity
T0	300[K]	Ambient temperature
T_in	933[K]	Melt inlet temperature
v_cast	8.3[m/s]	Casting speed
T_m	1100[K]	Melting temperature
dT	30[K]	Temperature transition zone half width
dH	205[kJ/kg]	Enthalpy
epsilon	1e-3	Volume force damping constant
A_mush	6e4[kg/(m ³ *s)]	Volume force damping constant
h_br	25[W/(m ² *K)]	Heat transfer coefficient, brake ring
h_mold	800[W/(m ² *K)]	Heat transfer coefficient, mold
h_air	10[W/(m ² *K)]	Heat transfer coefficient, air exposure
eps_s	0.8	Surface emissivity, air exposure

Figura 32. Variables con las cuales se realizó la simulación.

2.2 Ecuaciones usadas para la simulación

El programa necesita de un modelo matemático con el cual realiza la simulación. En este caso de estudio se necesitan ecuaciones de transferencia de calor y de flujos de fluidos las cuáles serán las encargadas de describir el fenómeno de la fusión y llenado del molde con Aluminio.

2.2.1 Ecuaciones de transferencia de calor con calor latente

Ecuación de calor. – usada para describir la distribución de calor o variaciones de la misma en una región a lo largo del transcurso del tiempo.

$$\rho \cdot DL \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q$$

Figura 33 Ecuación de calor.

Calor latente. – Ecuación utilizada para determinar el calor necesario en el proceso de fusión, interpretada gráficamente, en este caso como un pulso.

$$D = \frac{d\alpha}{dT} \quad \text{with} \quad \int_{T_m - \frac{\Delta T}{2}}^{T_m + \frac{\Delta T}{2}} DLdT = L$$

Figura 34 Ecuación usada para determinar el Calor latente liberado

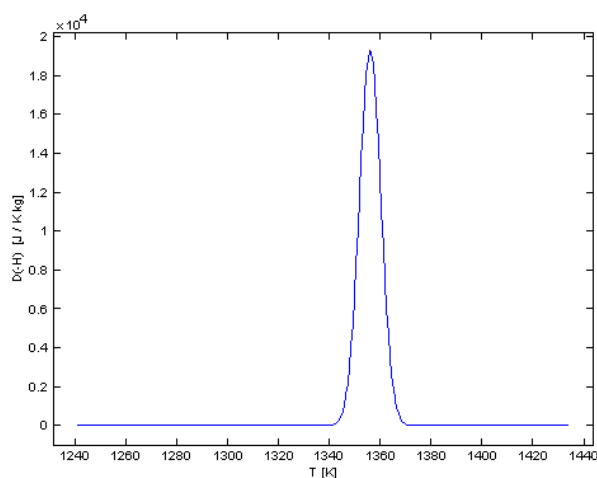


Figura 35 Representación gráfica del calor latente necesario para realizar la fusión.

Los intervalos de la integral, corresponden a el modelo de la fase de transición alrededor de la temperatura de fusión que se pueden observar en el rango de la gráfica.

$$-\frac{\Delta T}{2} \leq T \leq T_m + \frac{\Delta T}{2}$$

Figura 36 modelo usado para delimitar el rango en la temperatura de fusión.

Valor α . – valor utilizado como indicador de fase, siendo igual a 1 en condiciones después del intervalo de transición y 0 antes de este.

2.2.2 Ecuaciones de flujo de fluidos con transición de fase

Numero de Reynolds. – calculado en el capítulo anterior.

Ecuaciones de Navier-Stokes. – Conjunto de Ecuaciones en derivadas parciales no lineales que describen el movimiento de un fluido.

$$\rho \frac{D\mathbf{u}}{Dt} = \rho \mathbf{k} - \nabla P + \mu \left(\frac{1}{3} \nabla(\nabla \cdot \mathbf{u}) + \nabla^2 \mathbf{u} \right)$$

Figura 37 Ecuación simplificada de Navier-Stokes en forma simplificada vectorial.

Matriz de fraccion de fase solida. – se utiliza una matriz la cual va de la mano con el intervalo α en la cual dependiendo la temperatura se puede determinar la fraccion solidificada del metal.

$$\beta = \begin{cases} (T - T_m + dT)/2dT & T_m - dT \leq T \leq T_m + dT \\ 1 & T < T_m - dT \end{cases}$$

Figura 38 Matriz de fracción de fase sólida.

Name	Expression	Description
B	$(T - T_m + dT) / (2 * dT) * ((T <= (T_m + dT)) * (T >= (T_m - dT))) + (T > (T_m + dT))$	Fraction of liquid phase
fB	$(1 - B)^2 / (B^3 + \epsilon)$	Volume force prefactor
Fr	$-fB * A_{mush} * u$	Volume force density, r-component
Fz	$-fB * A_{mush} * (w - v_{cast})$	Volume force density, z-component
D	$\exp(-(T - T_m)^2 / (dT^2)) / (\sqrt{\pi}) * dT$	Temperature dependence, latent heat
Cp1	$380 [J / (kg * K)] + (dH / T_m) * f * c2 * hs((T - T_m) [1 / K], dT [1 / K])$	Heat capacity + latent heat contribution

Figura 39 Ecuaciones utilizadas para llevar a cabo la simulación.

2.3 Uso del programa

Una vez colocadas las variables y ecuaciones con las cuales se trabajará para la simulación de la inyección del aluminio, se procede a modelar la probeta que nos servirá de modelo de control.

En este caso como se busca conocer las dimensiones mínimas a las que se puede lograr una inyección exitosa, se modelan barras circulares rectas en las cuales se pueda observar y medir de una forma más eficiente cual es la cantidad de aluminio inyectado.

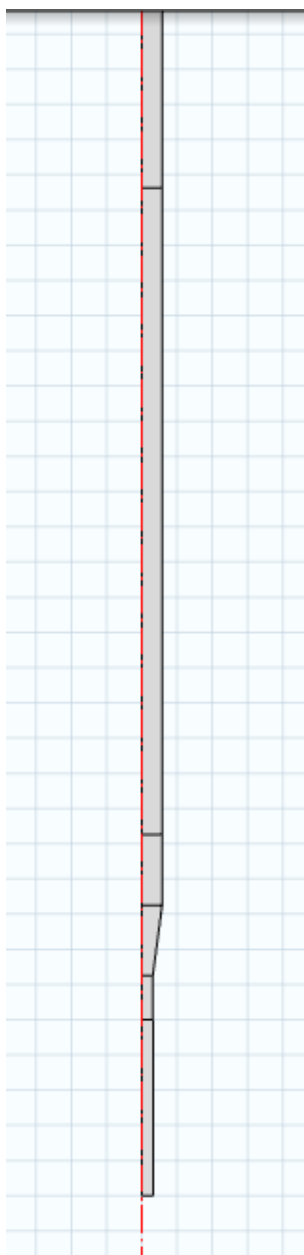


Figura 40 Ejemplo del modelo utilizado para realizar las simulacion.

2.4 Simulación.

Las probetas con las que se realizan los ensayos cuentan con dos diferentes diámetros y un cono que realiza el cambio gradual para observar el comportamiento del aluminio al cambiar de diámetro y, por ende, perder presión.

Se realizan 4 simulaciones en las cuales los diámetros son menores a 1/8 de pulgada.

Los resultados completos de los análisis son parte de los anexos de este trabajo.

2.4.1 Probeta de 1/8"

La probeta de este análisis, esta modelada con un diámetro de 1/8 de pulgada en la parte más estrecha y de 1/4 de pulgada en la parte más gruesa.

Con los parámetros investigados previamente, se puede observar que el aluminio fundido, logra mantener una temperatura superior al punto de fusión por aproximadamente a 25 cm en total, de los cuales, 12 cm son del diámetro menor y 8 cm del diámetro menor.

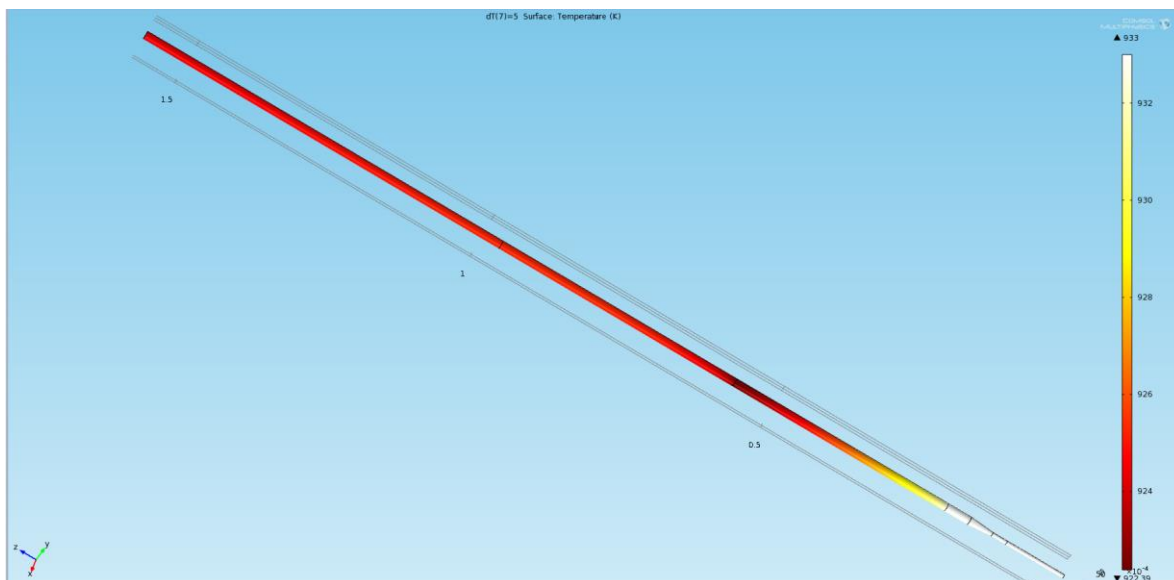


Figura 41 Resultado del ensayo con probeta de 1/8"

En el caso de la velocidad de llenado, podemos observar que la velocidad tiende a 0 m/s al entrar en la ampliación de diámetro, sin embargo, la velocidad se mantiene constante por aproximadamente 12 cm.

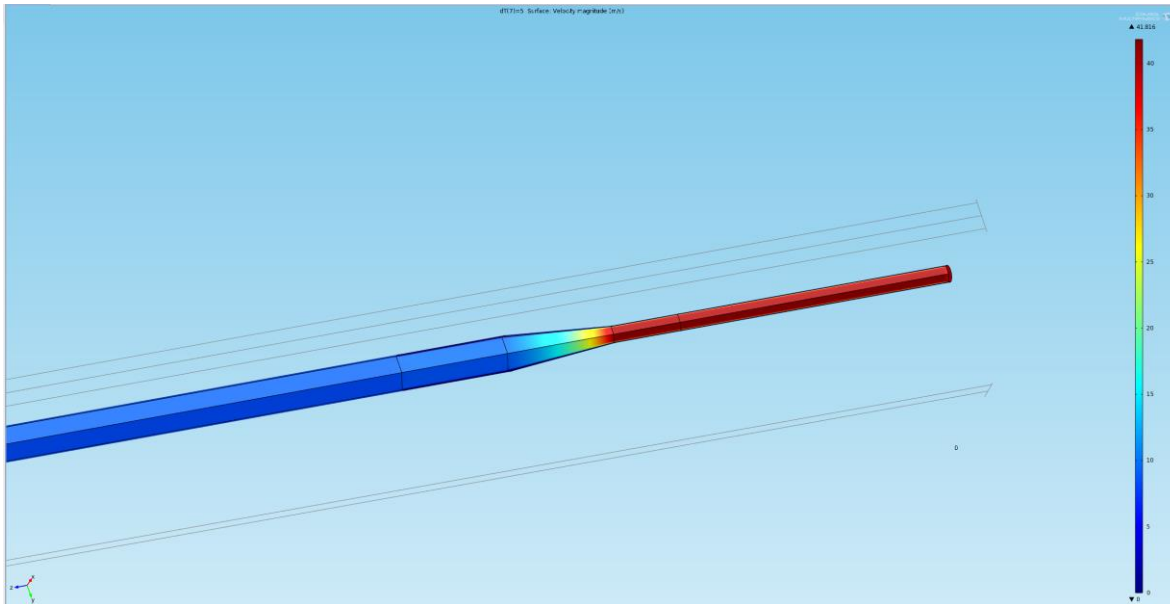


Figura 42 Grafico representativo a la velocidad del aluminio.

Con estos resultados obtenidos, podemos determinar que la maquina realiza un llenado del molde, apto para piezas de dimensiones menores/iguales a 1/8 de pulgada y 12 cm de longitud.

2.4.2 Probeta de 5/32"

La probeta de este análisis está formada por una sección estrecha de 5/32", en su parte más ancha es de 1/4" cuenta con una transición cónica y una longitud de 60 cm.

Se puede observar en la imagen siguiente que la velocidad se mantiene constante a 22.6 m/s en todo el diámetro de 5/32", la cual es una longitud de 12 cm. A la entrada de la transición cónica la velocidad se reduce gradualmente de 20 a aproximadamente 7 m/s el cual tiene una longitud de 4 cm. A partir de la salida de la transición, la velocidad se mantiene constante a 7 m/s.

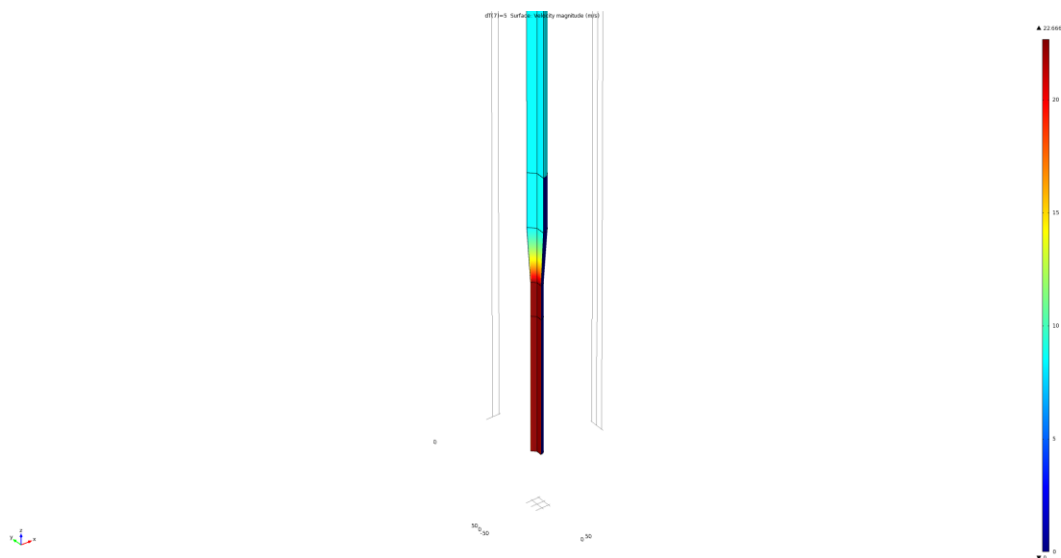


Figura 43 transición de velocidad del fluido en la probeta de 5/32".

En el caso del análisis térmico, el material comienza a solidificar a partir de los 20 cm recorridos aproximadamente, esto abarca las formas cilíndricas de 5/32", la transición cónica y el cilindro de 1/4" de espesor.

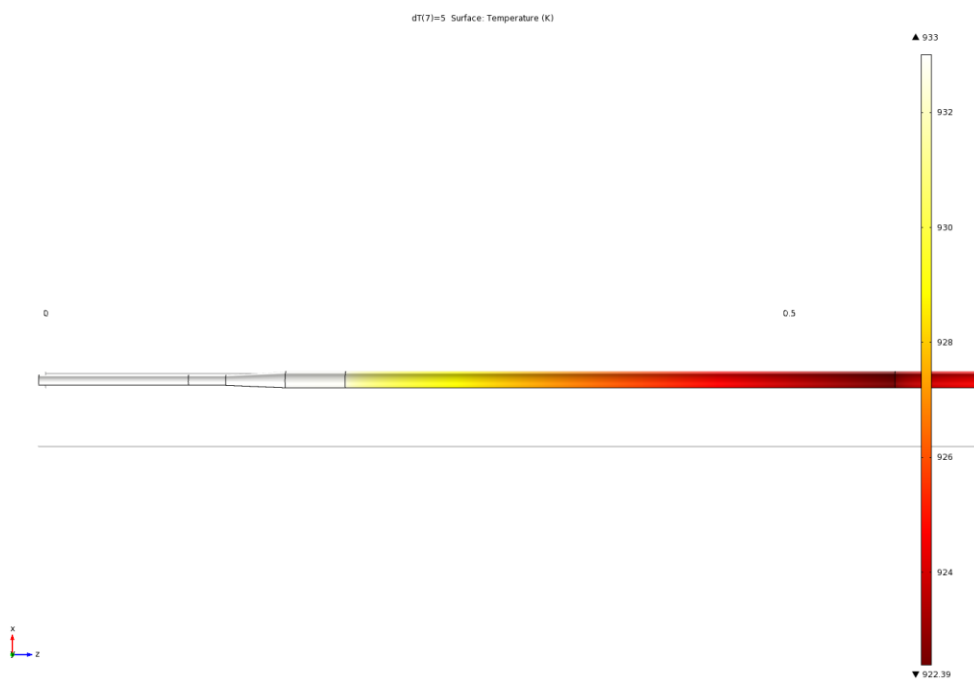


Figura 44 análisis térmico para probeta de 5/32"

A partir de estos dos ensayos, podemos deducir que la maquina es apta para realizar inyecciones de un diámetro de 5/32" con una longitud de 12 cm.

2.4.3 Probeta de 1/16"

Este ensayo se realizó con una probeta de 1/16" en su sección de menor diámetro, con una transición cónica y una sección de 9/16" en su diámetro mas grande.

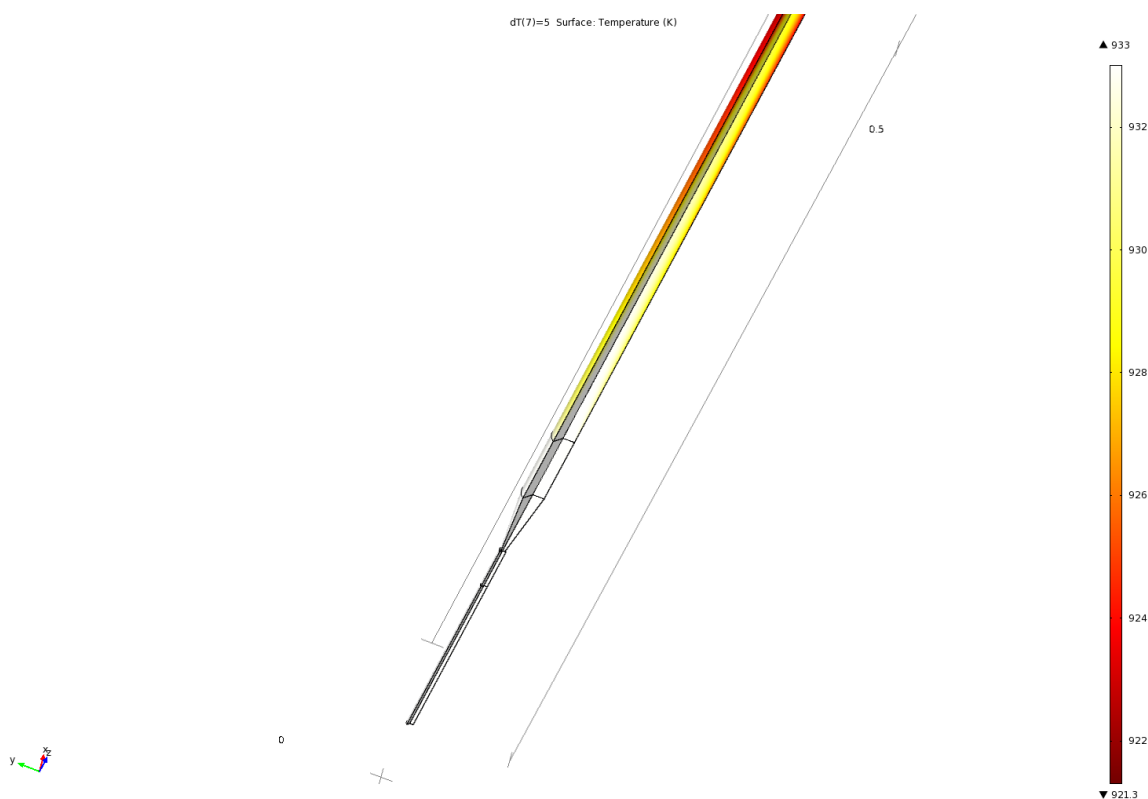


Figura 45 análisis térmico de probeta de 1/16"

En este análisis térmico, se puede observar que el aluminio comenzaría a solidificarse a aproximadamente 25 cm.

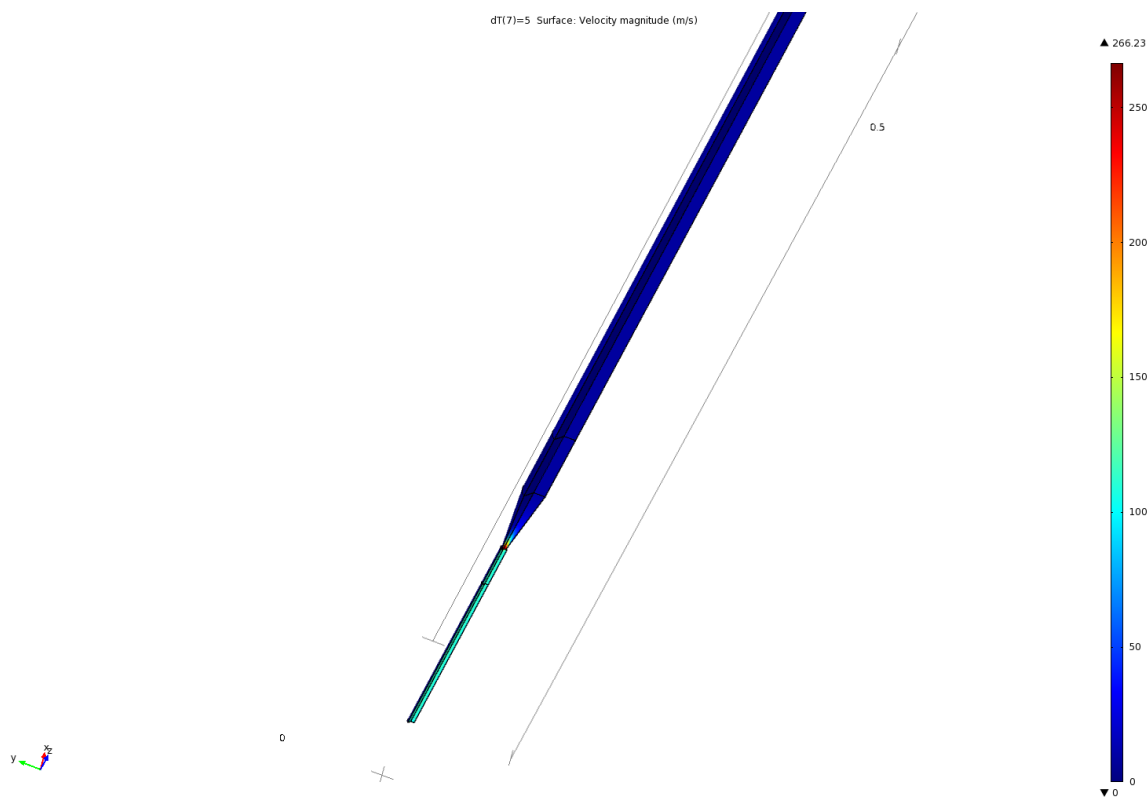


Figura 46 Análisis de velocidad para probeta de 1/16"

En este caso, se puede observar que, debido al cambio súbito de diámetro, se pierde la velocidad al punto de quedarse estático. Sin embargo, se obtiene un llenado de aproximadamente 13 cm con este diámetro.

Este estudio resulta ser más crítico que los anteriores debido al tamaño del diámetro de la probeta. El llenado se logra realizar en base al estudio de CFD, las dimensiones para el objetivo de este estudio resultan ser suficientes, ya que abre un amplio panorama a las formas de las probetas para realizar la comprobación en físico.

2.4.4 Probeta de 1/32

En este caso de estudio, se realiza meramente para comprobar el modelo matemático basado en las comprobaciones físicas de los ejercicios anteriores y conocer las capacidades de la máquina de centrifugado dental, ya que el diámetro propuesto para este estudio no existe comercialmente, el diámetro menor disponible por proveedores es de 1.10 mm. Las dimensiones de la probeta, son de 1/32" en toda su longitud.

La simulación nos entrega un diagrama en el cual se observa que el material se mantiene fluido por aproximadamente 18 cm, con lo cual dado el diámetro, es un resultado mas que suficiente para la realización de piezas muy llenas de detalle.

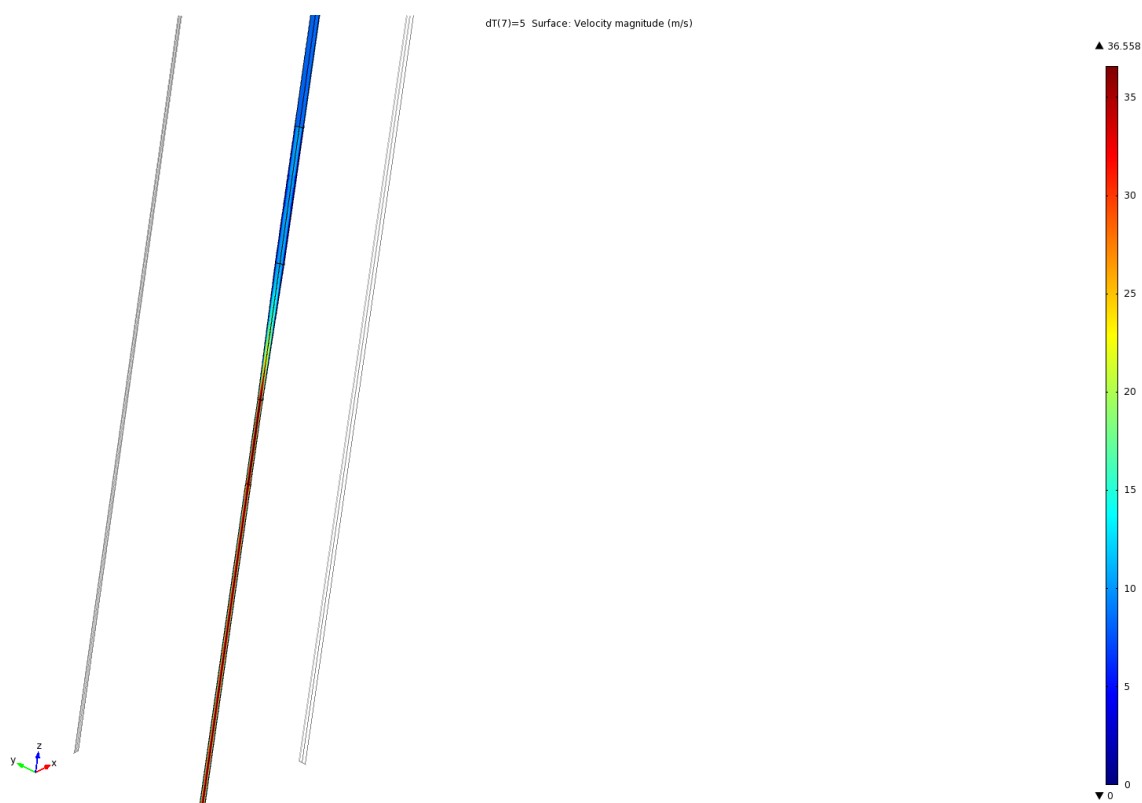


Figura 47 estudio de velocidad en probeta de 1/32"

En el caso de los resultados de la temperatura, el dibujo nos muestra que el material se mantiene a una temperatura lo suficientemente elevada, para mantenerse fluido, con lo cual complementa el argumento anterior del cual la máquina es capaz de realizar modelos con mucho detalle.

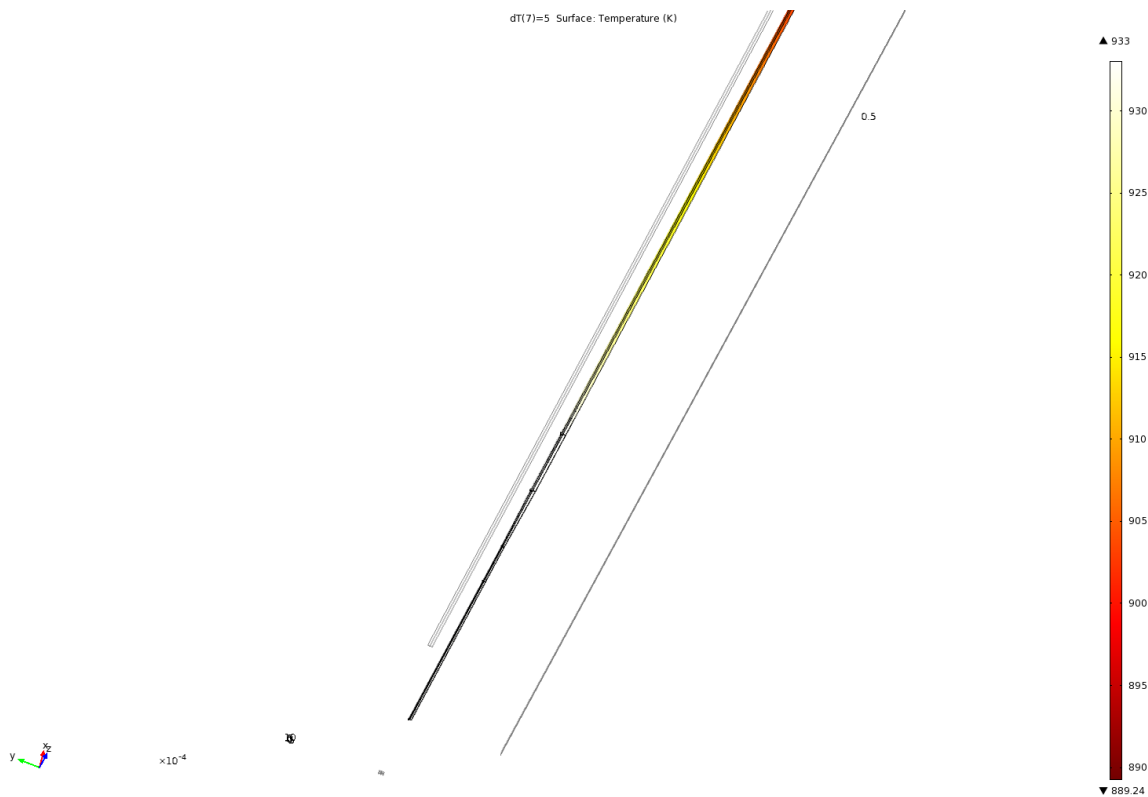


Figura 48 Estudio de Temperatura en probeta de 1/32"

2.5 Comprobación Práctica

En este apartado se documentará el proceso de microfundición centrífuga en moldes de investimento con máquina de centrifugado dental, se describirá desde la fabricación de moldes, así como la fundición del aluminio y el llenado del molde para la comprobación del llenado.

2.5.1 Manufactura de moldes.

Para este apartado en busca de condiciones lo más cercanas a las dadas por el programa de CFD, se propone el desarrollo una cámara de vacío, esto con la finalidad de generar un investimento lo más uniforme posible para evitar los defectos generados por la acumulación de burbujas en la etapa de mezclado del investimento. Los materiales con los que se cuenta para realizar la cámara son:

- Eyector de vacío marca SMC modelo ZL112A-G
- Ventosa marca PIAB modelo FP110P
- Vacuómetro marca PIAB
- Para cámara de vacío se propone el uso de un bote de plástico HDPE de 10 litros.

2.5.1.1 Prototipo de la cámara de vacío

Se manufacturo unprototipo de camara de vacio con un bote de plastico de 10 litros y estos fueron los resultados:



Figura 49 Primer modelo de cámara de vacío



Figura 50 Lectura de manómetro incluido en el módulo SMC

Al realizar una prueba se llegó a una presión de -10 KPa, el módulo es capaz de generar más vacío, pero debido al colapso de la cámara por no tener un espesor adecuado, se decidió no sobrepasar este valor.



Figura 51 Cámara de vacío comenzando el colapso



Figura 52 cámara de vacío totalmente colapsada



Figura 53 otra vista del colapso

El resultado del uso de una cámara de vacío es un molde aparentemente más liso y sin la presencia de burbujas de gran tamaño, aunque aún se encuentran deformidades, pero de un radio no mayor a un milímetro.



Figura 54 molde resultante de la cámara de vacío



Figura 55 burbuja resultante del uso de cámara de vacío.

Se puede observar la mejoría de la calidad de los moldes al ser una superficie uniforme, ya que la cantidad de poros por burbujas se aprecia en menor cantidad y de menor tamaño, se hará uso de ella en la manufactura de los moldes de investimento.

2.5.1.2 Preparación del molde y del investimento.

2.5.1.2.1 Preparación del cubilete.

Los cubiletes se pueden encontrar en diferentes diámetros, el tamaño a utilizar en esta prueba es de un diámetro de dos pulgadas y 10 centímetros de longitud.

El modelo se debe unir a el árbol de la peana, para comenzar el proceso de moldeo. Una vez que el modelo este unido a la peana, cubrir con el cubilete y está listo para el vaciado del revestimiento. Se recomienda colocar un pedazo de papel cubriendo el interior del cubilete para facilitar la limpieza del investimento y evitar que el investimento se adhiera a las paredes.

2.5.1.2.2 Preparación del investimento.

Para esta prueba se utiliza de revestimiento, cristobalita comprada a granel, el vendedor especifica que, para su correcto fraguado, se debe mezclar 250 gr de polvo por cada 100 ml de agua a temperatura ambiente (25°C). En caso de quedar la mezcla muy espesa, agregar moderadamente agua sin sobrepasar de 150 ml.

Al realizar la preparación, mezclar moderadamente para evitar en lo posible la generación de burbujas, procurar no mezclar durante mucho tiempo ya que la cristobalita tiene un fraguado en corto tiempo y al realizar el vaciado en el molde se pueden generar cavidades ajenas al modelo, generando deformidades en la pieza.

Una vez vertida la cristobalita, antes que comience a fraguar, para asegurar que llene en su totalidad, se golpea la peana o se coloca sobre una mesa vibradora para que se cubran por completo el modelo y las burbujas atrapadas en el interior, sean liberadas. Se ingresa a la cámara de vacío aproximadamente 10 minutos que es el tiempo aproximado que tarda en solidificar. Se recomienda dejar reposar el molde por 24 horas antes de comenzar el desencerado ya que al estar húmedo el molde puede generar grietas con el aumento de temperatura y dañar el mismo.

2.5.1.2.3 Desencerado.

El molde está a un paso de poder recibir en su interior el aluminio, para realizar el llenado, se debe desencerar. Ya que hasta este punto el modelo de cera sigue allí. Para lograr este cometido, basta con extraer la cera, para lograrlo se requiere de un horno para desencerado. Las condiciones de esta prueba no cuentan con esta herramienta, por lo cual se hará uso de una mufla de laboratorio para lograrlo, en este paso aparte de generar la cavidad también ayuda en la cocción del investimento y evita el choque térmico del metal dentro del molde ya que la diferencia de temperatura es menor y la posibilidad de generar un tapón por solidificación del metal disminuye.

Aunque esto no quiere decir que es más recomendable para esta práctica un molde más caliente, ya que, si está a una temperatura cercana al punto de fusión del metal, complicaría la solidificación por lo cual al retirar el molde de la máquina podría incluso escurrir por falta de estabilidad mecánica.

La temperatura aproximada a la que se coloca la mufla para esta prueba es de 550°C, y se deja aproximadamente veinte minutos en su interior, si cumplido este tiempo siguen escapando vapores de su interior significa que la cera aun no está del todo desintegrada, a la par de este paso, se pesa y prepara el aluminio que llenará la cavidad.

2.5.2 Preparación del aluminio para fundición.

En los procesos de conformación de materiales, existen relaciones que rigen las transformaciones. En el caso de la forja y de la fundición durante la transformación se mantiene constante el volumen ya que, en la forja, se golpea el material “comprimiéndolo” hasta llegar a la forma deseada, en el caso de la fundición, el metal líquido llena una cavidad, adoptando la forma del molde. Por esta razón, la relación que nos ayudará con el cálculo del metal necesario para los moldes será dado por la expresión:

$$V_f = V_i$$

Ecuación 34 Expresión usada para los procesos de forja y fundición

Partiendo de esta expresión podemos realizar una sustitución ya que se necesitan las unidades de las variables acorde a masa:

$$\frac{m_{Al}}{\rho_{Al}} = \frac{m_{mod}}{\rho_{cera}}$$

Ecuación 35 relación entre volumen final y volumen inicial en función de la masa.

Con esta relación, se puede calcular la masa necesaria del aluminio para llenar los moldes, el valor para la densidad de la cera a utilizar en este estudio es de $950 \frac{Kg}{m^3}$ solo es necesario despejar la variable de la masa del modelo. A la masa del modelo se debe descontar la masa de la peana, para este caso el peso de la misma es de 13.6 gr. Derivado de que las basculas están sujetas a error, se hace uso de una tolerancia de 10% extra en el peso del aluminio. Este paso se realiza antes de fabricar el molde.



Figura 56 modelo de cera listo para pesar.

Una vez que el molde se encuentra desencerado y caliente, se coloca el aluminio en el crisol, se coloca el molde en su lugar dentro de la máquina y se alinea con el crisol.

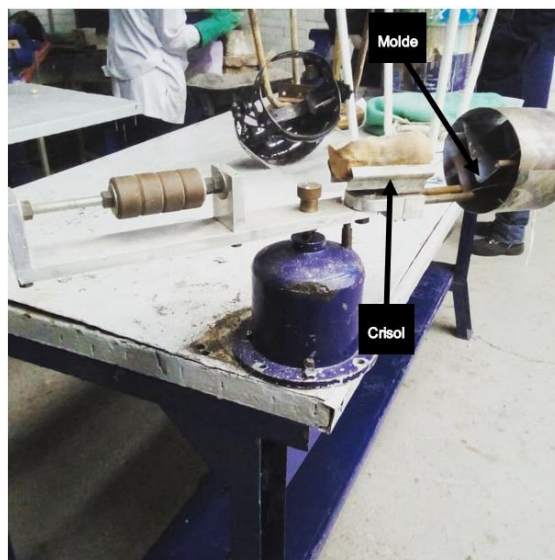


Figura 57 Maquina con crisol y molde.

2.5.3 Fusión y vaciado.

Una vez que esta todo en su sitio, y la maquina con el resorte comprimido almacenando energía, se procede con la fundición. En este caso se realiza utilizando un soplete de oxiacetileno ya que este suministra la suficiente temperatura para realizar la fundición del aluminio, solo se debe tener cuidado de no sobrepasar la temperatura de fusión para evitar la contaminación por hidrogeno o nitrógeno.



Figura 58 Fusión del aluminio con soplete de oxiacetileno.

En este punto se usa el cálculo que se realizó en la primer parte de esta investigación, la cual se obtuvo a partir de un análisis matemático el ángulo óptimo con el cual se debe realizar la inyección y la posición en la cual deben estar colocados los contrapesos para minimizar la vibración y maximizar el giro.



Figura 59 Maquina en posición para aprovechar el giro al máximo

Una vez que el metal ha alcanzado la temperatura de inyección (650°C) se realiza el vaciado, comprimiendo el resorte hasta que el seguro caiga por gravedad y se suelta la máquina para que el resorte libere la energía. En cuanto termina de girar, el crisol se debe colocar en agua para que el metal se termine de enfriar y para que el choque térmico quiebre el molde de cristobalita y se pueda acceder al modelo.



Figura 60 pieza extraída del agua después del rompimiento del molde

El alcance de esta investigación tuvo que ser modificado durante su realización debido al confinamiento generado por la pandemia de virus SARS-CoV-2-2019. Por lo cual queda como trabajo a futuro, la comprobación practica del modelo matemático con modelos de mayor dificultad en las instalaciones del laboratorio L1: diseño y manufactura de la FES Aragón.

3.- Conclusiones

Se realizaron tres pruebas practicas con tres modelos de los mismos diámetros que en las pruebas de simulación por CFD. Dos de ellas se concretaron con éxito y una con error. La pieza del error corresponde al diámetro más pequeño, en este caso, de 3 mm. La manufactura del molde causo un defecto en la entrada del bebedero, por lo cual no lleno y el metal quedo apelmazado en la entrada del molde. Los otros dos ejercicios correspondientes a un diámetro de 6.35 mm y 1mm, se consiguió un llenado consistente, en el caso del modelo de 1 mm, se generó una burbuja en el molde con lo cual el vaciado no fue el correcto, sin embargo, se logró un llenado a el mínimo diámetro.



Figura 61 pieza resultado del vaciado del modelo de 1mm.

El modelo de 6.35 mm tuvo un error en el cálculo del material necesario, sin embargo. El metal recorrió toda la cavidad para tomar su forma.



Figura 62 pieza resultado del vaciado del modelo de 6.35 mm

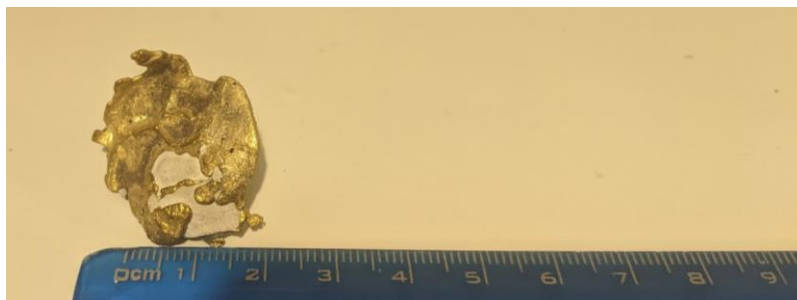


Figura 63 Pieza resultado de la colisión por no poder entrar al molde.

Ya que se consiguió un llenado a un diámetro de 1 mm, se comprobó el modelo matemático el cual indica que la maquina es capaz de realizar un llenado inclusive a diámetros menores. Por lo cual, se considera cumplido el objetivo de esta investigación.

Con respecto al uso del CFD, se concluye que el modelo propuesto describe con buena aproximación los resultados obtenidos en el laboratorio con las primeras pruebas realizadas antes del confinamiento de la pandemia provocada por el virus SARS-CoV-2.

4.- Bibliografía

- ASM, I. (1998). *Metals Handbook. Volume 15: Casting*. E.E.U.U.
- Beer, F., Johnston, E., & Eisenberg, E. (2007). *Mecánica Vectorial Para Ingenieros: Estática*. México DF: McGraw-Hill.
- Coriolis, G. G. (1836). *Efecto Coriolis*.
- Espinosa De Los Monteros Carmona, O., & Herrera Alonzo, C. (2005). *Diseño y manufactura de una máquina de fundición centrífuga*. Nezahualcoyotl, Estado De México : FES Aragón.
- Hibbeler, R. C. (2010). *ingeniería mecánica - Dinámica*. México: PEARSON EDUCACION.
- Hibbeler, R. C. (2010). *Mecánica Vectorial Para Ingenieros: Dinámica*. Mexico: Pearson.
- International, A. (2012). *ASTM volume 01.01 steel piping, tubing, fittings*.
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2002). *manufactura, ingeniería y tecnología*. Pearson Educación.
- King, F. (1992). *El Aluminio y sus aleaciones*. México, D.F.: Limusa.
- Mataix, C. (1986). *Mecánica De Fluidos y Máquinas Hidráulicas*. Madrid: Ediciones DEI Castillo, S. A.
- Newton, S. I. (1690).
- Serrano, R. (2011-2012). *Apuntes de Procesos Industriales*. Malaga.
- Zhang, F., Du, Y., Liu, S., & Jie, W. (2 de 04 de 1977-2015). Calphad: Computer Coupling of Phase Diagrams and Thermochemistry. En ScienceDirect. Netherlands: Elsevier B.V.