

**SIMULACIÓN DEL PROCESO DE PRE-ENGASTE DE ANILLOS CON
ESMERALDAS COLOMBIANAS ANALIZANDO LA VARIACION DE LOS PERFILES
DE TEMPERATURA TENIENDO EN CUENTA CONDICIONES DE TRANSFERENCIA
DE CALOR UTILIZANDO EL SOFTWARE SOLIDCAST 8**



**KAREN LIZETH PINZÓN FERNÁNDEZ
DIEGO FERNANDO FONSECA CHACÓN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO- QUIMICAS
INGENIERIA METALURGICA Y CIENCIA DE
MATERIALES BUCARAMANGA**

2015

**SIMULACIÓN DEL PROCESO DE PRE-ENGASTE DE ANILLOS CON
ESMERALDAS COLOMBIANAS ANALIZANDO LA VARIACION DE LOS PERFILES
DE TEMPERATURA TENIENDO EN CUENTA CONDICIONES DE
TRANSFERENCIA DE CALOR UTILIZANDO EL SOFTWARE SOLIDCAST 8**

**KAREN LIZETH PINZÓN FERNÁNDEZ
DIEGO FERNANDO FONSECA CHACÓN**

**Trabajo de grado, presentado como requisito parcial
para optar al título de Ingeniero metalúrgico**

**Director
ARNALDO ALONSO BAQUERO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO- QUIMICAS
INGENIERIA METALURGICA Y CIENCIA DE
MATERIALES BUCARAMANGA**

2015

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su principal agradecimiento al profesor y director del proyecto ING. ARNARDO ALONSO BAQUERO por su acompañamiento, apoyo y colaboración, además de brindar sus conocimientos y experiencias durante la realización de la investigación. A COLCIENCIAS por la financiación del proyecto a través del macro proyecto “innovación del método de gemas pre-engastadas en el proceso de microfundición, para su implementación en la joyería con esmeraldas colombianas”, identificado en la UIS con el código 9418 y por Colciencias con el código 1102-521-28875

También se presentan agradecimientos a la directora e ING. ELCY MARÍA CORDOBA TUTA y al grupo de investigación GIMAT por su apoyo y aporte frente a inquietudes presentadas durante esta investigación.

DEDICATORIA

A:
Dios, por darme la oportunidad de vivir y por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

Mis padres Angel M Pinzón Carreño y Teresa del Pilar Fernández Vega, por darme la vida, quererme mucho, creer en mí y porque siempre me apoyaron. Gracias por darme una carrera para mi futuro, todo esto se los debo a ustedes.

Mis hermanos, Angel y Silvia Juliana, y mi cuñada Elizabeth, por estar conmigo y apoyarme siempre, los quiero mucho.

Mis abuelos Teresa Vega, Mario Fernández (QEPD), y Rita Carreño (QEPD), por quererme y apoyarme siempre, esto también se lo debo a ustedes.

Mi novio Oscar Fabian Vasquez Landazabal, por ser mi soporte, mi compañía y una voz de aliento en la culminación de esta etapa.

Mis tías Rosa Cristina, Jhomaira, Elsie, Elsa, y a mis primos Andrea Paola y Edgar Alexander, por sus buenos consejos y su apoyo.

Mis grandes amigas, Angie Gabriela, Isabel Cristina, Claudia Carolina, Stefany, por compartir los buenos y malos momentos.

Todos mis amigos, Shirley, Nain, Richard, Heyler, Eduard, Sebastian, Jhonatan, Jose Luis, Edgar Fabian, por los buenos momentos que me brindaron

Mi compañero de proyecto Diego Fernando, por acompañarme en todo momento y ser parte fundamental para la realización de este libro y lo que representa.

El ingeniero, colega y amigo Huber Anaya por brindarnos su apoyo y colaboración para ver lograda nuestra meta.

Todos aquellos familiares y amigos que no recordé al momento de escribir esto. Ustedes saben quiénes son.

Karen Lizeth Pinzón Fernández

DEDICATORIA

En primer lugar a Dios por todas las bendiciones brindadas y por permitirme cumplir tan importante meta de mi vida.

A mi madre Martha Chacón y a mi padre Prospero Fonseca, por apoyarme incondicionalmente a lo largo de mi carrera y motivarme a seguir a delante.

A mi compañera de proyecto Karen Lizeth, por acompañarme en todo momento y ser parte fundamental para la realización de este libro y lo que representa.

A mis amigos, compañeros, profesores y familiares que siempre me apoyaron y acompañaron durante el todo el proceso de aprendizaje.

-Diego Fernando Fonseca Chacón

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO	18
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	18
1.2 OBJETIVOS	19
1.2.1 Objetivo general.....	19
1.2.2 Objetivos específicos	19
2. ESTADO DEL ARTE.....	20
2.1 TIPO DE ENGASTES.....	23
3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	26
3.1 MODELAMIENTO COMPUTARIZADO	26
3.2 MÉTODOS DE PROCESO.....	26
3.2.1 Método diferencial finito (SOLIDCAST)	27
3.2.2 Método elementos finitos-MEF (PROCAST).....	27
3.2.3 Método volumen finito (MAGMASOFT).....	27
3.2.4 Método elementos vectoriales (AUTOCAST).....	27
3.3 DEFINICIÓN DE ESMERALDA.....	28
3.3.1 Propiedades físicas de la esmeralda	29
3.4 MOLDES PARA JOYERÍA	30
3.4.1 Propiedades.....	30
3.5 FORMULACIÓN, LEYES Y PRINCIPIOS.....	30
3.5.1 Transferencia de calor	30
4. METODOLOGIA	32
4.1 DISEÑO DEL EXPERIMENTO	33
4.1.1 Diseño del sistema de llenado	33
4.1.2 Características fisicoquímicas del molde	34
4.1.3 Características fisicoquímicas y termodinámicas de la aleación.....	36
4.1.4 Características del recubrimiento.....	38
4.2 DISEÑO DEL BEBEDERO DE COLADA.....	40

4.2.1 Tiempos de colada.....	42
4.2.2 Simulación del proceso de llenado	43
4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS	43
4.3.1 Determinación de perfiles de temperatura en el molde anillo-esmeralda	43
4.4 VERIFICACIÓN DE RESULTADOS	47
5. CONCLUSIONES	50
6. RECOMENDACIONES.....	52
REFERENCIAS	53
BIBLIOGRAFÍA.....	55
ANEXOS.....	57

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Propiedades físicas de la esmeralda.....	29
Tabla 2. Datos del Sistema de Llenado	34
Tabla 3. Composición de los moldes	36
Tabla 4. Características de la aleación.....	38
Tabla 5. Datos de los bebederos de Colada	41

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Pieza con engaste	23
Figura 2. Engaste de carre o carril	23
Figura 3. Engaste de granos.....	24
Figura 4. Engaste de bisel	24
Figura 5. Engaste en chapa.....	25
Figura 6. Interface de usuario para los programas autocast, magmasoft, procast, solidcast.	28
Figura 7. Representación gráfica de la transferencia de calor en diferentes momentos de la colada.....	31
Figura 8. Diagrama de la metodología usada en el proyecto.	32
Figura 9. Modelo de los ataques en el simulador.....	33
Figura 10. Diagramas de fases aleación empleada	37
Figura 11. Diseño del bebedero de llenado en el simulador	41
Figura 12. Tipos de bebederos empleados.....	42
Figura 13. Simulación del proceso de llenado para los tres tipos de bebederos con un ataque	44
Figura 14. Simulación del proceso de llenado para los tres tipos de bebederos con dos ataques.....	44
Figura 15. Simulación del proceso de llenado para los tres tipos de bebederos con tres ataques	45
Figura 16. Valor mínimo de temperatura alcanzado.....	48
Figura 17. Porcentaje de temperatura perdida durante el proceso de simulación.....	48

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Comparación entre los tipos de refractarios simulados	58
Anexo B. Simulación del proceso de llenado para el los diferentes tipos de bebederos, para un ataque	61
Anexo C. Diseño de los sistema de colada con variacion de bebedero y ataques, acontinuacion se presentan algunos de ellos.....	62

ESPECIFICACIONES DEL PROYECTO

TITULO

**SIMULACIÓN DEL PROCESO DE PRE-ENGASTE DE ANILLOS CON
ESMERALDAS COLOMBIANAS ANALIZANDO LA VARIACION EN LOS
PERFILES DE TEMPERATURA TENIENDO EN CUENTA CONDICIONES DE
TRANSFERENCIA DE CALOR UTILIZANDO EL SOFTWARE SOLIDCAST 8**

AREA

FUNDICIÓN

MODALIDAD

INVESTIGACIÓN

AUTORES

**KAREN LIZETH PINZÓN FERNÁNDEZ
DIEGO FERNANDO FONSECA CHACÓN**

DIRECTOR

PROFESOR ARNALDO ALONSO BAQUERO

RESUMEN

TITULO: SIMULACION DEL PROCESO DE PRE-ENGASTE DE ANILLOS CON ESMERALDAS COLOMBIANAS ANALIZANDO LA VARIACION EN LOS PERFILES DE TEMPERATURA TENIENDO EN CUENTA CONDICIONES DE TRANSFERENCIA DE CALOR UTILIZANDO EL SOFTWARE SOLIDCAST 8

AUTORES: FONSECA CHACÓN, Diego Fernando. PINZÓN FERNÁNDEZ, Karen Lizeth**

PALABRAS CLAVES: Diseño CAD/CAM, modelado computarizado, transferencia de calor por conducción, convección, perfiles de temperatura de llenado y solidificación.

Este proyecto tiene como fin simular los posibles comportamientos presentados por una aleación y una esmeralda pre-engastada durante el proceso de microfundición, en el cual se tienen en cuenta la implementación de diferentes materiales para el molde refractario tales como: circonita, cromita y arena sílice, y un tipo de aleación en base oro agregado a la base de datos del programa de simulación solidcast 8. Se diseñó un sistema de llenado con el fin de aumentar el gradiente de temperatura del metal fundido en los puntos críticos en los que exista el contacto de éste con la esmeralda durante la colada; para lo cual se trabajó con una variación en el sistema de colada, incrementando el número de ataques de uno a dos y tres, y se realizando una modificación del bebedero convencional por uno cuyas secciones son variables.

Se espera que la modificación del sistema ayude a disipar gran cantidad de calor del metal fundido antes que este entre en contacto con la gema para evitar los posibles daños que sufre la esmeralda cuando es sometida a temperaturas elevadas, como lo son la aparición de grietas, fracturas, pérdidas de color y de propiedades fisicoquímicas que determinan el valor de dichas piedras preciosas

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Fisico- Químicas Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales Bucaramanga. Director: Arnaldo Alonso Baquero.

ABSTRACT

TITLE: SIMULATION OF THE PROCESS OF PRE - CRIMPING COLOMBIAN EMERALDS RING WITH ANALYZING THE VARIATION IN TEMPERATURE PROFILES CONSIDERING HEAT TRANSFER CONDITIONS OF USING THE SOFTWARE SOLIDCAST 8

AUTHORS: FONSECA CHACÓN, Diego Fernando. PINZÓN FERNÁNDEZ, Karen Lizeth**

KEYWORDS: Design CAD / CAM, computer modeling, heat transfer by conduction, convection, temperature profiles filling and solidification.

This project aims to simulate the possible behaviors presented by an alloy and pre-crimped emerald during microcasting, which takes into account the implementation of different materials for the refractory mold such as zirconia, chromite and silica sand, and a type gold based alloy added to the database of the simulation program SolidCast 8. a filling system was designed in order to increase the temperature gradient of the molten metal in the critical points where there is contact the latter with emerald during casting; for which we worked with a variation in the casting system, increasing the number of attacks of 1 to 2 and 3, and a modification of the conventional sprue whose sections are variables was performed.

It is expected that modification of the system will help dissipate large amounts of heat from the molten metal before it enters into contact with the gem to prevent possible harm suffered by the emerald when subjected to high temperatures, such as cracking, fractures, loss of color and physicochemical properties that determine the value of these precious stones

* Work degree

** Faculty of engineering physicochemical Metallurgical Engineering and Materials Science Bucaramanga. Director: Arnaldo Alonso Baquero.

INTRODUCCIÓN

Desde épocas antiguas se conoce la importancia de la fabricación de piezas metálicas como medio de defensa o decorativas, la orfebrería es una de las ramas de la metalurgia más antigua, en donde se combina con conocimientos de piedras preciosas encontradas en la corteza terrestre. Hoy en día la alta demanda en la fabricación de piezas para la joyería como para otras industrias, ha requerido la utilización de técnicas más complejas y efectivas, como por ejemplo la simulación computarizada en el diseño y producción de piezas.

La tecnología CAD/CAM ha sido usada exitosamente por décadas en otras industrias, la automotriz, aérea, deportes, comunicaciones, etc. En la industria de la joyería se ha tenido un avance significativo en la producción de piezas, sin embargo se requiere más estudio de las condiciones físicas del proceso de producción. Existe una considerable variedad de software que pueden determinar los mejores entornos de trabajo, como son perfiles de temperatura del metal fundido, cambios en las temperaturas del molde y en las gemas, en los perfiles de solidificación del metal, entre otros.

Este plan tiene como finalidad determinar los perfiles de temperatura, transferencia de calor entre los componentes que pertenecen al molde, así como optimizar las variables para determinar los mejores resultados en la fabricación de anillos pre- engastados con esmeraldas. Esta ponencia hace parte de un macro proyecto de investigación del sector joyero denominado INNOVACION DEL MÉTODO DE GEMAS PRE-ENGASTADAS EN EL PROCESO DE MICROFUNDICIÓN, PARA SU IMPLEMENTACIÓN EN LA JOYERÍA CON ESMERALDAS COLOMBIANAS, patrocinado por COLCIENCIAS y las empresas ORO Y ARTE JOYEROS y COLOMBIAN E.U

1. GENERALIDADES DEL PROYECTO

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La forma como hoy en día se elaboran los elementos de joyería conlleva gastos adicionales en la producción, debido a acabados superficiales irregulares, falta de llenado de las piezas o incluso porosidad en las mismas, por esto, se requiere de un estudio más profundo para su elaboración. El uso de software que ayudan al mejoramiento y optimización de los procesos, han tenido una gran importancia en las industrias de fabricación de piezas complejas, sin embargo no se le ha dado la trascendencia necesaria, en Colombia se requieren investigaciones en este tipo de modelamiento debido a que aún se utilizan herramientas y conceptos antiguos que han pasado de generación en generación.

La simulación computarizada es una herramienta comúnmente utilizada en la industria de producción de piezas, siendo su mayor beneficio el poder observar el llenado del molde, determinación de los tiempos de colada y solidificación, control de las temperaturas presentes por medio de sensores, análisis térmico de las piezas, etc., además, prever posibles defectos e imperfecciones, así como también reducir los costos de producción.

El pre-engaste de gemas consiste principalmente en posicionar en el molde la gema antes de realizar la colada, de esta forma el metal al solidificarse experimenta una contracción, que permite mantener unida la gema al metal solidificado; sin embargo, esta técnica ha presentado ciertas desventajas a causa del comportamiento característico de cada piedra preciosa durante los ciclos de calentamiento y enfriamiento, es decir, que no todas las gemas poseen una buena conductividad térmica para poder ser utilizadas en este proceso. Éste comportamiento se evidencia en las esmeraldas que al ser

tratadas por este procedimiento de pre-engaste presentan daños irreversibles en las características físicas y químicas de la gema; fisuras, cambios de color, pérdida de brillo, lo que disminuye el valor comercial de las piezas terminadas.

Actualmente el proceso de joyería con esmeraldas se desarrolla por medio de engaste de la gema en la pieza solidificada y fría; este proceso es realizado por artesanos que colocan la esmeralda en una cavidad o entre brazos que la sostienen evitando que la piedra se caiga; la técnica requiere de experiencia, tiempo y de un incremento en costos de producción. Es por este motivo que el proyecto pretende satisfacer las necesidades del sector de la joyería presentando innovaciones para mejorar el proceso, involucrando sistemas de modelamiento computarizado con el fin de conocer el comportamiento del metal en el llenado de los moldes.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general. Determinar por medio de modelamiento computarizado la influencia de la temperatura en el calentamiento de una esmeralda pre-engastada utilizando el software de fundición SOLIDCAST 8.

1.2.2 Objetivos específicos.

- Analizar los perfiles térmicos generados por las simulaciones en el software de fundición SOLIDCAST 8, al emplear diferentes materiales refractarios para la construcción de moldes que permitan el pre-engaste de esmeraldas en anillos.
- Comparar el comportamiento que presenta la simulación al trabajar con variación en los materiales del molde y el tipo de aleación empleada.
- Sugerir y diseñar el sistema de llenado con variación en el número de ataques, permitiendo comparar entre ellos.

2. ESTADO DEL ARTE

La industria de orfebrería ha estado marcada desde los inicios de las civilizaciones, utilizando elementos que por su belleza visual (brillo, color, etc.) fueron implementados como artículos decorativos en el cuerpo tanto de vivos como de difuntos. Las primeras joyas utilizadas como adornos fueron conchas, dientes de animales y minerales, posteriormente el hombre prehistórico comenzó a buscar piedras preciosas provenientes de la superficie de la tierra o en los lechos de ríos.

En la edad de Bronce, con el descubrimiento del metal, hubo una transformación en las técnicas de extracción de gemas y fabricación de joyería. En la edad de Hierro las piedras pasaron a un plano cuyo único fin era de adorno o de talismanes, sin embargo técnicas de repujado y filigrana de metales como la plata y el oro comenzaron a ser desarrolladas. [4]

La posesión de estas piedras preciosas eran condición de importancia social, nobleza y riqueza, las coronas de los reyes era adornadas con piedras preciosas, así como el uso de oro y plata en brazaletes, pendientes anillos, aros, y en general formas y figuras de todo tipo.

Unas de las civilizaciones que empleo estas técnicas (avanzadas para su época) en joyería fue la cultura babilónica, (3000 AC) en donde lograron desarrollar una gran variedad de artículos ornamentales utilizando oro, plata y piedras preciosas. Así como ellos, existió otra cultura con un gran avance en la fabricación de joyería, los egipcios, en donde la costumbre de enterrar faraones y sacerdotes con piedras y artículos ornamentados tenía un significado espiritual.

La cultura babilónica fue una de las pioneras en el campo de la joyería, no solo en el desarrollo de piezas, si no en técnicas de fundición para la elaboración de éstas. El proceso de cera pérdida data desde el año 3500 A.C. en Mesopotamia, pero fue en la dinastía Shang donde se empezó a trabajar el cobre mezclado con Zinc para la elaboración de piezas ornamentales. En la zona sur de Mesopotamia (Babilonia) fue donde se desarrolló un manejo más eficiente del proceso usando cera de abeja, el más antiguo texto del proceso de cera perdida se encontró en la ciudad de Sippar en Babilonia y data del año 1789 A.C. Los egipcios fueron otra de las culturas que desarrollaron la técnica de micro fundición o cera pérdida, datan esculturas hechas en el 2000 A.C. [7]

En Latinoamérica la tradición de la cera perdida fue desarrollada por gente de Nicaragua, Costa Rica, Panamá, Colombia, noreste de Venezuela y la porción este de Suramérica. Se elaboraron alambres en oro así como piezas de ornamentación, que se originaron en los tiempos prehispánicos por las culturas Muisca y Sinú en Colombia para la construcción de piezas y esculturas con oro. [4]

Los primeros indicios del proceso en cera perdida D.C son registrados en Italia (Roma) aproximadamente 1500-1571 D.C. Se sabe que en 1987 el Dr. B.F. Philbrook (Denison, Iowa) redescubrió la técnica de micro fusión como método de fundición para uso odontológico pero el gran desarrollo en este campo fue realizado por Dr. William H. Taggart (Chicago), que inventó una máquina para fundición de presión; En Inglaterra 1907 se empezó a utilizar este método como estrategia de producir piezas iguales a gran escala para la industria de la aviación. [10]

En Estados Unidos se prestó poca atención a al microfundición hasta la segunda guerra mundial, cuando la urgencia de la demanda militar saturó la industria del maquinado. Se tenía la necesidad de obtener piezas de alta

precisión para armamento y aviación, evitando el maquinado, soldadura y ensamblado, por lo que la microfundición fue la solución para muchas piezas complejas con superficies planas, dimensiones precisas y pequeños detalles, que combinado con los conocimientos de la industria odontológica, permitió la producción de piezas con poca pérdida en grandes cantidades [4]

Por otra parte, la técnica de engastado de piedras preciosas data desde el siglo XIV, donde se engastaban en forma de cabujón (un estilo de talla de pulida de forma redondeada, que evoca la parte superior de un cráneo). A partir de la mitad del siglo XVIII (1750), se produce una gran explosión artística y se empieza a engastar y montar las piedras preciosas. Antes de esa época los engastes eran groseros y se recurría al pegamento para engastar las gemas. [7].

Con el transcurrir de los años, el método de engaste ha presentado mejoras en los procesos de fundición, incidiendo de esta forma en los resultados de las piezas obtenidas que cada vez ofrecen una mejor terminación, por ello el engastador ha empezado a formar parte del proceso de modelado, para el cual se realiza un pre- engastado, que consiste básicamente en preparar las zonas de engastado de los modelos originales antes de ser reproducidos en serie.

Una de las ventajas más notables de este proceso es el ahorro de costos que reporta, y su mayor inconveniente es el de no ser válido para la fabricación de joyas de calidad media-alta, puesto que la terminación de un pre-engastado nunca alcanza la calidad de un engastado inicial sobre una pieza base o limpia de las imperfecciones propias del proceso de fundición. En la figura 1 se observa una pieza engastada.

Figura 1. Pieza con engaste



Fuente: Disponible en <http://www.factorengaste.com/tipos-engastado>

2.1 TIPO DE ENGASTES

Engaste carre o carril: Es en el cual las piedras están sujetas por dos de sus lados, ver figura 2, el éxito de este engaste es que los biseles con los cuales se sujetan las piedras deben quedar totalmente rectos y sin ningún daño en ellos. Hoy en día este proceso está abriendo las puertas para el diseño por la belleza del mismo y las ventajas al momento de sujetar la pieza.

Figura 2. Engaste de carre o carril



Fuente: Disponible en <http://www.factorengaste.com/tipos-engastado/>

Engaste de granos: Se llama así porque las partes de material con los cuales se sostienen las piedras dan una apariencia de pequeños granos, los cuales sujetan la piedra por la corona como se muestra en la figura 3.

Figura 3. Engaste de granos



Fuente: Disponible en <http://www.factorengaste.com/tipos-engastado/>

Engaste de bisel: Es el más antiguo y sólido. Consiste en doblar el metal sobre la piedra redondeándola por completo y ajustándola contra la corona. Una de las variables para este método es la dureza de la gema, a continuación en la figura 4 se aprecia un ejemplo de ésta técnica.

Figura 4. Engaste de bisel



Fuente: Disponible en <http://www.factorengaste.com/tipos-engastado/>

Engastado en chapa: Es un método utilizado generalmente en joyerías comerciales mediante un taladro y unas uniones hechas con virutas del metal

resultante. Este proceso puede tener como resultado cajoncillos, entredoses, acucharados, etc, ver figura 5.

Figura 5. Engaste en chapa



Fuente: Disponible en <http://www.factorengaste.com/tipos-engastado/>

Desde el año 2005 se han venido investigando procesos que ayuden a reducir costos en la industria de la joyería [4], estos estudios se basan en una simulación computarizada del proceso de llenado y solidificación de anillos, analizando los perfiles de temperatura, tiempos de enfriamiento, así como variaciones en las temperaturas en sitios específicos de la pieza, utilizando sistemas de termopares en una serie de experimentos para determinar y comprara los resultados con los datos obtenidos en el modelo computacional.[8]

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

3.1 MODELAMIENTO COMPUTARIZADO

La simulación de procesos es una herramienta que la mayoría de empresas del sector de producción ha implementado para disminuir los costos y el tiempo en la fabricación de piezas complejas. Éste método conlleva a tener en cuenta parámetros y condiciones de frontera para obtener un llenado del molde detallado, los resultados obtenidos en esta simulación conllevan a un análisis del llenado de la pieza, la forma como solidifica, formación de microestructura y porosidades o defectos [11].

Básicamente el modelado consiste en hacer una réplica de un objeto o de un proceso, manteniendo las características principales de la pieza original, la simulación requiere cumplir con los siguientes apartados.

- Patrones y temperaturas de metal fundido: zonas de llenado final, turbulencia del metal fundido y frentes de fusión.
- Solidificación de la fundición: creación de cavidades por contracción, formación de microestructura y productos de esfuerzos residuales.

3.2 MÉTODOS DE PROCESO

Existen diferentes métodos para modelar los procesos, en la industria de la fundición se han desarrollado programas diseñados para suplir las necesidades en cada uno de los procesos, estos programas se basan en diferentes métodos de resolución de las ecuaciones de estado para simular el proceso que se desea. [1]

3.2.1 Método diferencial finito (SOLIDCAST). Es un método utilizado para calcular de manera aproximada las soluciones de las ecuaciones diferenciales parciales con expresiones algebraicas con los valores de las variables dependientes en un limitado números de puntos.

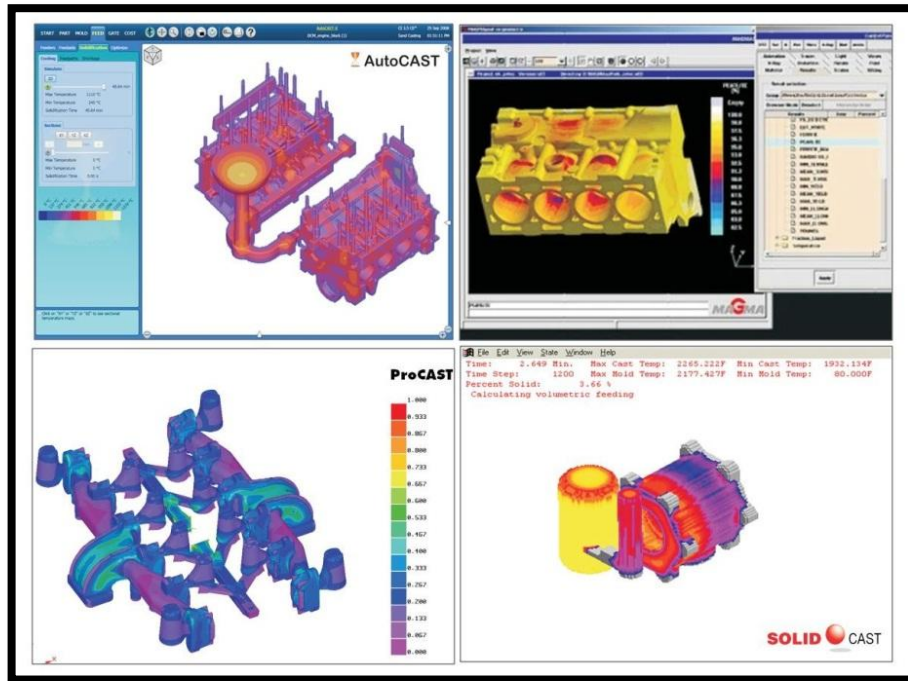
3.2.2 Método elementos finitos-MEF (PROCAST). El MEF está pensado para ser usado en computadoras y permite resolver ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complicadas; Es utilizado en el diseño y mejoramiento de productos y aplicaciones industriales, así como en la simulación de sistemas físicos y biológicos complejos. La variedad de problemas a los que puede aplicarse ha crecido enormemente, siendo requisito básico conocer las ecuaciones constitutivas y ecuaciones de evolución temporal del problema a considerar.

3.2.3 Método volumen finito (MAGMASOFT). El método permite discretizar y resolver numéricamente ecuaciones diferenciales. Es una técnica alternativa a la de diferencial finito y elementos finitos, requiere modelos en 3D para poder realizar la mayor aproximación posible de las condiciones.

3.2.4 Método elementos vectoriales (AUTOCAST). Se basa en la resolución de ecuaciones de campos vectoriales, utiliza un análisis de elementos nodulares finitas para dar solución a los campos vectoriales.

En la figura 6 se muestran los 4 programas corriendo una simulación, cada uno trabaja con un método diferente, sin embargo todos producen resultados similares en cuanto al comportamiento de los fluidos y la transferencia de calor durante el proceso de colada se refiere.

Figura 6. Interface de usuario para los programas autocast, magmasoft, procast, solidcast.



Fuente: Disponible en <http://www.goodwinsteelcastings.com/de/facilities/foundry>

3.3 DEFINICIÓN DE ESMERALDA

La esmeralda es una variedad del mineral denominado berilo, perteneciente al grupo de los silicatos, formados a partir de las diferentes formas de ordenamiento tridimensional de múltiples tetraedros de SiO_4 que lo componen.

Los silicatos son los constituyentes básicos de las rocas ígneas, las cuales transportan desde las zonas profundas de la tierra hasta la superficie elementos metálicos, entre ellos el berilio que al combinarse con el aluminio, el silicio y el oxígeno construyen el mineral berilo cuya fórmula química es $\text{Al}_2\text{Be}_3 (\text{Si}_6\text{O}_{18})$. La estructura del berilo es compleja, en ella se alternan laminas planares de tetraedros básicos de Si_6O_{18} con láminas donde se ubican exclusivamente los iones de Al y Be.

El berilio puro es incoloro, pero las diversas variedades del mismo combinadas con diferentes elementos hacen diversas coloraciones. La esmeralda que mejor exhibe propiedades, es la formada por berilio con adiciones dentro de su estructura cristalina de iones de Cr y/o V, por lo que su composición general se debe expresar mediante dos términos: $\text{Al}_2\text{Be}_3 (\text{Si}_6\text{O}_{18}) + \text{Cr}$, o $\text{Al}_2\text{Be}_3 (\text{Si}_6\text{O}_{18}) + \text{V}$.

Las principales características de las esmeraldas en relación con su composición:

- Composición básica: Silicatos de aluminio y berilio con algunas sustituciones de Al por Cr y/o V: $\text{Al}_2\text{Be}_3 (\text{Si}_6\text{O}_{18}) + \text{Cr}$, o $\text{Al}_2\text{Be}_3 (\text{Si}_6\text{O}_{18}) + \text{V}$.
- Otras sustituciones elementales: de manera muy ocasional el Al puede ser remplazado por Mg, Fe o Mn y el Be por el Li.
- Inclusiones: Corresponden a porciones sólidas (cristales de sal o fragmentos de rocas) líquidas o gaseosas, transportadas desde el entorno hasta el interior del cristal y que por una u otra razón han quedado atrapadas dentro de su estructura. [17]

3.3.1 Propiedades físicas de la esmeralda. En la siguiente tabla se muestran valores característicos de la gema (esmeralda colombiana).

Tabla 1. Propiedades físicas de la esmeralda

Fragilidad	Alta
Densidad	2.63- 2.8 g/cm ³
Dureza	7.5- 8 (Mohs)
Fractura	Conocida
Raya	Blanca
Color	Verde, verde azulado
Brillo	Vítreo

Fuente: (Yehimy Rocio Gierrero anderas, 2012)

3.4 MOLDES PARA JOYERÍA

El proceso de joyería involucra técnicas antiguas de fundición, la más utilizada es la técnica de colada por inmersión (Investment casting), en donde el molde se comienza con un patrón en cera de la pieza que se quiere producir, el patrón es recubierto con un material cerámico (yeso, arena), una vez solidado el molde se calienta para eliminar por completo la cera y se produce el llenado con el metal fundido. Los metales más utilizados para esta técnica son aleaciones de aluminio, aleaciones de bronce, aleaciones de magnesio. [9]

3.4.1 Propiedades. Entre las características más representativas que genera la aplicación del proceso tenemos:

- La precisión dimensional de las piezas coladas.
- El nivel de rugosidad e imperfecciones superficiales es mínimo.
- Gran nivel de detalle a lo largo de toda la pieza.

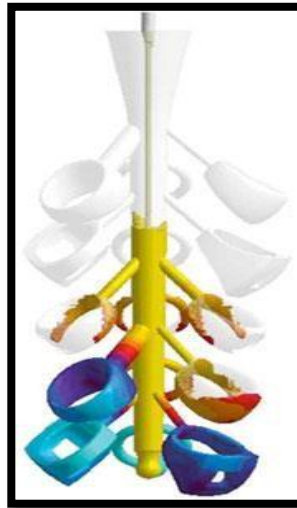
3.5 FORMULACIÓN, LEYES Y PRINCIPIOS

3.5.1 Transferencia de calor. Una consideración de importancia en la fundición es la transferencia de calor durante el ciclo completo, desde el vaciado hasta la solidificación y el enfriamiento hasta temperatura ambiente. El flujo de calor en diferentes sitios del sistema es un fenómeno complejo y depende de muchos factores relacionados con el material de fundición y los parámetros del molde y del proceso.

La distribución típica de temperatura en la interface líquido-metal del molde es la siguiente: el calor del metal líquido es disipado a través de la pared del molde y del aire circundante. La caída de temperatura en las interfaces aire-molde y molde-metal están causadas por la presencia de capas límite y un

contacto imperfecto en dichas interfaces. La forma de la curva depende de las propiedades térmicas del metal fundido y del molde.

Figura 7. Representación gráfica de la transferencia de calor en diferentes momentos de la colada.

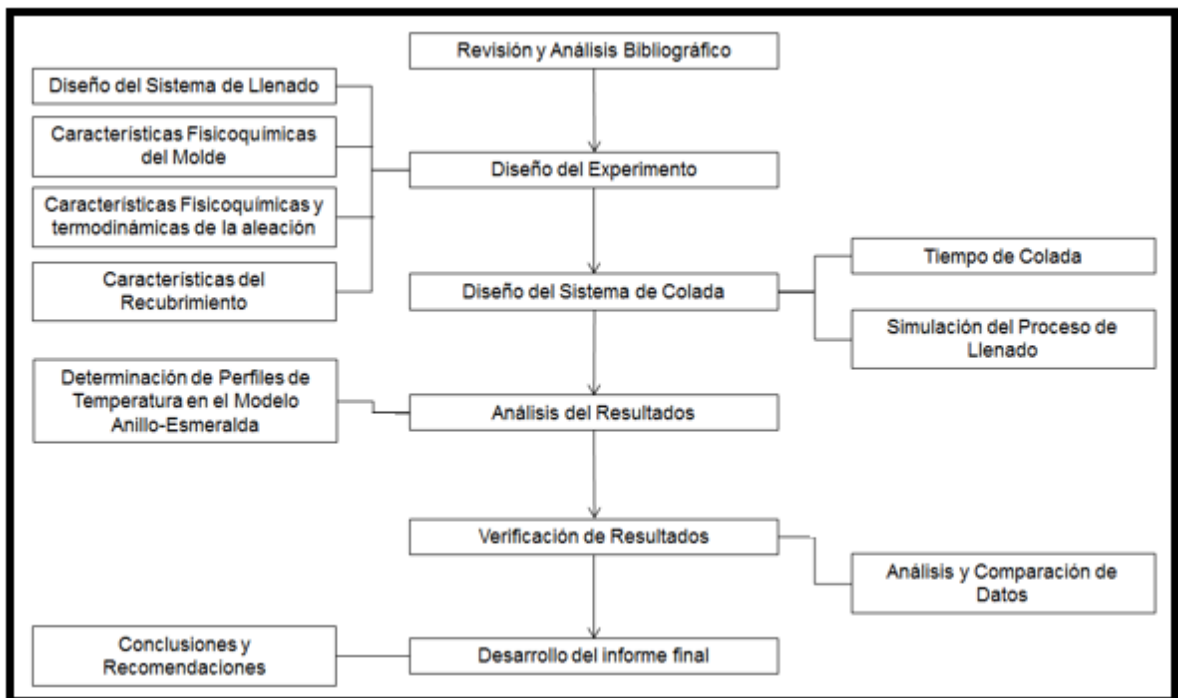


Fuente: (Baquero, 2009)

4. METODOLOGIA

Se propone el desarrollo de la investigación en seis (6) etapas, cada una de ellas con el objetivo de realizar una muy precisa aproximación de las mejores condiciones de trabajo para la elaboración de joyas pre-engastadas con esmeraldas Colombianas. Figura 8.

Figura 8. Diagrama de la metodología usada en el proyecto.



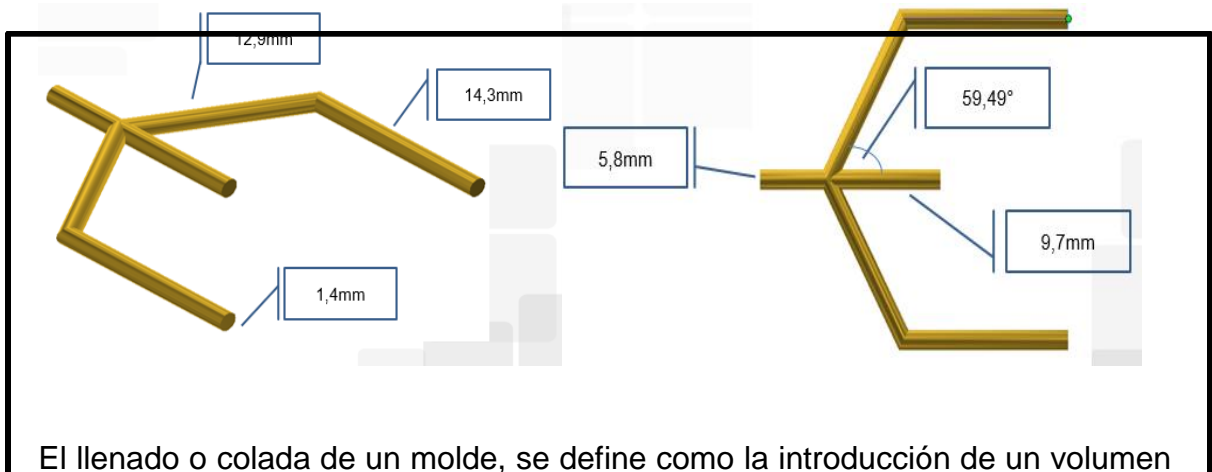
Para la primera etapa del proceso se realizó la búsqueda, selección y el análisis de información requerida en tesis, artículos, simposios de joyería, manuales, etc., referente a temas como diseño CAD/CAM, modelado computarizado, transferencia de calor por conducción, convección, perfiles de temperatura de llenado y solidificación para procesos de fundición en anillo con esmeraldas. Esto ayudo como base del trabajo y el posterior análisis de los resultados obtenidos. Esta etapa se mantuvo durante la realización del proyecto.

4.1 DISEÑO DEL EXPERIMENTO

Con base en la revisión bibliográfica realizada, se llevaron a cabo las siguientes actividades para el adecuado desarrollo de esta etapa: Diseño del sistema de llenado, características fisicoquímicas del molde, características fisicoquímicas y termodinámicas de la aleación. Atendiendo las necesidades del simulador para el diseño del anillo, el sistema de colada y el sistema de llenado, se desarrollaron los siguientes modelos.

4.1.1 Diseño del sistema de llenado. Teniendo en cuenta los planteamientos propuestos sobre el número de ataques en el diseño del sistema de colada se muestra en la figura 9 la imagen del ataque de tres (3) salidas.

Figura 9. Modelo de los ataques en el simulador



El llenado o colada de un molde, se define como la introducción de un volumen conocido de metal o aleación líquida, en un tiempo calculado, con el fin de obtener piezas completas exentas de inclusiones.

El diseño del sistema de llenado debe hacerse considerando el comportamiento del flujo, naturaleza del material de los moldes, factores metalúrgicos y económicos que permitan la mejor elección. Para este diseño se busca traducir de una forma simple, fenómenos de transferencia de calor, de

flujo de aleaciones líquidas, degradación del material del molde, gases disueltos, etc. Entre otros factores que se relacionan directamente con éste diseño. [2]

Teniendo en cuenta la forma convencional para la fabricación del anillo, en el cual se emplea un solo canal, se optó por modificar este parámetro para favorecer la disipación de calor, la velocidad de ingreso del fluido del metal y el llenado del molde. Para esto se realizaron diferentes diseños del sistema de llenado. (a) Un solo ataque, (b) dos ataques y (c) tres ataques (figura 9), a continuación en la tabla 2 se presentan detalles de estos:

Tabla 2. Datos del Sistema de Llenado

Número de ataques	Ángulo entre canales	Largo menor [mm]	Largo mayor [mm]
(a) 1	0°	15.628	15.628
(b) 2	180°	15.628	15.628
(c) 3	59.49°	9.765	27.302

Las dimensiones de los sistemas se tomaron teniendo en cuenta que fueran de fácil manipulación para las condiciones de trabajo y lo suficientemente real para llevarlo a una aplicación física.

4.1.2 Características fisicoquímicas del molde. Para la elaboración del molde se atendieron los parámetros requeridos por el simulador SOLIDCAST 8, como lo son: la temperatura inicial, conductividad térmica, densidad y calor específico.

- Temperatura Inicial: Temperatura a la cual está el molde al momento de efectuar la colada, se consideró el hecho de que una mayor temperatura inicial disminuye los efectos nocivos de un choque térmico garantizando así

la eliminación de posibles defectos en el anillo tales como rebabas, rugosidades y mal copiado.

- Conductividad térmica: Es la propiedad física de cualquier material que mide la capacidad de conducción del calor a través del mismo; Es una capacidad elevada en los metales y en general en los cuerpos continuos, y es más baja en los gases, siendo casi nula en algunos materiales especiales tales como la fibra de vidrio, denominada por ello, aislante térmico

El coeficiente de conductividad térmica (λ) caracteriza la cantidad de calor necesario por m^2 , para que atravesando durante la unidad de tiempo, 1 m de material homogéneo obtenga una diferencia de 1 °C de temperatura entre las dos caras.

En nuestro caso se debe tener un molde con una excelente conductividad térmica que permita la difusión de calor a tal punto que la temperatura del metal fundido sea la menor sin afectar el proceso de colada (solidificación temprana).

- Densidad: Es la medida de cuánto material se encuentra comprimido en un espacio determinado; es la cantidad de masa por unidad de volumen.
- Calor específico: El calor específico es la cantidad de calor que se necesita por unidad de masa para elevar la temperatura un grado Celsius.

En la tabla 3 se presentan los valores térmicos que constituyen las diferentes materias primas con las cuales se trabajó durante el proceso de simulación.

Tabla 3. Composición de los moldes

Molde	Temperatura inicial [F]	Conductividad térmica [BTU/HR-FT-F]	Calor específico [BTU/LBM-F]	Densidad [LBM/CU-FT]
Zirconita	572	0.481	0.175	174
Arena Sílice	572	0.341	0.257	95
Cromita	572	0.414	0.205	172

4.1.3 Características fisicoquímicas y termodinámicas de la aleación. Se seleccionó el tipo de aleación de acuerdo con las características fisicoquímicas tales como: composición (elementos aleantes o impureza), características visuales (brillo, acabado, color), comportamiento mecánico (ligero, resistente), y con parámetros termodinámicos como lo son la conductividad térmica, el calor específico, el calor latente de fusión, entre otros.

Características fisicoquímicas

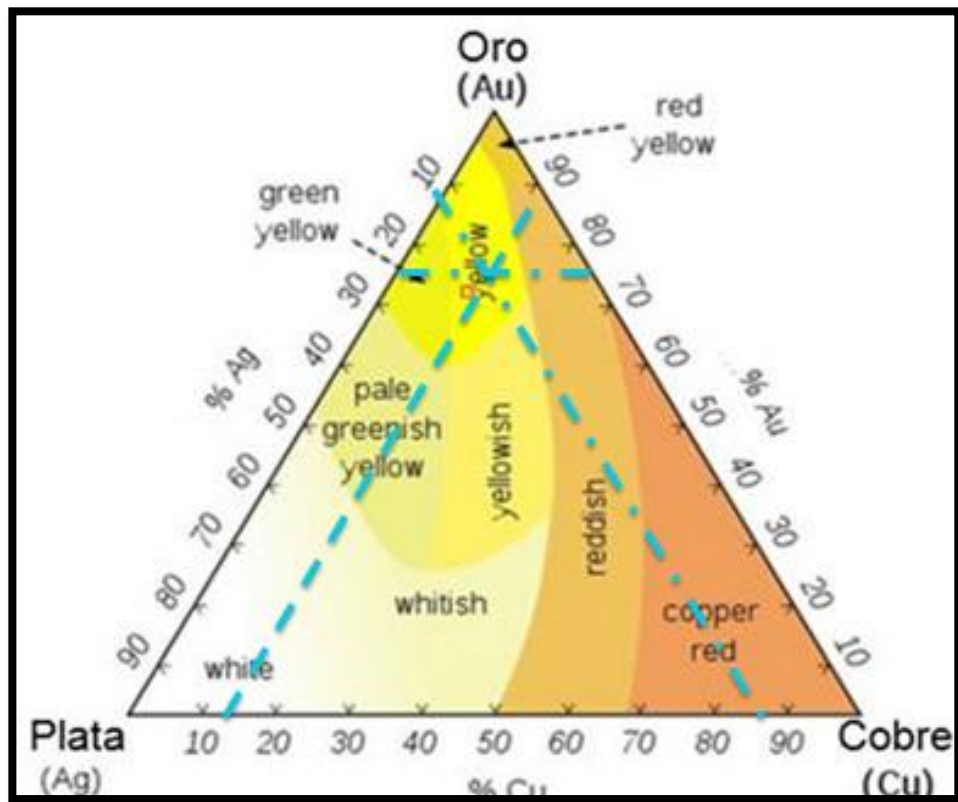
- **Composición:** Se trabajó con una aleación de oro de 18 kilates compuesta por oro, plata y cobre.
- **Visual:** Se tuvo en cuenta el brillo que presentan los elementos y su disponibilidad en el simulador
- **Comportamiento mecánico:** Se seleccionaron el tipo de aleación de acuerdo al poco peso que presenta, haciendo la pieza ligera, pero a su vez le confiere buena resistencia mecánica para las condiciones de uso de la pieza.

Características termodinámicas

- **Calor latente de fusión:** Es la energía necesaria para cambiar 1 gramo de sustancia en estado sólido a estado líquido, sin cambiar su temperatura. Ésta energía rompe los enlaces de sólidos, y queda una significativa cantidad, asociada con las fuerzas intermoleculares del estado líquido.

- Temperatura de solidificación: Ésta temperatura es determinada según el tipo de aleación utilizada, basados en el correspondiente diagrama de composición. A continuación se muestran el diagrama correspondiente a la aleación de oro de 18 kilates (ver figura 10) empleada en el proceso de simulación y adicionada a las librerías del programa SolidCast 8.

Figura 10. Diagramas de fases aleación empleada



Fuente: Disponible en <http://www.pistachogreen.com/el-anillo-unico-estudio-de-materiales/>

Se trata de una aleación en base oro (Au) con un porcentaje del 75%, 12.5% de cobre (Cu), y 12.5% de plata (Ag), catalogado como oro amarillo por sus características visuales y empleado en el sector de la joyería bajo la denominación de oro de 18 kilates.

En la tabla 4 se presentan las características térmicas que presenta la aleación de oro 18 kilates como lo son su conductividad térmica, su punto de fusión entre otros.

- Rango de enfriamiento: Nos indica la pérdida de calor durante el proceso de colada del metal hasta cuando llena por completo la pieza. Ésta pérdida varía dependiendo del tipo de aleación y de las características termodinámicas del molde.
- Temperatura inicial: Es la temperatura a la cual ingresa el metal al bebedero, esta debe ser lo más baja posible para así evitar un daño significativo en la gema y sus propiedades.

Para las características termodinámicas de la aleación, al igual que en el molde se tienen en cuenta variables como la densidad de la aleación y el calor específico, ver tabla 4.

Tabla 4. Características de la aleación

Aleación	Conductividad térmica [BTU/HR-FT-F]	Calor específico [BTU/LBM-F]	Densidad [LBM/CU-FT]	Calor latente de fusión [BTU/LBM]	Temp. de fusión [F]	Temp. de solidificación [F]
Oro 750	2380	21.23	1055.64	37.21	1765.4	1675.4

Fuente: 1 (Baquero, 2009)

4.1.4 Características del recubrimiento. La utilización de recubrimientos para proteger la esmeralda, va ligada a la resistencia de los materiales refractarios a los cambios bruscos de temperatura. El calor que atraviesa un material cuando se somete a altas temperaturas, puede originar un calentamiento súbito que dilata el material, lo que produce tensiones que lo deterioran; éste fenómeno se conoce como choque térmico [12].

Zirconita: Químicamente, la zirconita es un silicato de circonio ($ZrSiO_4$), ésta es una arena especial que presenta densidades más altas, mayor resistencia a la flexión y la tenacidad a la fractura que las demás arenas especiales refractarias [18]. Entre otra de sus propiedades principales, la arena de circonio presenta excelentes propiedades refractarias, baja dilatación y elevada conductividad térmica.

Cromita: Los depósitos comerciales están localizados principalmente en Sudáfrica y requiere de largos procesos para poder ser utilizada en fundición:

- Alta densidad
- Alta refractariedad
- Difícil de humectar por el metal
- Muy estable y difícil de romper o descomponerse.
- Baja expansión térmica
- Alta absorción y transferencia de calor.

Composición química de la arena de cromita:

- Cr_2O_3 44 – 48 %
- FeO 23 – 30%.
- SiO_2 1,0 % máx.
- MgO 10 – 11 %.
- Al_2O_3 15 – 16%.
- Densidad aparente 2,4 – 2,8 gramos. / cm^3 .
- Humedad 0,2 % máx. Granulometría.
- valor AFS 45 – 60. [14]

Arena Sílice: La arena sílica o arena de sílice se obtiene al combinar sílice con oxígeno. Se compone por estructuras de cuarzo con forma angular, es un mineral de alta pureza, producto de una roca intrusiva (granito) de color blanco cremoso.

Este tipo de arena es la más común y posee características como:

- Alto punto de fusión
- Dureza
- Transparencia
- Resistencia química.

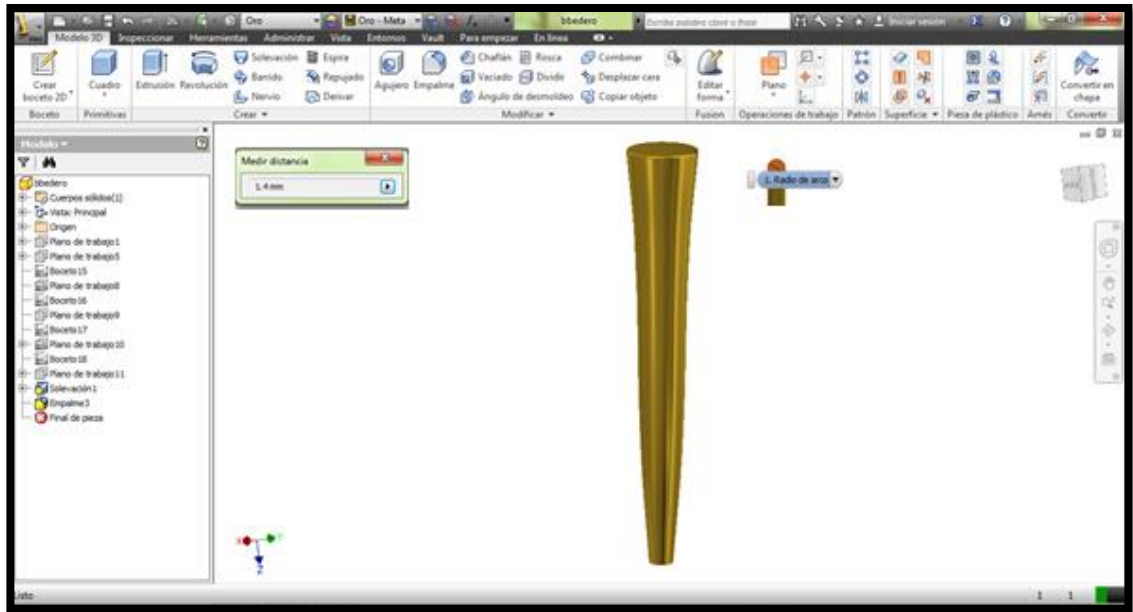
Por sus características y versatilidad, la arena sílica suele tener las siguientes aplicaciones:

- Fabricación de ladrillo refractario
- Agregado inerte en pozos de geotermia de altas temperaturas
- Fabricación de ferroaleaciones
- Fabricación de piezas de fundición
- Industria de resinas y vidrio
- Morteros para construcción
- Material filtrante en plantas de tratamiento y purificación [15]

4.2 DISEÑO DEL BEBEDERO DE COLADA

En la figura 11 se presenta el diseño para el bebedero de un sistema de colada, el cual consta de secciones circulares heterogéneas.

Figura 11. Diseño del bebedero de llenado en el simulador



Para el sistema de colada se diseñó el bebedero por el cual se vierte el metal fundido, éste debe tener unas condiciones que permitan el paso de la aleación de oro 18 de kilates sin problemas de obstrucción, para lo cual el diámetro de cada bebedero debe tener una sección adecuada. A continuación se exponen las dimensiones de los diferentes tipos de bebedero que se trabajaron durante el proceso de simulación (ver tabla 5).

Tabla 5. Datos de los bebederos de Colada

Tipo de bebedero	Altura mm]	Diámetro menor [mm]	Diámetro mayor [mm]
1	70	7	14
2	30	7	14
3	70	5	14

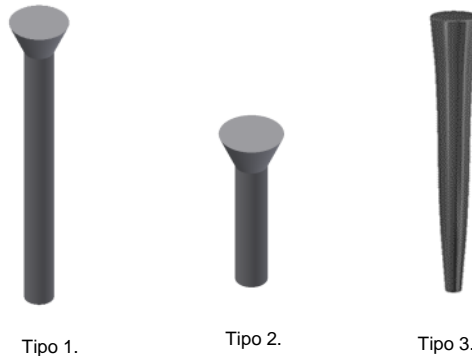
Tipo 1: Bebedero convencional: Conformado por una sección cilíndrica uniforme y una sección cónica que se encuentran unidas.

Tipo 2: Bebedero convencional corto: Es una modificación al bebedero convencional, en la cual se tiene una sección cilíndrica de menor altura, con el fin de evitar la pérdida de material durante la colada.

Tipo 3: Bebedero modificado: Diseñado a partir de diferentes secciones circulares unidas mediante un proceso de solevado.

En la figura 12 se relacionan los tres (3) tipos de bebederos descritos anteriormente.

Figura 12. Tipos de bebederos empleados



4.2.1 Tiempos de colada. De acuerdo con el sistema de llenado, éste debe permitir la obtención de piezas completas. Para poder lograrlo el tiempo de colada t_c , debe estar relacionado con el tiempo de enfriamiento de la aleación, desde la temperatura de colada (T_c), hasta la temperatura de líquido, (T_l).

La simulación presenta una colada en caída directa, en donde para el principio de la solidificación dirigida es recomendable un inicio de la solidificación antes de terminar el llenado, lo que permite colar los moldes en un tiempo más largo, que el tiempo de enfriamiento. En este caso, la expresión del tiempo de llenado se define como:

$$t_c = 2t_L, \text{ ó } t_c = 3t_L \quad (1)$$

Debido a que el proceso de fabricación de las piezas se realiza bajo condiciones de vacío, el ingreso del metal líquido alcanza una velocidad promedio de 1.6 m/s, el valor de T_c disminuye dándonos un tiempo de llenado para las piezas inferior a cinco (5) segundos.

4.2.2 Simulación del proceso de llenado. Para verificar el comportamiento del sistema de llenado, se procedió a simular la colada de los moldes utilizando el método de resolución diferencial finito. En las figuras 13, 14 y 15, se ilustra la simulación de llenado del molde para diferentes tipos de ataques, un ataque, dos ataques y tres ataques, en donde se relaciona la variación de la temperatura y el progreso del frente de solidificación en el sistema.

En la figura 13. Se logra observar los cambios de coloración que representan la temperatura a la cual se encuentra el metal líquido durante la colada simulada para la variación de los ataques, siendo el de mejores resultados el sistema de colada con dos ataques.

4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con base en las pruebas realizadas en el simulador se logra establecer un patrón en el perfil de temperatura durante el llenado del molde, presentando una variación en la coloración a lo largo del sistema indicando de ésta forma la temperatura a la cual se encuentran dicha zona.

4.3.1 Determinación de perfiles de temperatura en el molde anillo-esmeralda.

En la escala de colores que está a la derecha de las figuras. 13, 14 y 15, se puede identificar el color y el valor al que corresponde la temperatura de acuerdo con la zona. (Grados Fahrenheit [°F]).

Figura 13. Simulación del proceso de llenado para los tres tipos de bebederos con un ataque

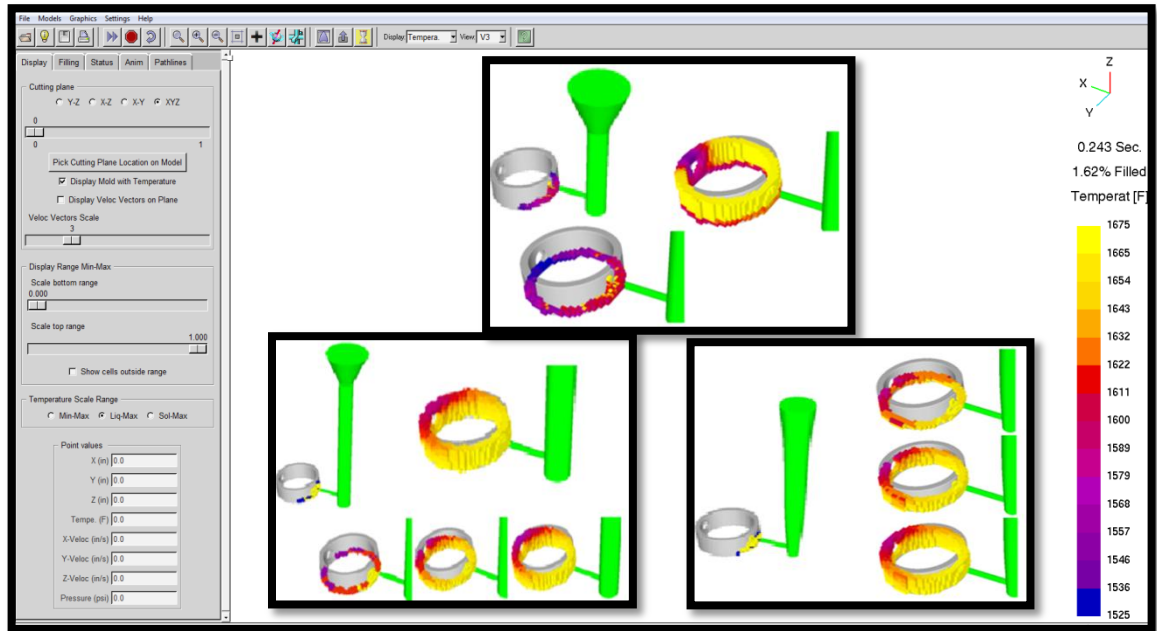


Figura 14. Simulación del proceso de llenado para los tres tipos de bebederos con dos ataques

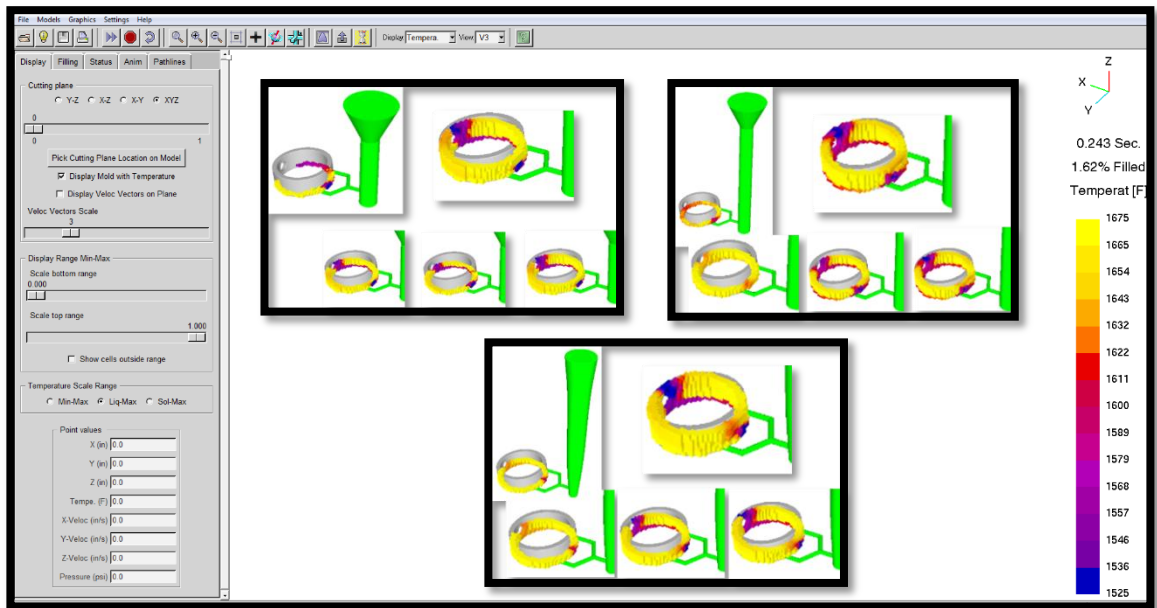
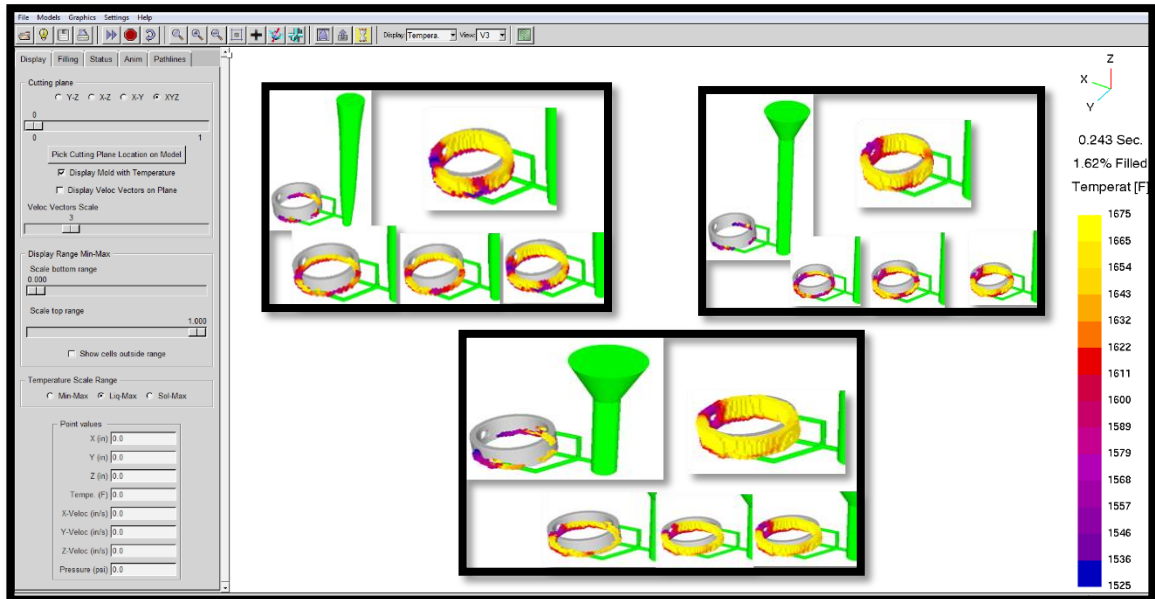


Figura 15. Simulación del proceso de llenado para los tres tipos de bebederos con tres ataques



Para el proceso de simulación que se realizó y para el cual se hizo una variación en el tipo de refractario, empleando materias primas como lo son la zirconita, la cromita y la arena sílice, se evidencia una similitud en los resultados obtenidos. Esto nos permite omitir la variación del tipo de refractario puesto que poseen parámetros termofísicos similares que no afecta de manera significativa la transferencia de calor entre éste y el metal fundido.

Después de determinar la influencia del material refractario en el proceso, optamos por eliminar dicha variable y emplear la arena sílice como refractario predeterminado.

Luego de haber sido evaluado el refractario y asignado las condiciones a trabajar (arena sílice), se procede a la evaluación de los diferentes tipos de bebederos y sus respectivos ataques.

En primer lugar se trabajó el bebedero convencional con variación en el número de ataque (1, 2 y 3 ataques), de los cuales se tomó el registro fotográfico para un posterior análisis junto con los bebederos tipo 2 y 3, figura. 13.

Para los diferentes tipos de bebederos (Tipo 1, 2 y 3), con un ataque, se obtiene en el proceso simulado la mayor disminución en la temperatura, pero con inconvenientes en el llenado uniforme de la pieza para algunas de las simulaciones. [Anexo 1].

Éste es uno de los problemas más comunes y se evidencia en las coladas realizadas en el laboratorio por personal de otras secciones del macro-proyecto. Si bien este número de ataque presenta la mayor disipación de calor, no nos asegura un buen llenado del molde. Para éste diseño la variación de la temperatura estuvo alrededor de 1525 °F/ 829.44 °C para el bebedero tipo 1, 1570 °F/ 854.44 °C para el bebedero tipo 2 y 1568 °F/ 853.33 °C para el bebedero tipo 3.

Para el sistema de dos (2) ataques, figura. 14, se observa una temperatura en contacto con la gema cerca de los 1557 °F/ 847.22 °C para el bebedero tipo 1, 1611 °F/ 877.22 °C para el bebedero tipo 2 y 1575 °F/ 857.22 °C para el bebedero tipo 3. A pesar de no tener un gradiente de temperatura tan evidente como el caso anterior, este diseño si nos asegura un llenado total y optimo del molde del anillo, en la zona de la gema se encuentra una de las zonas con menor temperatura de los sistemas simulados, el cual es el objetivo principal de la investigación.[Anexo 1].

Por último se implementó un sistema con tres (3) ataques, figura. 15, el cual arrojó como resultado un gradiente de temperatura muy bajo en comparación con los demás sistemas, además de presentar tres puntos de calor que

dificultan la disipación de energía térmica, para la zona en contacto con la gema se registra una temperatura de 1568 °F/ 853.33 °C para el bebedero tipo 1, 1579 °F/ 859.44 °C para el bebedero tipo 2 y 1620 °F/ 882.22 °C para el bebedero tipo 3. [Anexo 1].

4.4 VERIFICACIÓN DE RESULTADOS

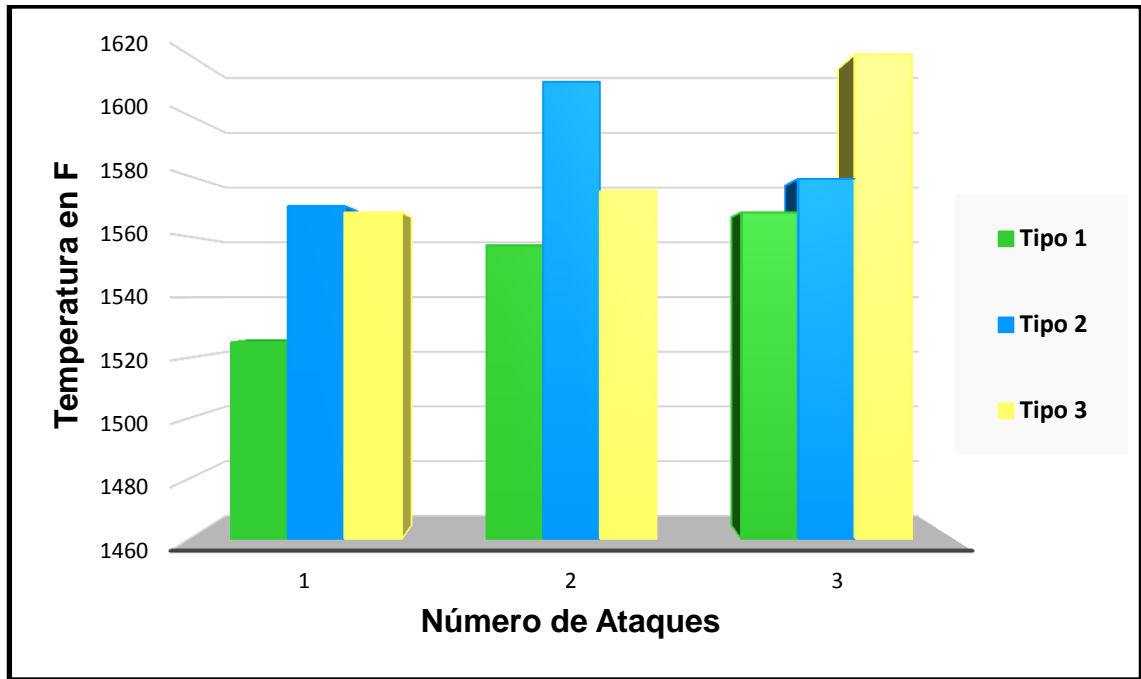
Basados en el diseño convencional empleado por la industria joyera se comparan los resultados obtenidos con el fin de lograr una mejora en la eficiencia del proceso.

4.5.1 Análisis de resultados y Comparación: Para el análisis de los resultados se utilizó el sistema de colores aportado por el simulador el cual indica la temperatura en cada uno de los puntos del sistema designando con un color azul las zonas de menor temperatura y con un tono más rojizo a medida que la temperatura aumenta.

A continuación, en la figura 16, se relacionan los resultados obtenidos durante la simulación para los diferentes tipos de bebederos (Tipo 1, 2 y 3) y su variación de ataques (1, 2 y 3).

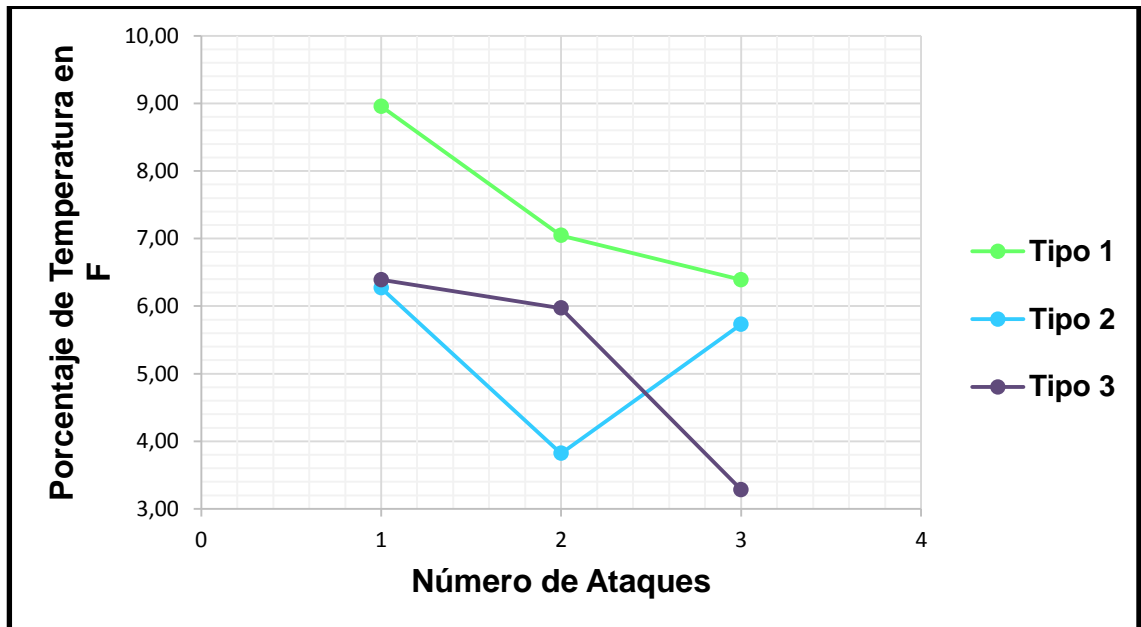
En la figura 16 se aprecia una menor diferencia en cuanto a los valores de temperatura registrados del sistema de dos (2) ataques con respecto al sistema convencional que maneja un (1) ataque. También se registra una relación inversamente proporcional entre el número de ataques y el gradiente de temperatura para el bebedero tipo 3 y el tipo 1. En cuanto al sistema de tres (3) ataques, se observa la menor disminución en cuanto al gradiente de temperatura al ser comparado con los otros dos sistemas.

Figura 16. Valor mínimo de temperatura alcanzado



En la figura 17 se relacionan los porcentajes (%) de temperatura disipada en cada uno de los sistemas mencionados anteriormente.

Figura 17. Porcentaje de temperatura perdida durante el proceso de simulación



En la gráfica de la figura 17 se comparan los tres tipos de bebederos por medio de una gráfica de polígonos de frecuencia, mostrando de una manera clara el comportamiento que se da en cada sistema en el momento de la colada, ubicando al bebedero tipo 1, como el de mayor porcentaje (%) de temperatura disipada para los tres sistemas.

Observando los resultados obtenidos acerca del porcentaje de pérdida térmica del sistema sobresale de entre todas el sistema original (1 ataque con bebedero convencional) con un 8.96%, seguido del sistema compuesto por 2 ataques y un bebedero convencional con un 7.04%, lo que en escala de grados Celsius equivale a 83.33 y 65.55 grados respectivamente.

Evocando resultados obtenidos en uno de los trabajos de grado del megaproyecto, sobre las condiciones térmicas que soporta la esmeralda Colombiana, se conoce un valor de temperatura máximo de 300° c después de las cuales ésta pierde sus características. [18]

5. CONCLUSIONES

- El bebedero Tipo 1. (Convencional), proporciona los mejores valores en cuanto a los porcentajes (%) de disipación térmica, sin embargo presenta inconvenientes en el momento de la colada para el sistema de bebedero convencional con un (1) ataque por no tener un llenado homogéneo de la pieza a fundir, efecto que se logra eliminar cuando se modifica el número de ataques.
- Se descarta el bebedero tipo 3. (Modificado), con variación de dos (2) y tres (3) ataques, al no favorecer de manera adecuada la disipación de calor debido al aumento en el número de zonas con alta temperatura que actúan como potenciadores de calor, de tal manera que impiden la difusión térmica de la colada.
- Con base en los valores de porcentaje (%) de temperatura disipada de la figura 18, la facilidad del proceso y el llenado que se obtiene en el molde, se logra concluir que el sistema más adecuado para el proceso es el conformado por el bebedero tipo 1(Convencional) con dos ataques, esto para un refractario predeterminado (Arena sílice).
- Como se puede observar en el anexo 1, las temperaturas en los primeros instantes de la colada son similares para los diferentes tipos de refractarios, esto se debe a las propiedades termofísicas que presentan y a su naturaleza (ver tabla 3). Por lo cual para efectos de este proyecto se descarta la variación de las materias primas en el momento de elegir el refractario, dejando como predeterminado la arena sílice por poca variación en la conductividad térmica presenta en comparación con las demás.
- Tomando como referencia el listado suministrado por el simulador solidcast 8 de aleaciones, el cual no tiene datos termofísicos de los materiales preciosos por

no ser estas aleaciones comerciales, se agregaron a la librería del sistema los datos correspondientes a una aleación de oro 750 milésimas, y se realizó el proceso de simulación en este material como aleación principal, obteniendo de ella un porcentaje de disipación del 7,04 % del valor de la temperatura inicial de la colada en el mejor de los casos.

- Teniendo en cuenta las simulaciones realizadas y de acuerdo con las especificaciones de la gema con respecto a la temperatura que soportar (300°C sin recubrimiento y 400°C con recubrimiento), se concluye que el sistema no es apto con los elementos implementados, debido a que la aleación estudiada presenta unos puntos de fusión muy elevados para entrar en contacto con la gema (829°C / 1525 °F), lo que generaría fallas mecánicas y posibles fisuras o agrietamiento en la piedra preciosa.

6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar una profunda revisión bibliográfica en revistas, artículos y libros científicos actualizados, de los datos relacionados con las características especiales tales como: conductividad térmica, densidad, punto de fusión, tanto de materiales refractarios como aleaciones utilizados en la microfundición de joyería.
- Se recomienda la implementación del software MAGMASOFT para simular de forma más completa el proceso de microfundición, puesto que la base de datos con la que cuenta recopila las principales características físicas y térmicas de las materias refractarias y metálicas empleadas en este, además cuenta con un complemento de diseño CAD que permite una fácil elaboración del sistema de colada y piezas a fundir.

REFERENCIAS

- [1] (s.f.). Obtenido de [HTTP://WWW.FINITE.SOLUTIONS](http://WWW.FINITE.SOLUTIONS)
- [2] Baquero, A. A. (2009). Las propiedades de fundición. Bucaramanga: Universidad Industrial De Santander.
- [3] Buhner, D. J. (2005). Santa fe symposium on jewellery manufacturing technology.
- [4] Casabó, J. (2010). Joyería . Albatros 4° Ed.
- [5] Equipos, G. (s.f.). Obtenido de <http://www.galloni-aseg.com/en/prodotti/gseries.html>
- [6] Gold Star Gem Set For the stone in place casting. . (s.f.). Obtenido de www.goldstarpowders.com
- [7] Holschuh, B. (2009). The jeweler's studio handbook: traditional and contemporary techniques for working with metal and mixed-media materials. Quarry Books.
- [8] IOPscience. (2008). Computer simulation applied to jewellery casting: challenges results and future possibilities. IOP publishing.
- [9] Jhon C. McCloskey, D. A. (s.f.). Evaluation of permeability of a jewelry casting investment.
- [10] Jr, F. R. (2005). Lost-wax casting “old, new and inexpensive methods. Woodsmere Press.

- [11]Kleeberg, C. (s.f.). Latest advancements in modelling and simulation for high pressure die castings. Magma engineering asia pacific pte ltd.
- [12]L., F. (s.f.). Resistencia de los materiales cerámicos a los cambios bruscos de temperatura.
- [13]Montado En Cera . (s.f.). Obtenido de [HTTP://WWW.BIENNAINTERNATIONAL.COM/SITES/DEFAULT/FILES/TRADUCCION-MONTADO-EN-CERA.PDF](http://WWW.BIENNAINTERNATIONAL.COM/SITES/DEFAULT/FILES/TRADUCCION-MONTADO-EN-CERA.PDF)
- [14]Quiminet.com. (s.f.). Obtenido de <http://www.quiminet.com/articulos/las-diferentes-aplicaciones-de-la-arena-silica-2648107.htm>
- [15]Tecnología de arenas de moldeo. (2009). Obtenido de <http://es.scribd.com/doc/23823694/tipos-de-arenas#scribd>
- [16]USA, N. (s.f.). Modelo J-2r Serie IV. Obtenido de <http://media1.riogrande.com/Content/Neutec-J-2R-Spanish-IS.pdf>.
- [17]Yehimy Rocio Gierrero anderas, H. A. (2012). Adecuación de la permeabilidad de moldes en yeso mediante la adición de espumantes y/o agitación para su aplicación al método de pre-engaste de esmeraldas. Bucaramanga : Universidad Industrial De Santander.
- [18] Michel Katrina Rivera Ariza y Juan Sebastian Villamizar Diaz. (2014). Caracterizacion y adecuacion de recibrimientos cerámicos a gemas de esmeraldas Colombianas para su protección en el proceso de moldeo en cera pérdida. Método pre-engaste. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.

BIBLIOGRAFÍA

(s.f.). Obtenido de [HTTP://WWW.FINITE.SOLUTIONS](http://www.finite.solutions)

BAQUERO, A. A. (2009). *Las propiedades de fundición*. Bucaramanga: Universidad Industrial De Santander.

BUHNER, D. J. (2005). *Santa fe symposium on jewellery manufacturing technology*.

CASABÓ, J. (2010). *Joyería*. Albatros 4° Ed.

GIERRERO ANDERAS Yehimy Rocio, H. A. (2012). Adecuación de la permeabilidad de moldes en yeso mediante la adición de espumantes y/o agitación para su aplicación al método de pre-engaste de esmeraldas. Bucaramanga : Universidad Industrial De Santander.

GOLD STAR, Gold Star Gem Set For the stone in place casting. . (s.f.). Obtenido de www.goldstarpowders.com

HOLSCHUH, B. (2009). *The jeweler's studio handbook: traditional and contemporary techniques for working with metal and mixed-media materials*. Quarry Books.

IOPscience. (2008). *Computer simulation applied to jewellery casting: challenges results and future possibilities*. IOPpublishing.

Jr, F. R. (2005). *Lost-wax casting "old, new and inexpensive methods*. Woodsmere Press.

KLEEBERG, C. (s.f.). Latest advancements in modelling and simulation for high pressure die castings. Magma engineering asia pacific pte ltd.

L., F. (s.f.). Resistencia de los materiales cerámicos a los cambios bruscos de temperatura.

MCCLOSKEY, Jhon C. D. A. (s.f.). Evaluation of permeability of a jewellery casting investment.

Montado En Cera . (s.f.). Obtenido de <http://www.biennainternational.com/sites/default/files/traduccion-montado-en-cera.pdf>

QUIMINET.com. (s.f.). Obtenido de <http://www.quiminet.com/articulos/las-diferentes-aplicaciones-de-la-arena-silica-2648107.htm>

SOLUTIONS, F. (s.f.). Obtenido de <HTTP://WWW.FINITE.SOLUTIONS>

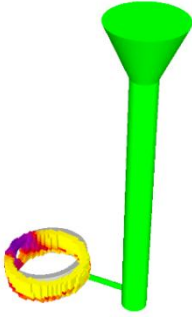
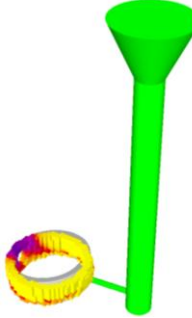
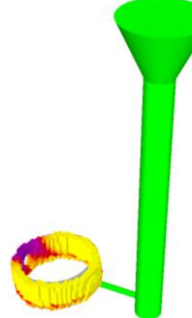
Tecnología de arenas de moldeo. (2009). Obtenido de <http://es.scribd.com/doc/23823694/tipos-de-arenas#scribd>

USA, N. (s.f.). Modelo J-2r Serie IV. Obtenido de <http://media1.riogrande.com/Content/Neutec-J-2R-Spanish-IS.pdf>.

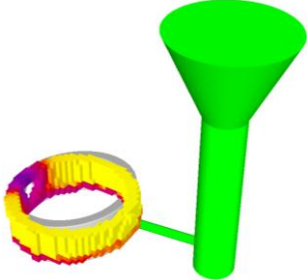
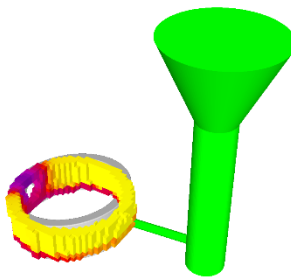
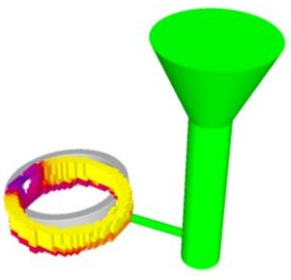
ANEXOS

Anexo A. Comparación entre los tipos de refractarios simulados

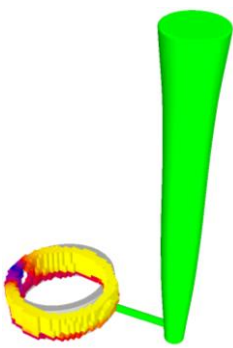
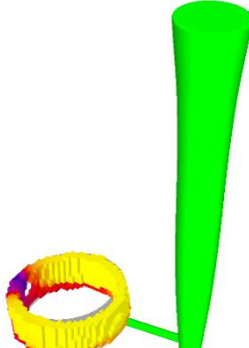
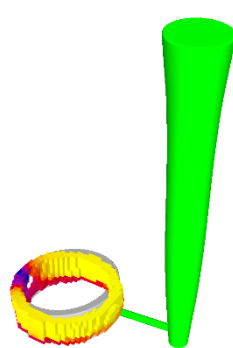
Bebedero convencional con implementación de un ataque

Arena sílice	Zirconita	Cromita
		

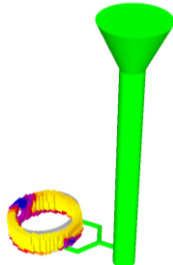

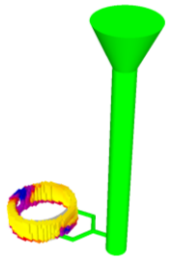
Bebedero corto con implementación de un ataque

Arena sílice	Zirconita	Cromita
		

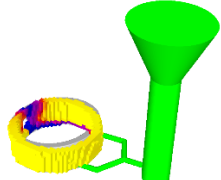
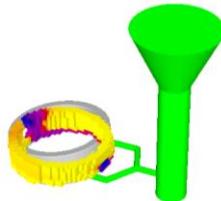
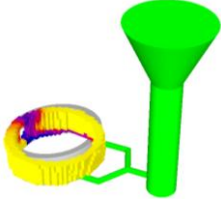
Bebedero modificado con implementación de un ataque

Arena sílice	Zirconita	Cromita
		

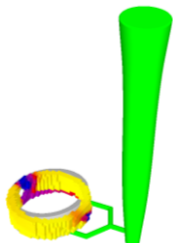
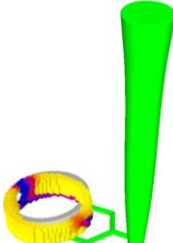
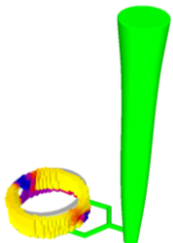
Bebedero convencional con implementación de dos ataques

Arena sílice	Zirconita	Cromita
		

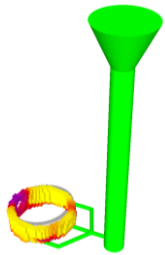
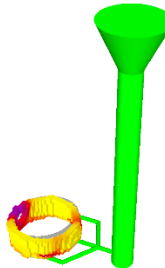

Bebedero corto con implementación de dos ataques

Arena sílice	Zirconita	Cromita
		

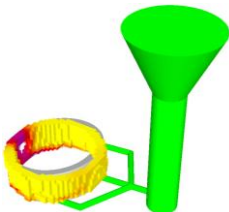

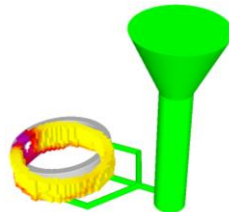
Bebedero modificado con implementación de dos ataques

Arena sílice	Zirconita	Cromita
		

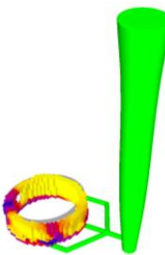
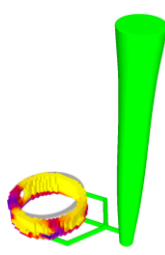
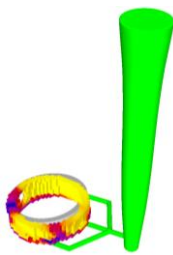
Bebedero convencional con implementación de tres ataques

Arena sílice	Zirconita	Cromita
		

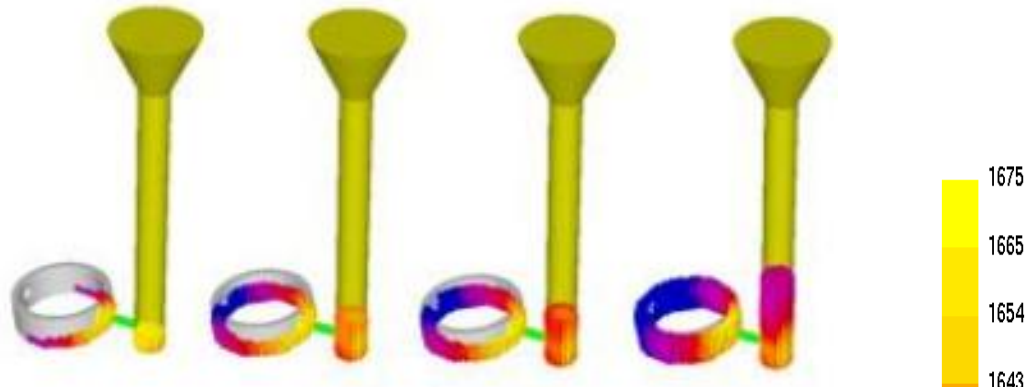
Bebedero corto con implementación de tres ataques

Arena sílice	Zirconita	Cromita
		

Bebedero modificado con implementación de tres ataques

Arena sílice	Zirconita	Cromita
		

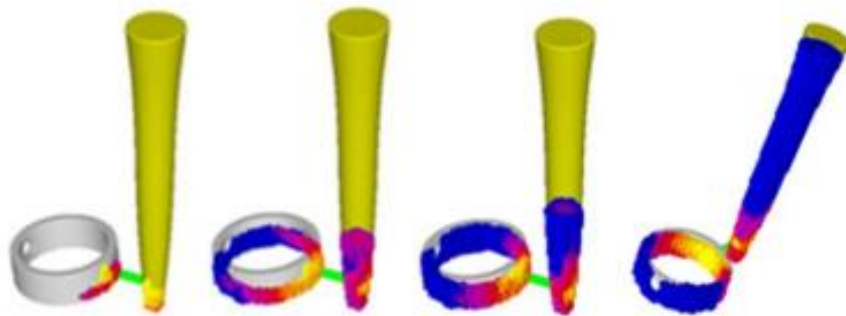
Anexo B. Simulación del proceso de llenado para el los diferentes tipos de bebederos, para un ataque



a) Tipo 1. Bebedero convencional



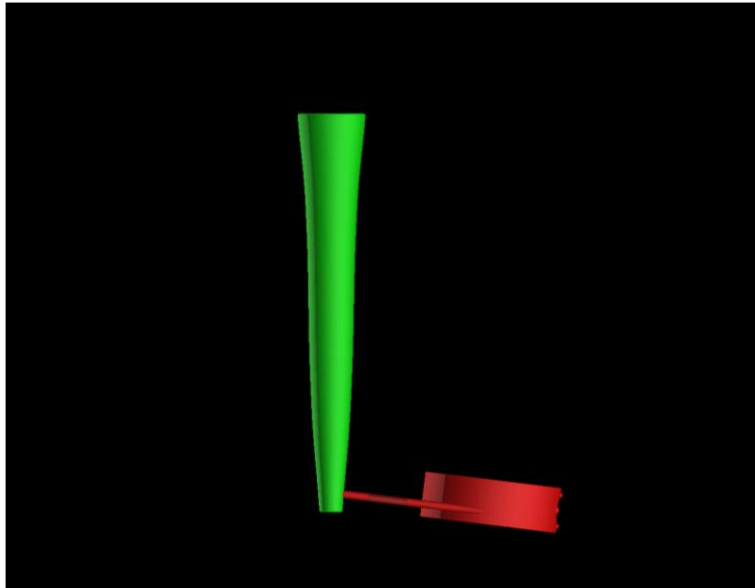
b) Tipo 2. Bebedero convencional corto



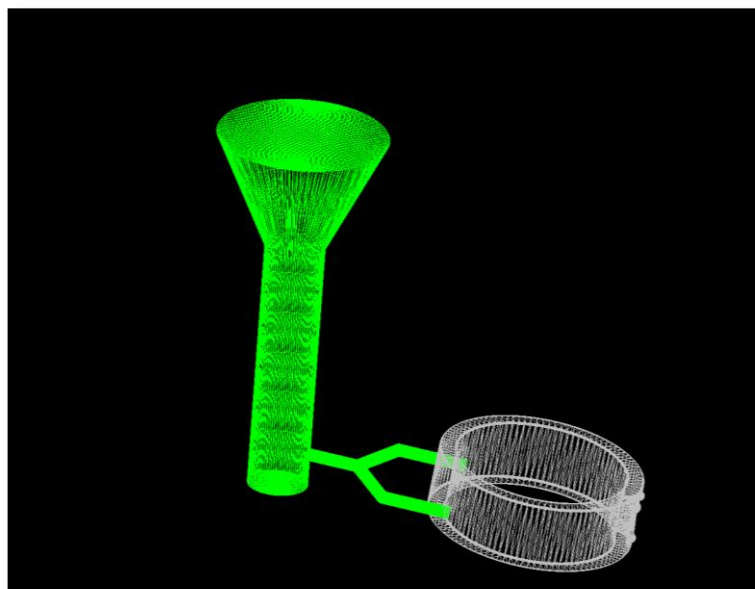
c) Tipo 3. Bebedero modificado

Anexo C. Diseño de los sistema de colada con variacion de bebedero y ataques, acontinuacion se presentan algunos de ellos

Bebedero modificado con un (1) ataque



Bebedero convencional con dos (2) ataques



Bebedero convencional corto con tres (3) ataques

