

115
2es.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

**Optimización de las técnicas utilizadas en el proceso
de fundición a la cera perdida en la producción
de piezas artesanales en bronce.**

TESIS

**Que para obtener el título de
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

Presenta

MARCO ANTONIO MORAN CABALLERO

Director: M. I. Armando Ortiz Prado



México, D. F.

1998

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

HIPÓTESIS

La industria de fundición artesanal mexicana puede incrementar su capacidad productiva substancialmente , introduciendo pequeños cambios en su proceso productivo , sin que esto signifique grandes erogaciones monetarias .

ÍNDICE	I
Prólogo	IV
Capítulo 1.- El proceso de fundición a la cera perdida	1
1.1.- Introducción	
1.2.- Producción y ensamblaje del modelo	
1.3.- Recubrimiento cerámico	
1.4.- Extracción de la cera y cocido	
1.5.- Colado	
1.6.- Limpieza y acabado	
Capítulo 2.- Aspectos importantes para obtener fundiciones de calidad	10
2.1.- Fabricación del modelo en cera	
2.2.- Aplicación del recubrimiento cerámico	
2.3.-Causas y soluciones de los defectos posibles en el recubrimiento cerámico	
2.4.- Control de calidad en los materiales	
Capítulo 3.- El futuro de la fundición a la cera perdida en la industria	36
3.1.- Fundiciones automatizadas	
3.2. Diseño asistido por computadora	
3.3.- Prototipos rápidos	
3.4.- Nuevas tecnologías	
Capítulo 4.- Situación actual de la fundición a la cera perdida en la industria artesanal	50
4.1.- Descripción de los procedimientos utilizados	
4.2.- Factores que provocan los defectos en las fundiciones	
Capítulo 5.- Optimización del proceso de fundición artesanal	61
5.1.- Recomendaciones en las materias primas a utilizar	
5.2.- Almacenamiento de las materias primas	
5.3.- Recomendaciones para mejorar el proceso	
5.4.- Reglas básicas de seguridad e higiene	
Capítulo 6.- Pruebas y análisis de resultados	77
6.1.- Modificación en las ceras utilizadas	
6.2.- Método de molde lleno con investimento de joyería y vaciado por centrifugado .	
6.3.- Utilización del proceso shell.	
Conclusiones	88
Referencias	92

PRÓLOGO

Los motivos de desarrollar este tema de tesis surge de la invitación para resolver las inquietudes de la empresa Arte y Diseño Fino de México S.A. de C.V. ; por desarrollar nuevas técnicas de producción en el ramo artesanal que le pudieran garantizar el soporte necesario para cumplir con las demandas del mercado internacional al que exitosamente están comenzando a penetrar .

Después de un análisis minucioso de los productos y de los procesos , se delimitaron los aspectos en los que a través de desarrollos tecnológicos se pudiera facilitar la labor del los artistas , artesanos y obreros para incrementar la capacidad productiva de la empresa. Se llegó a la conclusión de que el área idónea para desarrollar este trabajo de tesis era la fundición artesanal ; la cual comprende tres técnicas fundamentales , que son la fundición a la cera perdida , la fundición con molde semipermanente y en menor escala, la fundición por centrifugado. Debido al volumen de producción y a los graves problemas que presentaba la fundición a la cera perdida, tome la determinación de enfocar el presente trabajo a dicha técnica.

La función de Arte y Diseño Fino de México S.A. de C.V. como empresa integradora me dio la facilidad de conocer varios talleres de fundición artesanal , los cuales a pesar de ser de éxito y renombre trabajan de una forma bastante rudimentaria ; en donde las técnicas utilizadas han sido transmitidas de generación en generación sin mayores cambios o mejoras , en donde hay un mínimo o nulo control en las variables principales del proceso y con artesanos y dueños de talleres altamente resistentes a adoptar nuevas técnicas de producción .

El proceso actual que utilizan dichos talleres es casi invariable al original , que pierde sus orígenes entre los antiguos chinos y fenicios , consiste en fabricar un molde en hule , cola o yeso que se obtiene a partir de una escultura primaria realizada por un artista en algún material moldeable como plastilina o madera ; sobre este molde se vacía cera hasta formar una delgada capa . Este modelo en cera se cubre completamente con una mezcla líquida de cerámica y se introduce en un horno .

El calor seca la cerámica y derrite la cera , quedando un pequeño espacio interior que, a través de canales realizados expofeso , se llena con metal fundido . Una vez frío el metal , se rompe el molde de cerámica y se retira la pieza que ya sea sola o unida a otras por soldadura y después de pulida y patinada forma una copia de la escultura primaria .

La fundición a la cera perdida ha permitido la realización de obras esculturales que han contribuido al enriquecimiento histórico cultural de nuestro pueblo y del mundo. Con este trabajo pretendo contribuir al desarrollo tecnológico que sienta las bases de la modernización de la industria de fundición artesanal mexicana para hacerla más competitiva dentro y fuera del país.

El enfoque de este trabajo es el de identificar problemas y proponer soluciones a corto , mediano y largo plazo de manera sistematizada que no impliquen de inmediato grandes erogaciones de dinero y que puedan ser implementadas rápida y sencillamente ; recordando que se trata de una industria altamente cambiante en sus productos y con un mercado muy competitivo . Se debe tener cuidado en no proponer soluciones que rebasen la capacidad adquisitiva de la empresa o tecnologías que por su complejidad hagan imposible su implantación .

CAPÍTULO 1

El proceso de fundición a la cera perdida

1.1 Introducción .

La fundición a la cera perdida es un procedimiento que permite una gran libertad en configuración de las piezas así como en los metales a utilizar; por este método se pueden obtener piezas con gran fidelidad en las formas, exactitud en las dimensiones y excelentes acabados superficiales .

Como se explica a continuación la fundición a la cera perdida no es el método más simple , ni el más económico para fundir una pieza . El uso apropiado del proceso dependerá de la forma y del acabado superficial que se requieran . Para formas simples y acabados superficiales no críticos existen otras técnicas de fundición mejores y más económicas; sin embargo cuando la pieza es intrincada, con espesores delgados y que requiera un excelente acabado superficial , la fundición a la cera perdida es productiva y económicamente viable .

El proceso de fundición a la cera perdida tiene sus orígenes en la Era del Bronce alrededor año 4000 A. C; las piezas más antiguas que se conocen provienen del Asia Menor .

En Egipto el procedimiento se empieza a utilizar 1500 años más tarde y se tiene conocimiento que fueron de los pioneros en producción en serie y ensamble del modelo . En China los artesanos de la Dinastía Shang (1766 -1122 A.C.) utilizaron esta técnica para crear piezas de arte , muchas de estas piezas afortunadamente todavía se conservan y son tan delicadas y sofisticadas como cualquier componente de precisión de hoy en día .

No se conoce mucho de la historia del proceso en Europa y en el resto de Asia hasta después del siglo XVI , cuando se reutilizó la técnica de los antiguos artistas, prueba de esto lo podemos constatar con las puertas de bronce de la catedral de Mainz, Nowgorod y Gnesen , todas ellas creadas por fundición a la cera perdida .

En América, específicamente en México, el istmo centroamericano y Colombia los trabajos de orfebrería en la época precolombina se realizaban básicamente con la misma técnica, también se conservan muestras de la complejidad y de la calidad de estas fundiciones. En el caso de México, la metalurgia llegó alrededor del año 900 de nuestra era, en el periodo Tolteca, como una influencia de la orfebrería

colombiana, alcanzando su mayor difusión entre los mixtecos, como ejemplo podemos mencionar las piezas halladas en la tumba 7 de Monte Albán y las encontradas en la zona de Río Medio en Veracruz.

A principios de nuestro siglo la odontología comenzó a utilizar para sus fines los procedimientos de fundición a la cera perdida que venían utilizando los artistas y joyeros. Mediante modelos de cera, que se moldean a partir de la dentadura del paciente se pueden fundir prótesis dentales, empastes y coronas .

El proceso como se conoce en nuestros días, se originó en los años cuarenta con el desarrollo las técnicas empleadas en la odontología para agilizar la producción de componentes para motores de avión, las cuales requerían de un alto grado de exactitud dimensional, buenos acabados superficiales y formas complejas en aleaciones que eran muy difíciles de trabajar por algún otro método convencional.

Dentro de las ventajas que ofrece el proceso en la actualidad podemos mencionar en primer término el que muchas piezas fundidas no necesitan un maquinado secundario y cuando éste se requiere es usualmente mínimo, asimismo encontramos piezas que producidas por otros métodos necesitarían ensamblaje entre sí pero producidas por el método a la cera perdida pueden ser fundidas como una sola pieza.

Otra ventaja del método es la solución que ofrece a problemas de cavidades internas a través del uso de corazones solubles o corazones cerámicos . En el caso de corazones solubles; se pueden disolver del modelo en cera dejando la cavidad para posteriormente continuar con el proceso mientras que los corazones cerámicos se extraen de la fundición por medios mecánicos y químicos y estos se usan en el caso de que la cavidad obtenida por un corazón soluble no pueda ser recubierta eficazmente .

La selección de las aleaciones no es un problema para el método , ya que muchos metales incluyendo aquellos que son difíciles de maquinar pueden ser empleados exitosamente por el método, por mencionar algunos tenemos aceros al carbono , aceros aleados, aceros para herramientas y aleaciones de cobre, aluminio, níquel y cobalto .

Las limitaciones que tiene el proceso son las tolerancias lineales y geométricas que se obtienen en la fundición final, que dependen de varias condiciones del proceso, por ejemplo, la contracción del modelo, la contracción y expansión del molde, la contracción posterior del metal y las operaciones post-fundición como el tratamiento térmico .

A continuación se presenta una tabla comparativa de algunos de los principales métodos de fundición comparados al sistema de fundición a la cera perdida.

Factores de fundición	Fundición en arena	Fundición en cascara	Fundición en molde permanente por gravedad	Fundición en molde permanente bajo presión	Fundición en molde de yeso	Fundición a la cera perdida
Aleación que puede procesarse	La mayoría	La mayoría	No ferrosas	Aluminio , Zinc , Magnesio y cobre	Aluminio y cobre	La mayoría
Peso	0.5 kg. hasta varias toneladas	0.5 kg. hasta 10 kg.	0.5 kg. hasta 50 kg.	0.2 kg. hasta 25 kg.	0.5 kg. hasta 10 kg.	0.1 kg. hasta 10 kg.
Tamaño típico de lote	1 a 1,000	500 a 5,000	500 a 10,000	10,000 a 100,000	100 a 2,000	50 a 1,000
Tolerancia mm/mm por los primeros 25 mm	0.03 a 0.06	0.01 a 0.02	0.02 a 0.05	0.001 a 0.003	0.005 a 0.010	0.002 a 0.005
Sección mínima en mm	3.0 a 5.0	1.5 a 2.5	2.5 a 4.0	1.0 a 2.0	0.8 a 2.0	0.5 a 1.0
Acabado superficial en μm (rugosidad)	6.0 a 25.0	1.5 a 5.0	3.0 a 10.0	0.5 a 3.2	1.0 a 2.5	0.8 a 3.8

Tabla 1.- Comparación entre los procesos de fundición mas usuales

Como podemos observar, el proceso de fundición a la cera perdida es superior en acabado superficial y sección mínima y tiene excelentes tolerancias dimensionales solamente está por debajo de la fundición en molde permanente bajo presión. Los lotes obtenidos son relativamente limitados y el tamaño de las piezas lo podemos considerar como pequeño .

Básicamente el proceso de fundición a la cera perdida se realiza en seis etapas que son:

1. Producción del modelo
2. Ensamblaje del modelo
3. Recubrimiento cerámico
4. Extracción de la cera y horneado
5. Colado
6. Limpieza

1.2 Producción y ensamblaje del modelo

Los modelos de cera se forman generalmente por inyección dentro de una matriz que tiene la forma de la pieza final . Los materiales para la fabricación de las matrices pueden variar desde hule hasta acero dependiendo del volumen de producción ; para producciones pequeñas o fabricación de prototipos se recomienda el uso de matrices de hule , resina epoxy o de metales blandos, en tanto para producciones grandes se utilizan matrices de aluminio y acero .De la misma manera las matrices difieren en que pueden ser individuales o múltiples y con sistemas manuales o automáticos .

Debido a las contracciones que sufren la piezas fundidas al enfriarse, los modelos deben ser más grandes que las piezas a fabricar, lo que se debe de reflejar en las dimensiones de la matriz. En realidad se tienen contracciones y dilataciones en los diferentes pasos del procedimiento. Primero el modelo se contrae en la matriz y luego vuelve a dilatarse al calentar el molde, antes de derretirse; de la misma forma el molde se dilata al ser cocido y la pieza fundida se contrae en el enfriamiento.

La cera se inyecta al interior de la matriz en estado pastoso , manteniéndose la presión de inyección durante algunos segundos, según el tamaño del modelo, a fin de compensar la contracción del material inyectado durante el enfriamiento.

Las ceras de fundición utilizadas hoy en día son una versión sofisticada de las utilizadas en la antigüedad ; es decir una mezcla de ceras y resinas ya sea naturales o sintéticas . La cantidad de resina utilizada en una cera determina la contracción de la cera cuando se enfría de su estado líquido a su estado sólido a temperatura ambiente, asimismo , el punto de fusión de una mezcla de cera y resina, básicamente está determinado por el tipo de cera usada.

Las ceras deben de ser calentadas manteniéndolas a su temperatura de inyección por varias horas antes de ser usadas; para asegurar uniformidad y mejorar así tanto el flujo como el acabado superficial. Las ceras se deben de inyectar tan cerca de su temperatura de inyección¹ como sea posible; si se inyecta muy por abajo de esta temperatura puede resultar en que el modelo tenga una apariencia granulosa y en el caso de inyectar muy por arriba se afectan los ciclos de tiempo.

El modelo terminado se ensambla a un sistema de alimentación , generalmente por fusión o pegado con cera derretida y el modelo con el sistema de alimentación se pega a su vez a una copa de vaciado. El conjunto del modelo , el sistema de alimentación y la copa de vaciado se conoce como árbol. El número de modelos , el tipo de sistema de alimentación y su ubicación con respecto a la copa de vaciado depende del tipo de aleación , del tamaño y de la configuración de la fundición.

1.3 Recubrimiento cerámico

Existen dos técnicas de recubrimiento cerámico en la industria ; el proceso de fundición de molde sólido y el proceso de fundición en cáscara . En el proceso de molde sólido, el árbol recibe un recubrimiento delgado de grano fino , y este puede ser por inmersión , pulverización o pintado. Este recubrimiento consta de un material refractario (como silaminita , oxido de circonio , magnesita o cuarcita) y un aglomerante (como silicato etílico o silicato potásico). El recubrimiento debe ser uniforme y compacto, ya que, una vez derretido el árbol, el es quien forma la capa interna del molde y determina la calidad de la superficie. Además debe ser poroso para permitir la salida del aire del molde antes de la colada.

Sobre este recubrimiento se espolvorea arena más gruesa, lo que proporciona una buena unión con la masa posterior de relleno . Una vez alcanzadas estas condiciones se introduce el árbol en una camisa de acero , la cual generalmente se fija con cera a la placa de la base. Después se introduce la masa de relleno en la camisa de acero auxiliándose de vibración. Dicha masa es una mezcla de material de moldeo grueso y un aglomerante y su objetivo es proporcionar a la capa interna de grano fino una estabilidad de forma al derretir la cera y al efectuar la colada.

El moldeo en cáscara consiste en sumergir el árbol repetidas veces dentro una suspensión de material cerámico de varios grados de tamaño . El sumergido inicial se realiza en una suspensión de material cerámico muy fino . Un recubrimiento de

¹ La temperatura de inyección depende del tipo de cera y se encuentra entre el punto de fusión y el punto de solidificación .

estuco¹ se aplica a la preparación húmeda , generalmente en una cama fluidizada o un mecanismo de rocío, el recubrimiento mantiene a la preparación en su lugar y proporciona firmeza.

Después de que el recubrimiento inicial seca, el árbol se sumerge nuevamente , pero ahora en una suspensión con un cerámico de grado más grueso. El proceso se repite con grados más gruesos de cerámicos hasta obtener una estructura con la firmeza necesaria para soportarse sola y con un espesor que puede variar de 5 a 15 mm.

Los moldes de cáscara se secan cuidando el control de la temperatura y la humedad. El control de la humedad es crítico para la precisión de los moldes y para que no existan cuarteaduras , mientras que una temperatura constante es fundamental para mantener una humedad relativa y para evitar contracciones o dilataciones del modelo y de la cáscara.

Para asegurar un promedio constante de secado se controla el flujo de aire con algún tipo de sistema de ventilación .

La cáscara cerámica consta de dos componentes, una suspensión de cerámico y un estuco refractario . La suspensión contiene un aglomerante inorgánico, arena fina refractaria, un humectante y un agente anti-espumante; el estuco o arenas refractarias adicionan firmeza y soporte .

Una buena cáscara cerámica tendrá las siguiente características :

- Buena distribución del calor
- Ser compatible con el metal
- Tener propiedades físicas y químicas consistentes
- Tener la posibilidad de separarse rápidamente de la fundición

¹ Capa de arena de grano fino o yeso que se rocía alternadamente después de cada sumergido en la suspensión .

1.4 Extracción de la cera y cocido

Se puede extraer la cera por varios métodos : por exposición al fuego , por medio de un autoclave o por microondas. El método de exposición al fuego permite que la cera se derrita rápidamente de manera que la cera no tenga tiempo para la expansión. Generalmente se utilizan temperaturas de 950 a 1100 °C para esta operación; lo que puede añadir algo de firmeza a la cáscara, sin embargo ésta no se calienta uniformemente debido a los efectos de radiación del calor. La cera de los modelos se puede recuperar y reutilizar después de un proceso de refinado debido a que se oxida parcialmente y sufre cierta contaminación.

El método de extracción de la cera por medio de un autoclave utiliza vapor bajo presión para derretir la cera y conservar la cáscara intacta. La ventaja de este procedimiento es que la cáscara se calienta uniformemente y la cera puede ser recuperada. La utilización de microondas para la extracción de la cera promete ser una técnica limpia y muy eficiente que puede ser utilizada de manera continua y no por lotes como las dos técnicas antes mencionadas.

Una vez que se extrajo la cera de los moldes se llevan a un horno de cocción en donde se calientan entre 900 y 1100 ° C. Durante este proceso se queman los restos de cera que pudieran quedar , y debido a que se aglutina más la masa cerámica se obtiene la mayor resistencia .

1.5 Colado

Para el procedimiento de molde lleno, los moldes una vez cocidos se dejan enfriar en el horno hasta alcanzar una temperatura que oscile de 600 a 900 ° C para después llevarlos a la colada. La temperatura del molde depende de las dimensiones de la pieza y de la aleación empleada. La alta temperatura del molde facilita por un lado el llenado de pequeñas cavidades y evita problemas de agrietamiento del molde, asimismo proporciona piezas con muy buena homogeneidad.

Es importante mencionar que el colado se debe realizar a estas temperaturas debido a que alrededor de los 580 ° C el cuarzo sufre una transformación de fase que provoca una variación brusca de volumen que puede causar grietas en el molde.

Para facilitar el llenado se pueden someter los moldes a centrifugado durante la colada o colar a presión . También se puede extraer aire del molde desde el fondo , agilizando la entrada del metal fundido .

El procedimiento de moldeo en cáscara presenta la ventaja de que los moldes pueden ser almacenados en verde largo tiempo una vez eliminando el modelo , a diferencia de los moldes compactos que no deben dejarse enfriar una vez sacados del horno. Previamente a la colada, los moldes de cascara deben ser cocidos a una temperatura entre los 900 a 1100 ° C ,para desarrollar permeabilidad y firmeza . Esta etapa debe ser no mayor de una hora. La colada de los moldes de cáscara se realiza sin ningún otro material de relleno, sin embargo para piezas muy grandes se recomienda la utilización de granalla de acero como material de relleno.

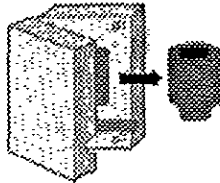
1.6 Limpieza .

Una vez colado el molde se deja enfriar para posteriormente obtener la pieza fundida, usualmente el desmolde se realiza con la ayuda de aire comprimido . Los restos de arena adheridos al racimo se eliminan con un baño de sosa , con chorro de agua o con un chorro de granalla fina de acero. El separado de las piezas del árbol se elimina mediante una sierra circular.

Las mazarotas se eliminan con muelas abrasivas así como pequeños defectos superficiales y rebabas producidas por ejemplo por grietas en el molde. En algunos casos es recomendable someter a las piezas a un tratamiento térmico. Como acabado final las piezas pueden ser sometidas a una limpieza por chorro de arena .

Una vez realizada la limpieza las piezas deben pasar por control de calidad donde se verifica que cumplan las especificaciones finales .

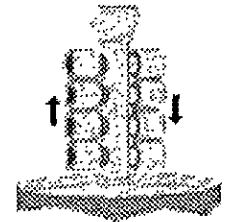
Fundición a la cera perdida por el método de moldeo en cáscara cerámica.



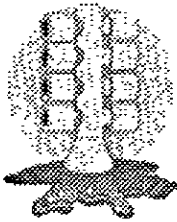
1.-Inyección de la cera



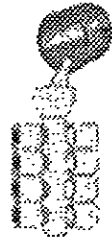
2.-Ensamblaje



3.-Recubrimiento cerámico



4.-Desencerado



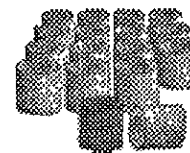
5.-Vaciado



6.-Desmoldeo



7.- Cortado



8.- Acabado final

CAPÍTULO 2

Aspectos importantes para obtener fundiciones de calidad

Realizando una analogía entre la fundición a la cera perdida con la teoría de evolución del hombre, podemos decir que así como el hombre y el mono parten de un mismo origen hace unos miles de años; en donde el hombre desarrolla una evolución superior. De la misma forma, la fundición industrial con respecto a la fundición artesanal, ha desarrollado nuevos procedimientos que no se incluyen en la fundición artesanal a pesar de ser ésta el origen de la otra.

Sin embargo podemos afirmar que “A pesar de sus orígenes históricos la fundición a la cera perdida está todavía en su infancia”¹. Se siguen desarrollando nuevas técnicas, perfeccionando las formulaciones de las ceras y los recubrimientos cerámicos y se abren nuevas oportunidades de mercado para la utilización del proceso, ya sea en la industria aeroespacial, automotriz, herramental y en la fabricación de válvulas en los que este método ha tenido su mayor penetración.

Es importante revisar las técnicas utilizadas en el proceso industrial actualmente para poder proponer cambios al proceso artesanal adaptando dichas técnicas a las necesidades específicas que requiera la fundición de esculturas, estableciendo métodos y procedimientos que resuelvan los problemas que se tienen actualmente y que garanticen la calidad de las piezas.

Muchos fundidores han encontrado que para producir consistentemente piezas de gran calidad es esencial establecer un control estricto en el proceso. Una vez que una fundidora establece su formulación particular de cera y recubrimiento cerámico y sus técnicas de aplicación, el éxito depende del control de la ejecución.

La literatura sobre la fundición a la cera perdida no nos dice mucho . Las fundidoras cuentan generalmente con mucha experiencia práctica adquirida a través de prueba y error que con los años les ha dado resultados consistentes . Sin embargo, a pesar de todo este conocimiento que queda como legado en la industria, existe una creciente demanda por procesos de control documentados.

La función de este capítulo es encontrar, a través de una revisión bibliográfica, las bases para poder proponer los cambios necesarios para establecer sistemas de control y procedimientos que ayuden a garantizar la producción de piezas con un nivel de calidad y reproductibilidad adecuados .

¹ A1zt , A.M. “ Optimizing Control Shell Cracking in Investment Casting “ Modern Casting Feb 1987

2.1 Fabricación del modelo en cera

La producción del modelo en cera es el inicio del proceso de fundición; a partir de un modelo de calidad se obtendrá una pieza fundida de calidad. Por esto se deben tener en cuenta los factores que intervienen en la producción del modelo tales como la composición de las ceras, que incluye la adecuada selección de los aditivos; un buen control de temperatura en el derretido, acondicionamiento e inyección de la cera; una buena técnica en el soldado, en caso de que el modelo se forme por varias piezas y una excelente preparación antes de aplicar el recubrimiento cerámico.

Composición de las ceras.

Se han desarrollado numerosas fórmulas de cera a través de los años. Las ceras comerciales deben satisfacer los criterios para la obtención de un buen modelo; es decir deben tener bajo contenido de cenizas, buena fluidez, bajos índices de contracción y expansión, buena estabilidad y compatibilidad con otros materiales involucrados en el proceso y una adecuada firmeza y dureza.

Hoy en día es muy raro ver una mezcla que solo contenga cera ; éstas se modifican para mejorar sus propiedades, lo que usualmente utilizan las fundidoras modernas es una composición de ceras naturales, ceras de petróleo, resinas, plásticos, rellenos, plastificantes, antioxidantes y colorantes que en conjunto proporcionan los atributos para cumplir requerimientos específicos.

Las ceras mas usadas para los modelos son las ceras parafínicas y microcristalinas; generalmente son usadas en combinación una con otra ya que sus propiedades tienden a complementarse. A continuación se presenta una tabla con las ceras más comunes y sus características principales .

Tipo	Origen	Características
Parafínica	Derivados de petróleo	Son económicas, tienen alta lubricidad y baja viscosidad además de estar disponible en series de puntos de fusión controlados. Sus inconveniencias son que son quebradizas y tienen altos índices de contracción. Sus puntos de fusión tienen un rango de 52 a 68 °C .
Microcristalina	Derivados del petróleo	Están disponibles en varios grados de dureza. Estas imparten cierto control a la dureza y firmeza del modelo y facilitan el flujo ya que tienden a ser bastante plásticas en situaciones donde las ceras parafínicas son quebradizas. Están disponibles en puntos de fusión mas altos que las parafínicas .
Fisher-Tropsh	Sintético	Son ceras sintéticas de hidrocarburos que sustituyen a las ceras parafínicas, pero están disponibles en grados mas altos de dureza y puntos de fusión. Mejoran la dureza y rigidez del modelo.
Polietilénicas	Sintético	Tienen un peso molecular mucho mas bajo que el polietileno usual. Funcionan de manera similar a la cera Fisher -Tropsh aunque con puntos de fusión mas altos (por arriba de 132 °C).
Candelilla	Vegetal	Es moderadamente dura y suavemente pegajosa, tiene una expansión térmica relativamente baja y presenta una menor contracción que las ceras de hidrocarburos. Es útil para endurecer la cera parafínica e incrementar su suavidad. Desafortunadamente esta sujeta a escasez y fluctuaciones en el precio.
Carnauba	Vegetal	Tiene un alto punto de fusión (83 ° C) y un bajo coeficiente de expansión térmica. Es una cera muy dura, no pegajosa y es frágil. Presenta un alto costo.
Cera de abeja	Natural (insectos)	Tiene un punto de fusión aproximadamente 64 ° C . Es ampliamente usada para el modelado y es muy útil en la mezcla de ceras ya que contribuye a mejorar las características de las ceras microcristalinas . Su uso es limitado debido a su costo.

Tabla 2. Ceras más comúnmente empleadas

Otros materiales usados como ceras de fundición son ácidos grasos como el palmítico y el esteárico, así como el aceite de castor hidrogenado entre otros.

Las ceras son materiales relativamente baratos, proporcionan un buen balance de propiedades que no se obtienen en otros materiales. Se mezclan fácilmente para satisfacer diferentes requerimientos y son compatibles con otros materiales que pueden mejorar sus propiedades todavía mas. Sus puntos de fusión bajos y sus bajas

viscosidades facilitan la composición, inyección y ensamblaje de los modelos en arboles y el derretido sin romper el delgado recubrimiento cerámico de los moldes.

Sin embargo las ceras tienen dos áreas importantes en las que son deficientes; firmeza y control dimensional. Para cubrir estas carencias se recomienda el uso de resinas y aditivos.

La lista de aditivos empleados es larga y variada, podemos mencionar etilen -vinil acetato, polietileno, etil celulosa, nylon y etilen vinil acrilato. La finalidad de añadir aditivos es mejorar ciertas características como la dureza, firmeza, viscosidad, acabado superficial y estabilidad dimensional además de modificar el punto de fusión, la temperatura de inyección y el contenido de ceniza. Estos materiales son altamente viscosos lo cual limita su uso a pequeñas cantidades.

Las resinas utilizadas pueden ser de origen natural como aquellas derivadas del petróleo crudo o de arboles de pino, por ejemplo brea o pueden ser producidas sintéticamente. Podemos encontrarlas dentro de un rango de punto de fusión, dureza y cristalinidad. Son usadas para reducir los índices de contracción y expansión de la cera durante todo el proceso, su uso puede ser en grandes cantidades debido a que tienen una viscosidad relativamente baja a las temperaturas del proceso.

De acuerdo con las consideraciones hechas anteriormente las formulaciones de las ceras utilizadas en la industria caen dentro de los siguientes rangos:

Ingredientes	Composición en %
Ceras (usualmente más de una)	30 -70
Resinas (una o dos)	20 -60
Aditivos (uno)	0-20
Otro	0-5

Tabla 3 . Formulación básica para la elaboración de ceras de fundición.

En muchas aplicaciones se utilizan ciertas sustancias para reducir y controlar la contracción del modelo de cera, a estas sustancias se les da el nombre de rellenos. Los rellenos en las ceras son sustancias finamente divididas que son inertes a la temperatura de la cera, con un diámetro de menos de 100 micrones y con un bajo contenido de ceniza. Los rellenos se adicionan a la cera base con una carga del 10 al 50 % de la formulación total.

El uso de rellenos no es tan simple como parece y varios factores deben de ser tomados en cuenta, como se muestra en la tabla 4.

Rellenos utilizados	Agua	Ácido isoftálico	Ácido Tereftálico	Bisfenol	Poli alfa metil estireno	Poliestireno entrelazado
Propiedades deseables						
Inerte a la cera base a las temperaturas de proceso y operación		X	X	X		X
Densidad similar a la cera base	X				X	X
Punto de Fusión muy por arriba de las temperaturas de proceso y operación		X	X			X
Conductividad térmica del relleno similar o menor que la de la cera base				X	X	X
Partículas con forma aproximadamente esférica.	X	X	X		X	X

Tabla 4 ¹. Propiedades generadas por los rellenos

De la tabla podemos observar que el poliestireno entrelazado es el material idóneo para utilizarlo como relleno, sin embargo es él más caro de los rellenos listados, este relleno es ampliamente usado en Inglaterra, en donde también son utilizados el ácido isoftálico y el agua. En los Estados Unidos se prefieren los ácidos isoftálico y tereftálico aunque también con menor regularidad el bisfenol y el poli alfa metil estireno son utilizados como rellenos.

Control de la temperatura

Como ya se mencionó la manera en manejar la cera durante las etapas de fusión, acondicionamiento e inyección se reflejará directamente en la calidad de los modelos; en estas tareas el control de la temperatura es de suma importancia, es indispensable el uso de termómetros que nos ayuden a monitorear la temperatura en todo momento.

Un sobrecalentamiento puede oxidar las materias primas usadas en los modelos de cera, provocando que esta sea quebradiza o elástica, dependiendo de la formulación. Esto afectaría las características de inyección y las dimensiones. La apariencia de la cera en su estado líquido puede indicar cuando esta ha sido sobrecalentada.

Algunos indicadores son:

- Cambio de color
- Partículas negras en la cera líquida y en las paredes y fondo del tanque
- Presencia de humo y vapores emitidos por el tanque de fusión
- Señales de un asentamiento del relleno en la cera

¹ Foundry Trade Journal , no. 3379 , vol. 162 ,pp 875-76 (Oct 21 ,1988)

La temperatura de fusión de la cera debe conservarse entre 82 a 99 ° C; cuando se usan tanques de fusión convencionales se recomienda usar un contenedor enchaquetado con aceite, instrumentado con un buen termostato para el control de la temperatura. Asimismo, se recomienda agitación para todo tipo de ceras con o sin relleno. Estas dos acciones mantendrán la temperatura uniforme y ayudarán a prevenir sobrecalentamientos localizados y daños a la cera.

Para ceras rellenas no se recomienda el uso de tanques de fusión rectangulares, debido a que el relleno quedaría atrapado en las cuatro esquinas del tanque y no en suspensión, en el uso de tanques cilíndricos se debe cuidar que la última aspa del agitador quede lo más cerca posible al fondo del tanque para evitar el asentamiento del relleno.

Las unidades de fusión modernas están diseñadas para trabajar con cera en barra o en hojuelas en forma continua. Estas unidades con diseños cilíndricos o rectangulares se colocan por encima del tanque acondicionador para proveer a éste directamente de cera líquida.

La cera sólida es calentada a través de un plato caliente o aire caliente. La temperatura es monitoreada por medio de un controlador digital y usualmente se cuenta con un switch de paro en caso de tener altas temperaturas, para prevenir sobrecalentamientos y daños a la cera.

Usualmente la forma de la medición de la temperatura de la cera líquida o en pasta en la máquina de inyección es colocar el termómetro en la cera y esperar a que éste nos dé una lectura; esto puede causar problemas debido a que un termómetro frío colocado en cera caliente provocará inmediatamente que la cera se solidifique alrededor del termómetro, aislando éste del resto de la cera, lo que daría una lectura errónea.

Una solución a este problema es calentar el termómetro a una temperatura más alta que la estimada en la cera, depositarlo y lentamente moverlo dentro de ésta; este método dará una lectura más exacta cuando la temperatura se estabilice.

Los cambios dimensionales en los modelos son provocados principalmente por diferencias en la temperatura de la cera al momento de la inyección. La cera debe de ser acondicionada apropiadamente antes de la inyección. La mayoría de las ceras son inyectadas por debajo de su punto de fusión y en algunas ocasiones muy por debajo del punto de fusión de algunos de sus componentes. Para asegurar uniformidad se

tiene que atemperar la cera almacenándola a la temperatura de inyección varias horas antes de ser usada. Cuando una cera ha sido acondicionada apropiadamente se optimiza la viscosidad, el flujo y el acabado superficial.

Después de que la cera ha sido acondicionada se debe vaciar del tanque de fusión, que como ya se mencionó anteriormente debe estar a una temperatura de 82 a 99 °C, a la prensa de inyección líquida con el termostato ajustado entre 63 y 66 °C, dependiendo del tipo de cera y del modelo a inyectar. Se debe procurar que tanto los tanques de fusión, acondicionamiento como las máquinas de inyección tengan un buen sistema de conducción del calor, en el caso contrario la cera tardará un largo tiempo en derretirse y perderá su calor.

Dentro de los problemas causados por inyectar cera caliente se encuentran:

- Cambios dimensionales
- Exceso de poros o hundimientos
- Exceso de brillo en el modelo
- Exceso de contracción
- Grandes tiempos de espera
- Ensamblaje lento de los modelos
- Presencia de aire atrapado debido a la turbulencia

Un buen hábito en el manejo de la cera, si no se tiene un sistema de distribución central, es llenar las máquinas cuando se encuentren alrededor de un tercio vacías. Esto permitirá la mezcla de cera caliente con cera fría en la máquina y llegar al equilibrio más rápidamente; de no ser así no solo se estaría inyectando cera caliente sino también quedaría mucho aire atrapado en el recipiente.

Así como las ceras de fundición tienen un punto de fusión, también tienen un punto de solidificación que cae alrededor de 17 °C debajo del de fusión, con una temperatura de inyección entre alguno de los dos. Un control pobre de temperatura o un descuido pueden causar que la temperatura de inyección caiga muy abajo; lo que desencadenaría:

- Un mal llenado
- Aparición de líneas de flujo, ondas y líneas entrecruzadas.
- Cambios dimensionales
- Defectos en el acabado superficial como apariencia de cáscara de naranja y granulaciones.

Si la cera se enfría demasiado, elevar la temperatura de la cera a su temperatura de inyección puede no ser la solución adecuada. Hay ingredientes en la fórmula de la

cera que tienen altos puntos de fusión y cuando la temperatura de la cera ha descendido por debajo de su temperatura de solidificación, estos componentes se cristalizan. Lo más recomendable en esta caso es regresar esta cera al tanque de fusión.

La temperatura no es el único factor que interviene en una mala producción de modelos, también están involucrados los mecanismos de inyección y los estándares y procedimientos establecidos para cada uno de los trabajos realizados. Las variables que afectan la producción de modelos en cera son; la presión de inyección, la temperatura del dado de inyección, el diseño de alimentación, la lubricación del dado, el flujo promedio de la cera, el enfriamiento post-inyección, la salida y la superficie del dado y los tiempos de espera.

Moldes para la fabricación de los modelos de cera .

Existen una amplia gama en los materiales para la fabricación de los moldes, esto es gracias a los bajos puntos de fusión, buena fluidez y debido a que la cera no es un material abrasivo. La selección de los materiales para los moldes está influenciada por otros factores como son el costo, la vida del molde, los tiempos de entrega y la calidad requerida.

Los materiales más utilizados en la fabricación de los moldes son: aleaciones de zinc, cobre y aluminio; acero, hule, plástico y yeso; aunque también se puede presentar alguna combinación de las anteriores. Estas opciones pueden ser utilizadas sin problema para modelos de cera; sin embargo para modelos de algún plástico, como el polietileno, se usa generalmente acero o aleaciones cobre –berilio.

Los métodos de fabricación de moldes los podemos clasificar en tres categorías: maquinado, construcción sobre un modelo positivo y fundición. La mayor parte de los moldes se fabrican por maquinado, auxiliándose comúnmente de máquinas de control numérico.

La construcción de moldes sobre de un modelo positivo incluye una variedad de métodos, algunos de los cuales representan una opción muy económica. Dentro de estos métodos podemos mencionar el forjado, la fundición bajo presión para metales y la formación del molde utilizando materiales no- metálicos como hule, plástico o yeso.

Por último, los moldes fabricados por fundición se realizan generalmente de acero, aleaciones de cobre –berilio o aleaciones de aluminio. El método mas utilizado es el

vaciar cera encima de un modelo maestro para posteriormente utilizar esta cera para la fundición del molde.

Ensamblaje del modelo

Los modelos de cera en muchas ocasiones son creados de pequeños segmentos los cuales al ser unidos forman la parte completa y generalmente son ensamblados a otros modelos formando árboles para los siguientes pasos del proceso. El árbol o modelo usualmente es soldado poniendo las partes individuales en soportes fijos que alinean los segmentos para poder aplicarles calor a las uniones por medio de navajas o alambres calientes; la cera en las uniones se derrite rápidamente y se aplica presión hasta que la cera se solidifica. También pueden usarse adhesivos calientes en lugar del soldado o como complemento de éste.

Usualmente la superficie debe ser retrabajada para preservar el acabado original y la suavidad. Es esencial que las uniones sean fuertes y estén totalmente selladas. Se debe tener mucho cuidado en no dañar los modelos o derramar gotas de cera sobre estos.

Este proceso toma tiempo considerable y requiere de trabajadores especializados que puedan tomar decisiones para determinar cuando se ha derretido el suficiente material y cuando la calidad superficial es adecuada para el recubrimiento cerámico.

Dentro de los problemas que se presentan en el ensamblaje podemos incluir:

- Sellado defectuoso entre las partes del modelo y los canales de alimentación.
- Presencia de agua en los canales de alimentación de cera
- Uniones débiles entre la boca para vertido y el bebedero causados por navajas o alambres de soldado fríos o un retraso en el ensamblaje de las partes.
- Diseño inapropiado en el tamaño en la boquilla de alimentación.
- Espaciamiento incorrecto entre el modelo y el bebedero o los canales de alimentación.

2.2 Aplicación del recubrimiento cerámico

El recubrimiento cerámico o cáscara cerámica es vital para la precisión en la industria de fundición a la cera perdida pues literalmente le da forma a sus productos. Está compuesto de tres materiales básicos: aglomerantes, polvos o arenas refractarios y estuco refractario. Cada componente tiene características y propósitos específicos para formar el molde cerámico completo.

Como ya se mencionó en el capítulo anterior la cáscara cerámica se forma al aplicar una serie de recubrimientos cerámicos al árbol o modelo. Cada recubrimiento consiste en una fina capa de cerámico rodeada al exterior con partículas de cerámico más grueso. Como primer paso en la aplicación del recubrimiento cerámico el árbol es sumergido en un baño de suspensión cerámica de la cual se extrae y se manipula para que caiga el exceso de suspensión y se forme una capa uniforme, inmediatamente la capa húmeda se recubre con el estuco, que son partículas cerámicas más gruesas, ya sea por medio de la inmersión en una cama fluidizada o por medio de un mecanismo de rocío.

Las capas de cerámico fino forman la cara interior del molde y reproducen cada detalle del modelo. Los aglomerantes proporcionan la rigidez necesaria a la estructura. El estuco sirve para impedir escurrimientos de la suspensión, prevenir fracturas, ayuda a la adhesión entre capas y ayuda a lograr el espesor adecuado rápidamente.

La mayoría de las fundiciones han desarrollado sistemas de recubrimiento cerámico específicos para sus necesidades particulares, escogiendo materiales basados en las aleaciones utilizadas, de los requerimientos dimensionales, de la calidad superficial, de la disponibilidad de estos materiales y sobre todo del precio.

Como punto de partida, se deben detallar las especificaciones de los materiales y la formulación de las suspensiones. Una vez que se ha establecido un sistema, que cumpla con las necesidades y que asegure que los materiales utilizados son óptimos y con excelente calidad, se deben establecer pruebas comparativas para mantener características únicas específicas para cada formulación de un lote.

Aglomerantes.

El primer material involucrado es el aglomerante o porción líquida de la mezcla de la suspensión. Los más usados son el sílice coloidal y los etil silicatos hidrolizados; otros aglomerantes incluyen silicatos de sodio, alúmina coloidal o circonia coloidal.

La tabla 5 muestra a los aglomerantes mencionados con sus características principales .

Aglomerantes	Características
Sílice coloidal	El sílice coloidal es el mas usado y el mas seguro de todos los aglomerantes , no es flamable y no expide gases tóxicos . Generalmente es estable , no se descompone cuando es manejado correctamente y produce uniones fuertes Los aglomerantes de sílice coloidal vienen dispersos en agua o en alcohol con un rango de concentración que va del 15 al 50 % .Un control cuidadoso del tamaño de las partículas , de la viscosidad y del pH aseguran un producto uniforme . Usualmente en el proceso del recubrimiento cerámico, se usan dos grados en el tamaño de partícula uno de 8 μ m y el otro de 14 μ m ; los dos a una concentración del 30 %
Etil silicatos	Estos aglomerantes con base en alcohol secan mucho mas rápido que el sílice coloidal , aunque son mas caros ,flamables y contaminantes : Es el mejor para aplicaciones que requieren rápidos ciclos de secado . Las suspensiones con este aglomerante son geladas por exposición a una atmósfera de amoniaco , esto permite que las inmersiones se realicen muy rápido y el secado es muy bueno debido a la alta volatilidad del alcohol.
Aglomerantes híbridos.	Fueron desarrollados para combinar las ventajas de el sílice coloidal y los etil silicatos . Los solventes utilizados en este aglomerante son menos flamables que el alcohol .
Silicato de sodio líquido	Es un aglomerante muy barato . Después de la evaporación se forma un aglomerado fuerte y vidrioso . Son malos refractarios lo cual limita su uso ; además de no resistir atmósferas de vapor utilizados en el desencerado con autoclave . A pesar de todo, han encontrado ciertas aplicaciones en combinación con otros aglomerantes .
Otros aglomerantes	El hecho de que los moldes sean cocidos a muy altas temperaturas en combinación con el reciente uso de superaleaciones muy reactivas han generado la necesidad de tener aglomerantes mas refractarios . Para este propósito se han usado la alúmina coloidal y el circonio coloidal , sin embargo estos aglomerantes poseen propiedades inferiores a la temperatura ambiente.

Tabla 5. Aglomerantes y sus principales características

Control de los aglomerantes

Las partículas de los aglomerantes están cargadas eléctricamente y tienen una área superficial grande. A través del secado o fraguado del molde, dichas partículas son forzadas a juntarse unas con otras , provocando que se forme un gel . Este proceso de deshidratación proporciona resistencia en verde al molde. Este es un proceso irreversible como consecuencia de la inestabilidad del aglomerante. Debido a lo anterior, los factores que causan esta reacción se deben evitar y se debe mantener la estabilidad del aglomerante hasta la aplicación del recubrimiento.

En la suspensión, los factores más importantes para el adecuado control del aglomerante son el pH, el contenido de SiO₂, el contenido de sólidos en el aglomerante y la temperatura de la suspensión.

1.- El pH ; Los sistemas de aglomerante pueden ser ácidos o básicos. La mayoría de los aglomerantes coloidales acuosos son básicos y su máxima estabilidad se alcanza a un pH de 10 . Los aglomerantes basados en alcohol son ácidos y su máxima estabilidad se alcanza a un pH de 2 . El pH de la suspensión puede ser determinado simple y rápidamente usando un papel indicador con un rango adecuado para el control de la suspensión ; en caso de que esté fuera de especificación tendrá que ser descartada.

Las variaciones en el pH del aglomerante indican un cambio en la naturaleza electrolítica del sistema que puede influenciar la estabilidad afectando la carga de las partículas de sílice . Si no se controla apropiadamente , la suspensión comenzará a gelatinizar , minimizando su firmeza final y su vida útil.

Los factores más comunes que influyen en el pH son :

- Adiciones de sales solubles ya sea bases o ácidas
- Presencia de álcalis en los refractarios
- Agentes humectantes y desespumantes
- Presencia de contaminantes

Como guía general todos los aditivos deben ser evaluados cuidadosamente ya que pueden traer efectos dañinos a la suspensión ; así mismo es necesario evitar las fuentes de contaminación .

2.- Contenido de sólidos en el aglomerante . Mantener un porcentaje controlado de sólidos del aglomerante en la suspensión es muy importante por dos razones . La primera es por que una concentración insuficiente de SiO₂ en el aglomerante crea una unión muy débil en el molde en verde ; y la segunda razón es que una alta concentración incrementa la frecuencia en que las partículas de SiO₂ tienen contacto, causando una prematura gelatinización de la suspensión . Los ingredientes en la suspensión deben ser añadidos en proporción a las cantidades a utilizar ya que los líquidos usados en el aglomerante se consumen mas rápido que los sólidos , lo que conduciría paulatinamente a tener una mezcla con altos contenido de sólidos.

3.- Temperatura de la suspensión . Ésta debe conservarse tan cerca como sea posible a la temperatura ambiente del lugar de trabajo, en principio por que los aglomerantes son sensibles a la temperatura y con un incremento de ésta podría ocurrir una

gelatinización prematura; asimismo, es necesario reducir la posibilidad de que se creen esfuerzos en el modelo causados por una expansión o contracción de la cera .

La temperatura se monitorea con un termómetro de inmersión parcial. Las lecturas deben ser tomadas mientras la suspensión es agitada y el termómetro está inmerso. Sumergir el termómetro en la suspensión provoca que los solventes se evaporen; esta acción tiene un efecto de enfriamiento en el termómetro lo que daría una lectura falsa.

Lo más recomendable para el manejo de la suspensión son tanques rotatorios de acero inoxidable; estos minimizan la contaminación por hierro, lo cual es importante para el control del pH y tiene buena disipación del calor a la atmósfera. Un tanque rotatorio con un aspa estacionaria proporciona una mezcla mucho mas homogénea que los agitadores mecánicos.

Refractarios

Los refractarios utilizados mas comúnmente para la realización de moldes cerámicos son el sílice, la circonia y algunos alumino- silicatos. Estos tres tipos son utilizados para la mayoría de las aplicaciones. La alúmina , utilizada en fundiciones de algunas super aleaciones, es demasiado cara y se considera innecesaria para fundiciones comerciales. Los refractarios arriba mencionados se usan tanto para la suspensión como el estuco.

Refractario	Características
Sílice	Generalmente es usado como vidrio de sílice (sílice fundido) , el cual es hecho de arena cuarzo natural fundida y solidificada a su forma de vidrio . Para aplicarla como estuco ésta tendrá que ser molida y tamizada y convertida a polvo para las suspensiones. Su coeficiente extremadamente bajo de expansión térmica proporciona la resistencia a un choque térmico del molde, es fácil de remover químicamente de lugares de la pieza fundida con difícil acceso por medio de una solución cáustica .
Circón	Se encuentra de manera natural como arena y en esta forma puede ser empleado como estuco, aunque su uso como estuco es limitado en los primeros recubrimientos ya que no tiene el grosor adecuado. También es convertido a polvo para su uso en las suspensiones , frecuentemente se combina con sílice y alumino -silicatos. Dentro de sus ventajas se encuentra su alto índice refractario , su forma de partículas redondeadas y su disponibilidad en el mercado.
Aluminio- silicato	Es un compuesto de alúmina y sílice con contenidos de alúmina que van del 42 al 72 % . Conforme aumenta al contenido de alúmina aumenta el índice de refracción . El único compuesto estable a altas temperaturas es la mullita que contiene un 72 % de alúmina . Vienen en forma de pellet los que hay que moler para los estucos o convertirlos a polvo para la suspensión.

Alúmina	Se produce por el mineral de bauxita o por el proceso Bayer . Es mas refractario que el sílice o la mullita y es menos reactivo a muchas mas aleaciones que los refractarios de silicio . Su aplicación básicamente cae en las super - aleaciones en donde se pueden aprovechar sus propiedades .
---------	---

Tabla 6. Materiales empleados en la producción de la cáscara.

Otros ingredientes.

Además de los aglomerantes y los refractarios, las suspensiones generalmente contienen agentes humectantes como el sulfonatos de sodio alquil aril , sulfatos de sodio alquil o octilfenoxi polietoxietanol para promover la humedad de los modelos o de los recubrimientos primarios . Son generalmente utilizados en una cantidad de 0.03 a 0.3 % del peso total del líquido. Algunas veces se omiten para las suspensiones con etil -silicatos y para suspensiones con base de agua.

Cuando se usan agentes humectantes, especialmente en los recubrimientos primarios, se agrega un componente anti -espumante para evitar la formación de espuma y permitir que escapen las burbujas de aire. Los anti- espumantes utilizados son emulsiones acuosas de silicio y alcoholes grasos como el n-octil y el 2- hexy etil. Dependiendo del tipo, estas formulaciones son efectivas para concentraciones entre 0.002 a 0.10 % del peso total del líquido.

Formulación de la suspensión .

El porcentaje de cerámico de las suspensiones depende de varios factores ;del tipo de polvo refractario , del tipo y concentración del aglomerante , del vehículo líquido y de la viscosidad deseada ; generalizando podemos decir que la composición de la suspensión cae dentro de los rangos mostrados en la tabla 7.

Ingredientes	Composición %
Sólidos del aglomerante	5 -10
Líquido (Añadido o del aglomerante)	15 - 30
Polvo refractario	60 - 80

Tabla 7 . Formulación básica para la elaboración de la suspensión .

La preparación de la suspensión se lleva a cabo agregando el polvo refractario al aglomerante líquido , usando suficiente agitación para romper los aglomerados y mojar y dispersar el polvo. La viscosidad inicial es muy alta debido a la presencia de aire y falta de humedad en las partículas de polvo aunque con la agitación continua

la viscosidad cae a su nivel inferior cuando está lista para usarse. Se requiere de la agitación continua para que las partículas permanezcan en suspensión.

Control de la suspensión.

Las suspensiones son complejas, deben ser mezclas minuciosamente balanceadas . Para poder funcionar adecuadamente, las suspensiones deben mantener tal balance durante todo el ciclo de producción. Usualmente, en el sistema de recubrimiento cerámico utilizado en la industria para piezas comerciales la arena en la suspensión primaria está compuesta por arena de circón con un rango en el número de grano AFS¹ de 100 a 110, generalmente aplicada con un atomizador. Una arena mas gruesa frecuentemente provoca defectos superficiales en la fundición y grietas ; de la misma forma, el uso de arena mas fina (AFS 115 - 135) provoca también agrietamientos .

Las suspensiones y estucos posteriores están compuestos de sílice fundido o alumino-silicatos . El sílice fundido como ya mencionamos presenta algunas ventajas ya que tiene un coeficiente de expansión térmica de menos de la mitad que el de los alumino-silicatos ; un volumen por unidad de peso 23 % mayor , lo que permite recubrimientos mas ligeros , una menor variabilidad y es más barato.

La aplicación de un estuco intermedio es recomendable , especialmente cuando se usan los alumino-silicatos. Un rango en el número de grano AFS de 30 a 80 en el estuco intermedio permite la construcción de una cáscara mas densa y fuerte. El estuco intermedio minimiza el potencial de derramamiento de metal en aquellas partes que tienen hoyos , radios o esquinas filosas y en su defecto de la separación de las diferentes capas de la cáscara cerámica debido a diferencias en los coeficientes de expansión de cada uno de los componentes de ésta.

Los componentes del estuco tienen una distribución de partículas mas estrecha lo que proporciona una función mejor y mas consistente . Esto es especialmente importante cuando se usan técnicas de cama de fluido para la aplicación del estuco . Las camas de fluido segregan las partículas de acuerdo a su tamaño lo que causaría una inconsistencias en el espesor , peso y permeabilidad de la cáscara .

Los atomizadores de arena se están convirtiendo en un sistema altamente popular en la aplicación del estuco, sin embargo a pesar de ser un excelente medio de aplicación, causan cierta generación de contaminación por polvo . Esto es debido a

¹ AFS, Sociedad americana de fundidores por sus siglas en ingles. El número de grano al que se hace referencia se define como el tamaño de la malla de un juego de tamices estándar por el que pasan la mayor parte de los granos .

que las partículas que no recubren la parte o componente caen al suelo y el impacto provoca que se rompan, lo que genera el polvo .

Como hemos visto el control de la suspensión es básico en la producción de la cáscara cerámica. A continuación, se presentan algunas sugerencias para optimar la resistencia para cualquier sistema de recubrimiento cerámico.¹

- Medir los ingredientes de la suspensión. No adivinar las cantidades
- Premezclar las nuevas suspensiones en un tanque separado antes de agregarlas a los tanques de producción y permitir suficiente tiempo para el adecuado humedecimiento de los refractarios
- Agregar frecuentemente pequeñas cantidades de suspensión fresca a los tanques de producción para minimizar los efectos causados por material sin humedecer . Cuando sea posible al final del día, agregar suspensión fresca y solvente para recuperar las pérdidas por evaporación.
- Asegurarse de que en el tanque de la suspensión haya un mezclado adecuado que conserve a los refractarios en una suspensión uniforme. Procurar no usar exceso de energía de mezclado y controlar que la temperatura del tanque no exceda de 3°C arriba de la temperatura ambiente.
- Controlar la viscosidad ,el pH y el contenido de sólidos del aglomerante
- Controlar la humedad relativa en un rango del 45-60 % y la temperatura con una fluctuación de ± 1.5 ° C durante el proceso de secado de la cáscara.
- Medir el módulo de ruptura y el peso de la cáscara en base a una rutina para determinar las tendencias en la resistencia.

¹ Arzt , A. M. “ Optimizing Control Shell Cracking in Investment Casting “ Modern Casting Feb 1987

2.3 . Causas y soluciones de los defectos posibles en el recubrimiento cerámico .

La obtención de moldes cerámicos adecuados en la fundición a la cera perdida requiere que exista equilibrio en ciertas condiciones que cuando sufren de alguna alteración producen defectos que se ven reflejados en las piezas finales ; los factores que provocan esta alteración son de diferente índole, podemos mencionar : errores humanos, mal funcionamiento de las máquinas, fluctuaciones en las condiciones atmosféricas, variaciones en los materiales, alteraciones en los tiempos y los métodos utilizados.

Los defectos en la fundición a la cera perdida están relacionados básicamente con el recubrimiento cerámico y difieren de alguna manera de los encontrados en otros procesos de fundición. En algunos casos estos defectos pueden ser identificados y reparados antes de la fundición, pero en la mayor parte de las ocasiones, los defectos no son detectados sino hasta el momento de obtener la pieza fundida.

Los defectos aparecen casi en cada operación de fundición y sus causas pueden ser muchas y variadas. No existe todavía la fundición perfecta ya que en toda fundición podemos encontrar defectos o aspectos a mejorar. Sin embargo, se debe buscar tener el mínimo de errores ya que estos provocan grandes pérdidas ya sea por piezas rechazadas o retrabajos que generalmente son costosos.

Podemos identificar y definir siete defectos comunes en la fundición a la cera perdida que se relacionan primordialmente con el sistema de recubrimiento cerámico, estos defectos son:

- Inclusiones
- Pandeo del recubrimiento primario
- Grietas en el recubrimiento
- Mal llenado
- Superficies ásperas
- Abultamientos
- Costras

A continuación se presenta una revisión de cada uno de estos defectos, mencionando sus causas principales y posibles soluciones .

Inclusiones .

Este defecto es generalmente no metálico, usualmente se pueden detectar como partículas incrustadas en la superficie o algunos micrómetros debajo de esta. Muchas de las inclusiones por debajo de la superficie son identificadas durante la reparación

por soldado de porosidades. En algunas ocasiones las inclusiones son causadas por el material cerámico de la cáscara, las que aparece como partículas empotradas en la pieza. Las principales causas de los defectos por inclusiones son:

- Grietas en el molde
- Mal manejo del molde
- Despostilladuras en la cáscara
- Material cerámico en los rebosaderos, en el cucharón de vaciado o en el forro del horno
- Cera reciclada inadecuadamente .

Pandeo del recubrimiento primario .

Estos defectos usualmente ocurren en superficies planas y normalmente presentan líneas de cortinillas asociadas con estos, usualmente en los bordes de la fundición . Este problema es causado por un presurgido y/o segundo recubrimiento que pasa a través de una grieta en el primer recubrimiento. La segunda suspensión se riega y se seca por debajo del primer recubrimiento causando este defecto. Aunque la grieta generalmente se sella con sumergidos posteriores , el defecto permanece provocando una superficie irregular. Las causas mas comunes de formación de grietas en el primer recubrimiento son :

- Condiciones ambientales
- Espesores diferentes en el primer recubrimiento

Grietas en el recubrimiento .

Este defecto se caracteriza por líneas de protuberancias sobre la superficie de la fundición. La longitud y el espesor de estas protuberancias se puede relacionar algunas veces con la causa de la grieta. Las causas mas comunes de las grietas en el recubrimiento se deben a malos manejos en las distintas áreas de la fundición, entre estas podemos mencionar :

- Control de proceso:
 - Composición inadecuada de la cáscara cerámica
 - Concentración inadecuada del aglomerante
 - Materiales incompatibles en la cáscara
 - Exceso de agentes anti-espumantes y humectantes
 - Tamaño de grano del estuco variable
- Sumergido :
 - Técnicas inadecuadas de sumergido
 - Tiempos de secado excesivamente largos

- Control de desencerado :
Técnicas y equipo de desencerado inapropiados
Rango lento de calentamiento en el horno
Temperatura variable en el horno
- Método de cocido
- Tiempos de secado antes de aplicar el estuco

Mal llenado

Se caracteriza por una fundición incompleta, es decir , el metal no llena completamente la cavidad del molde. Podemos identificar dos tipos; el primero es cuando la orilla del defecto apunta hacia alguna salida es decir el bebedero o los rebosaderos en este caso el defecto se debe a las malas condiciones de llenado y el segundo es cuando el defecto apunta hacia alguna cavidad interna; en este caso el defecto se debe a presiones de gas generadas dentro del molde, lo que se atribuye a mala permeabilidad en el recubrimiento cerámico, por lo que podemos decir que las causas de estos defectos son :

- Una cantidad de metal insuficiente
- Permeabilidad en el primer recubrimiento cerámico

Superficie áspera .

Este defecto es identificable como pequeñas protuberancias con un diámetro entre 0.13 mm y 0.381 mm que se encuentran distribuidas en alguna parte o en toda la superficie de fundición. Este defecto se puede atribuir a un amplio rango de inconsistencias en la cáscara. Como ejemplo mencionaremos :

- Suspensión contaminada o inestable¹
- Penetración del estuco
- Reacción del metal con el molde
- Burbujas en la primera cáscara

Abultamiento .

Un abultamiento es provocado por un movimiento interno de la cáscara mientras el metal es vaciado; éste penetra en las áreas afectadas lo cual conduce a dimensiones excesivas en la pieza final; usualmente los podemos encontrar en superficies largas y planas. Las causas del abultamiento las podemos dividir en dos áreas distintas, La primera es aquella que se presenta en superficies planas, y podemos menciona:

¹ De acuerdo a lo mencionado anteriormente la estabilidad o equilibrio de una suspensión depende de factores como el pH, el contenido de sólidos del aglomerante, la temperatura de la suspensión y la humedad relativa del ambiente.

- Mala adherencia entre la cera y el primer recubrimiento
- El diseño y la orientación del árbol
- Distribución del estuco
- Coeficientes de expansión diferentes entre los componentes de la cáscara
- Esfuerzos residuales en la cera

El segundo tipo de abultamientos se asocia con áreas del modelo que por su forma no permiten que se forme una cáscara consistente; normalmente está asociada con penetración del metal . su causa principal es:

- Construcción inapropiada de la cáscara

Escurrimientos

Un escurrimiento es depósito áspero de metal en algún área de la superficie de la fundición. Un escurrimiento es un caso extremo de un abultamiento. Ocurre cuando alguna sección del molde se rompe y el metal se escapa por esta; dentro de sus causas podemos encontrar:

- Delaminación¹ de los primeros recubrimientos
- Condiciones de secado
- Composición de la cáscara.

Una vez que se identificaron y analizaron los defectos que tiene una fundición estos nos deben guiar a una corrección en los materiales utilizados, las técnicas del proceso o la composición de la cáscara. En la Tabla 8 se encuentra una guía rápida con las principales causas de los defectos relacionados con el recubrimiento cerámico y acciones sugeridas para remediarlos .

¹ Fragmentación de las capas sucesivas del recubrimiento.

DEFECTO	CAUSA	SOLUCIÓN
Inclusiones	Grietas en el molde	Remediar el defecto
	Manejo del molde	Técnicas del proceso
	Descarapelados	Remediar el defecto
Pandeos en el recubrimiento primario	Condiciones ambientales	Velocidad de aire
		Control de la temperatura
		Control de la fluctuación de la humedad
	Espesores diferentes en el recubrimiento primario	Control de la viscosidad
Grietas en el recubrimiento	Técnicas de sumergido	Fluctuaciones ambientales
	Control del proceso	Pruebas a la suspensión (densidad , pH , % SiO ₂)
		Agentes humectantes
		Estandarizar el ciclo
	Cocido	Control (Rango, tiempo, temperatura, O ₂)
	Secado antes del estuco	Tiempo en el ciclo de secado
	Cera desestabilizada	Balance con la temperatura
Mal llenado	Permeabilidad	Distribución del refractario
		Numero de recubrimientos primarios
		Viscosidad
Superficie áspera	Suspensión inconsistente	Control de la suspensión
	Penetración del estuco	Viscosidad
	Reacción Metal- Molde	Verificar la compatibilidad con la aleación utilizada
		Evitar la presencia de Fe en los componentes
	Burbujas en la suspensión	Salidas de aire
		Anti -espumantes Mezclado de la suspensión
Abultamientos	Líneas de limpieza del modelo	Limpiadores agresivos
	Orientación del árbol	Perpendicular a la suspensión
	Distribución del estuco	Control del proceso y composición de la cáscara
	Expansión diferencial	Composición de la cáscara
	Esfuerzos en la cera	Edad de los modelos
	Construcción de la cáscara	Soplado de los modelos antes de sumergirlos
Costras	Condiciones de secado	Condiciones ambientales
	Composición de la cáscara	Construcción de la tercera capa

Tabla 8¹ Defectos en el recubrimiento cerámico

¹ Twarog, D.L. " Causes and Cures for Shell - Related Defects " . Modern Casting . Ago. 1990

Existen muchas formas para prevenir estos defectos, sin embargo las causas principales que los provocan caen dentro de las siguientes categorías: Composición de la suspensión, condiciones de secado, técnicas de desencerado y cocido y preparación del árbol.

1.- Composición de la suspensión: Un mantenimiento constante de la suspensión es la clave para obtener excelentes propiedades, este mantenimiento incluye el balance de las partículas sólidas del aglomerante, el contenido total de sólidos y las cantidades de aditivos. No mantener el porcentaje fijado de partículas de sílice puede conducir a inconsistencia en la resistencia de la cáscara en verde y cocida, ya que un alto porcentaje de sílice puede causar una resistencia inferior en la cáscara .

Los principales aditivos que conllevan a cáscaras débiles son los agentes humectantes, los anti- espumantes y el agua. Generalmente, existe un exceso en el uso de agentes humectantes y anti-espumantes ya que estos en pequeñas cantidades pueden provocar una reducción en la resistencia de la cáscara; así mismo el uso de agua no destilada puede provocar una desestabilización y gelación de la suspensión.

2.- Condiciones de secado. Las condiciones de secado en las primeras capas de recubrimiento representan la mayor causa de defectos. Los primeros sumergidos en la suspensión proveen del recubrimiento refractario necesario para resistir la reacción metal-molde y los siguientes proporcionan la firmeza que sistema requiere para soportar las cargas relacionadas con el manejo del molde y vaciado.

Se debe tener un control cuidadoso con la velocidad del aire. Una velocidad de aire inapropiada evaporará el agua contenida en el aglomerante coloidal , lo que causaría que la delgada capa cerámica se contraiga demasiado rápido alrededor del árbol de cera. Asimismo velocidades variables de aire alrededor del árbol provocarán secados y contracciones variables en la cáscara.

Las fluctuaciones de temperatura y humedad arriba de ± 1.5 °C y ± 5 %, respectivamente, pueden provocar tensión en la delgada cáscara primaria, lo que conduciría posteriormente a grietas, descarapelados y pandeos en el recubrimiento cerámico.

3.- Técnicas de desencerado y cocido. El error mas común en el uso de autoclaves u hornos para el desencerado se encuentra en el periodo de tiempo entre el último sumergido y el desencerado. Mientras las capas de cerámico se construyen el agua se evapora y la cáscara se seca. Desafortunadamente , la cáscara absorbe mas agua de la que se evapora al aire; esto provoca una indicación falsa de secado. Si la cáscara

contiene humedad en el momento de entrar al ciclo de desencerado aumentan enormemente las posibilidades de agrietamientos .

Otro error grave es el de sobrecargar los lotes de desencerado. Un uso eficiente del autoclave para piezas relativamente pequeñas requiere una presión de 400 kPa con un tiempo de 6 a 8 segundos a una temperatura de 180 °C; sin embargo cuando el área superficial de la cáscara aumenta se requiere de mayor número de Joules para calentar la carga total, entonces tendrán que aumentar los parámetros anteriormente mencionados.

De la misma manera, sobrecargar los hornos de desencerado provoca mayores inconveniencias ; en ambos casos dependiendo del sistema y de su capacidad, se deben realizar pruebas suficientes para determinar las condiciones óptimas de operación del equipo utilizado.

Por último en el cocido , la cáscara debe curarse por 30 minutos a una temperatura de 900 °C para asegurar que la resistencia de la cáscara se maximice y remover la cera remanente. Adicionalmente a los requerimientos de tiempo y temperatura, se debe considerar el suministro de un exceso de oxígeno dentro del molde con el propósito de que se combine con el carbono contenido en la cera formando CO₂ y facilitar su evacuación; de no ser así la cera permanente provocará defectos en la pieza . La causa principal de esta falla también se le atribuye a un sobrecargado del horno.

4.- Preparación del árbol. Una mala preparación del árbol puede provocar un variado número de defectos, podemos subdividir las causas en tres categorías :

- Espaciamiento: Debido a que la cáscara necesita espacio para formarse se debe procurar un espaciamiento necesario para la obtención de una cáscara uniforme.
- Diseño del sistema de alimentación: El sistema debe garantizar un flujo apropiado y gradientes de temperatura controlados .
- Orientación de las piezas: Es muy importante que el árbol tenga una capacidad uniforme de escurrido para lograr obtener espesores uniformes, así como procurar una buena orientación de las piezas que garantice el soporte adecuado en el vaciado del metal.

2.4. Control de calidad en los materiales .

La perspectiva que se tiene de la industria de fundición a la cera perdida nos muestra que el 30 % de la producción son aleaciones ferrosas que incluyen aceros inoxidable, aceros aleados y aceros para herramientas. Un 55 % lo ocupan aleaciones no ferrosas que básicamente son tres, las aleaciones de aluminio con un 20 % , las super-aleaciones níquel-cobalto con las que se fabrican álabes de turbina con un 20 % y las aleaciones de cobre con un 15 %. El 15 % restante se divide en otras aleaciones entre las que podemos mencionar a las llamadas super -aleaciones que han encontrado un amplio campo de aplicación en éste método de fundición .

Sin embargo la fundición artesanal básicamente esta compuesta de aleaciones de cobre como el bronce y el latón ; en menor medida el pewter y en ocasiones especiales el oro y la plata. Nos enfocaremos primordialmente al estudio de las aleaciones del cobre por ser este el que comprende mas del 90 % de la producción total.

Las aplicaciones estéticas que ha tenido las aleaciones de cobre en trabajos artísticos, musicales y ornamentales se deben a su excelente resistencia a la corrosión , su facilidad de fundición y su variedad de colores. Las estatuas de bronce se funden en una aleación bronce al silicio por tener ésta muy buena fluidez y estar casi libre de corrosión y sumando la aplicación de la patina adherente se reduce aun mas la velocidad de corrosión.

De la misma manera, los latones amarillos y los latones amarillos con plomo son utilizados para decoración interna y externa. Las campanas para iglesia usualmente se funden en aleaciones cobre-estaño con un contenido alrededor de 19 % de Sn, con lo que se alcanza la obtención de mejores tonos.

Un completo rango de colores del rojo al bronce y del oro al amarillo plateado o plateado se puede obtener ajustando la composición de la aleación . Los artistas pueden tomar ventaja de esta combinación de colores para producir fundiciones ornamentales con aleaciones como los latones rojos; los latones amarillos y los latones al níquel (también llamados plata alemana).

A continuación presentamos una tabla con las aleaciones de cobre mencionadas, su designación en el sistema numérico AFS, su composición en porcentajes y otra tabla con los rangos de temperatura de vaciado recomendados por la Sociedad Americana de Fundidores (AFS).

Tipo de aleación	No. UNS	Cu	Sn	Pb	Zn	Ni	Fe	Al	Mn	Si	Otro
Latón Amarillo	C85200	72	1	3	24						
	C85400	67	1	3	29						
	C85700	61	1	1	37						
	C85800	62	1	1	36						
	C87900	65			34					1	
Bronces al níquel	C97300	57	2	9	20	12					
	C97600	64	4	4	8	20					
	C97800	66	5	2	2	25					
Broces al silíce	C87300	95							1	4	
	C87600	91			5					4	
	C87610	92			4					4	
	C87800	82			14					4	
Copro-níquel	C96200	87				10	1.5		1		1 Nb
	C96400	66				30.5	0.5		1		1-Nb
Latones al plomo	C83450	88	2.5	2	6.5	1					
	C83600	85	5	5	5						
	C83800	83	4	6	7						
	C84400	81	3	7	9						
	C84800	76	2.5	6.5	15						

Tabla 9 . Aleaciones de cobre

Tipo de aleación	No. UNS	Temperaturas de vaciado (° C)
Latón Amarillo	C85200	1095-1150
	C85400	1065-1150
	C85800	1150-1175
	C87900	1150-1175
Bronces al níquel	C97300	1205-1225
	C97600	1260-1425
	C97800	1315-1425
Broces al silíce	C87300	1095-1175
	C87600	1095-1175
	C87610	1095-1175
Cupro - níquel	C96200	1315-1370
	C96400	1370-1480
Latones al plomo	C83450	1175-1290
	C83600	1150-1290
	C83800	1150-1260
	C84400	1150-1260
	C84800	1150-1260

Tabla 10 . Temperaturas de vaciado recomendadas

La calidad de una pieza fundida está en relación con la calidad del metal con que se hace y con las imperfecciones físicas que contiene . La calidad del metal depende de la composición e impurezas y de la microestructura que está influida por la composición y por la velocidad de enfriamiento.

El control de calidad debe comenzar desde la compra de materia prima, si se trata de un lingote de recuperación, se deberá comprar de acuerdo con la especificación , a ser posible con la de una norma que establezca los límites de composición de los elementos principales y los límites superiores de impurezas nocivas. Al proveedor deberá exigírsele un certificado de análisis de cada partida que comprenda los elementos principales y las impurezas; análisis que deberá de ser comprobados de forma periódica por el fundidor. En caso de que se empleen materiales vírgenes, también se deberá comprobar periódicamente su composición.

CAPÍTULO 3

El futuro de la fundición a la cera perdida en la industria

El futuro de la fundición a la cera perdida a pesar de su pasado milenario presenta grandes oportunidades de desarrollo, la combinación del método con tecnologías, como sistemas de transporte, almacenamiento y proceso automatizados, el uso del CAD/CAM, la facilidad de fundición de las superaleaciones y la combinación del método con la producción de prototipos rápidos han permitido tener una visión optimista del día de mañana.

Actualmente podemos decir que el mercado de la industria de la fundición a la cera perdida lo comprenden cuatro grandes campos en donde ha encontrado mayor aplicación. Uno de estos campos es la industria aeroespacial, en donde representa el 26 % del total de las piezas producidas por este método basándose en el tonelaje y cerca del 60 % con base en su valor en dólares; aunque debido a los estándares manejados menos del 10 % de la fundidoras le venden a la industria areoespacial.

En la industria automotriz existen pocas piezas fabricadas por este sistema de fundición, podemos mencionar como ejemplos anillos de pistón para motores Diesel, ruedas de la turbina de entrada de los turbocargadores de camionetas y automóviles y cámaras de precombustión para motores diesel. Las proyecciones mundiales para este mercado pronostican un crecimiento en un rango superior a las 50, 000 toneladas, para finales de los noventa.

Otro campo importante es el de las válvulas y el de accesorios para bombas y compresores, que representa el mas grande en tonelaje. El incremento en el uso de válvulas hidráulicas y de bola debido a la expansión en el tratamiento de aguas residuales y en los sistemas de irrigación ha generado el diseño y rediseño de válvulas mas complicadas que han aumentado la demanda de la utilización de la fundición a la cera perdida. De la misma manera, se tiene proyectado una demanda de la industria petrolera y de refinación y en equipo de gasificación para el suministro tanto de válvulas como de bombas y compresores.

Por último mencionaremos a la industria de herramental en donde las máquinas de altas revoluciones y maquinaria especial para la industria representa un importante mercado en crecimiento para la producción de piezas en máquinas herramientas, y equipo para el refinado del petróleo, fabricación de hule y llantas.

Otros mercados en creciente demanda son las herramientas de mano, armas pequeñas, equipo médico y dental, electrónicos, equipo de oficina y partes para motor eléctrico; La producción de prótesis mediante este método puede verse

amenazada por la introducción de materiales compuestos para implantes de cadera y rodilla y en el uso de barras y platos para reparar fracturas ; sin embargo en la actualidad se siguen usando implantes hechos principalmente de tres aleaciones acero inoxidable 316, Vitalium (aleación de cobalto , cromo y molibdeno) y aleaciones Ti-Al- V. Finalmente el uso de fundiciones de acero , cobre y aluminio en la industria de computación puede verse incrementada hasta en un 8 %¹.

La información al alcance de la situación actual de la industria no es mucha sin embargo, las encuestas realizadas en la década de los ochenta en comparación con información generada a principios de esta década, nos permite observar la tendencia en los países mas industrializados.

	1982	1988	1991
Inglaterra			
Ganancias en millones de dólares	105	250	290
Fundidoras	49	55	60
Empleados	5000	6000	6500
Fundiciones comerciales	33%	30%	30%
Fundiciones aerospaciales	67%	70%	70%
Estados Unidos			
Ganancias en millones de dólares	800	120	1300
Fundidoras	240	400	350
Empleados	23000	27000	30000
Fundiciones comerciales	50%	40%	40%
Fundiciones aerospaciales	50%	60%	60%
Japón			
Ganancias en millones de dólares	50	190	235
Fundidoras	35	65	70
Empleados	3500	6500	7000
Fundiciones comerciales	90%	80%	80%
Fundiciones aerospaciales	10%	20%	20%
Europa Occidental (exceptuando Inglaterra)			
Ganancias en millones de dólares	120	250	330
Fundidoras	60	80	80
Empleados	6000	6500	7500
Fundiciones comerciales	45%	40%	45%
Fundiciones aerospaciales	55%	60%	55%

Tabla 11. Cuadro comparativo del desarrollo de la industria de fundición a la cera perdida ².

¹ Burditt M.F. " Investment Casting's Future Soars " Modern Casting . Oct . 1988

² Williams R.B. " 22nd European Conference on Investment Casting " Abr. 1992

3.1. Fundiciones automatizadas

Gran parte de los procedimientos utilizados en la actualidad por la mayor parte de la industria de fundición a la cera perdida son extremadamente laboriosos , sin embargo esto puede cambiar en un futuro no muy lejano. Día con día son mas las empresas que utilizan tecnologías como el ensamblaje del modelo por medio de rayos láser o procesos de producción automatizados .

La etapa de fabricación del modelo en cera es y probablemente seguirá siendo la parte mas laboriosa del proceso. Aunque con la tecnología actual es posible mecanizar totalmente la producción de ciertos modelos de cera, habrá casos en los que la complejidad del modelo exija cierta labor manual especialmente en el ensamblaje de arboles.

Las técnicas desarrolladas de soldadura por medio de rayo láser de CO₂ tienen la capacidad de producir uniones mas fuertes y uniformes con mejor calidad superficial. El método consiste en dirigir el rayo láser directamente a la superficie de unión. La cera que queda expuesta al rayo se calienta por la absorción de la energía del láser y con la apropiada selección de la intensidad del rayo y la velocidad del soldado se puede lograr obtener el espesor de soldado requerido así como una buena calidad superficial.

Este método requiere la utilización de un proceso automático que cubra las necesidades de exactitud y precisión en los movimientos para poder soldar efectivamente y una excelente preparación de las uniones en los modelos ya que cualquier hueco en la unión provocará que la cera derretida caiga y dañe alguna otra parte del modelo.

Asimismo se deben tomar algunas precauciones de seguridad en la utilización del láser. Hasta el láser mas pequeño puede emitir concentraciones peligrosas de energía. Una ventaja en la utilización de un láser de CO₂ es que tanto el vidrio como el plástico son opacos a la longitud de onda de dichos rayos por lo que con el uso de anteojos de seguridad protegemos los ojos de los trabajadores. Aunque la intensidad del rayo usado para derretir cera es suficiente para causar leves daños en la piel , la intensidad cerca de la fuente es suficiente para causar quemaduras; por lo que se recomienda mantenerse lejos de su alcance.

Dentro de los parámetros mas complicados de estimar el la utilización del láser es la velocidad de soldadura. la velocidad máxima dependerá del espesor del segmento y los tiempos de enfriamiento requeridos en la reposición del modelo para prevenir un

flujo de cera. El rayo láser calienta solamente la superficie directamente y el material interior se derrite por conducción del calor.

En caso de usar el calentamiento con láser o no, un cuarto¹ de cera totalmente automatizado típico incluye estaciones de ensamblaje del árbol provistas con bandejas de modelos de cera con carruseles verticales, en donde las bandejas son cargadas manual o automáticamente por brazos de robot con los modelos de cera provenientes de la máquina de inyección ; son transportadas a los carruseles por bandas transportadoras en donde son indexados y mandados a los lugares vacantes del carrusel. Las operaciones en el carrusel son controladas manualmente o por robots ensambladores automáticamente sincronizados .

La necesidad de que el curado del molde cerámico que recubre a los arboles de cera se realice en una atmósfera controlada de temperatura y humedad nos conduce a la utilización del control por medio de computadoras. Un sistema de almacenaje automático y sistema de recuperación AS/RS por sus siglas en ingles (automatic storage and retrieval system); con procesos bien establecidos, puede ser de mucha utilidad para controlar el tiempo, la temperatura y el nivel de humedad , proporcionando el control necesario para una fundición continua . Los beneficios que se pueden obtener de un AS/RS son:

- Mejor acceso al trabajo en proceso
- Almacenaje de partes pequeñas listas para usarse, permitiendo una inmediata y exacta recuperación.
- El almacenaje se vuelve parte integral del proceso de manufactura .
- Un uso mas eficiente del espacio de la planta
- Manejo de inventarios con cero errores .

Así mismo el AS/RS puede ser conectado a bandas transportadoras que trasladen los arboles de cera recubiertos a la etapa del desencerado o al horno de cocido. El sistema de codificación permite identificar diferentes tipos de fundiciones producidas al mismo tiempo ya que la información que lleva el sistema de transportación puede ser leída por un controlador central que discrimine cada cáscara cerámica a su unidad de vaciado correspondiente.

Un sistema de monitoreo de mantenimiento programado integrado a dicho sistema puede evitar paros innecesarios , proporcionando un diagnóstico rápido de fallas con el que se puede obtener información como el tipo de falla, la localización y la manera de remediarla.

¹ Taller dedicado a la fabricación de los modelos de cera .

3.2 . Diseño asistido por computadora .

A pesar de que por el proceso de fundición a la cera perdida es usado para la producción de piezas con un alto costo como son partes de motores para avión o componentes para turbinas de gas industriales, el método de prueba y error ha sido su principal fuente de desarrollo. Esto conlleva a una labor excesiva, un desperdicio de materiales y grandes ciclos de tiempo .

Por ejemplo , el desarrollo de un nuevo proceso para estructurar una fundición a la cera perdida puede tomar mas de cuatro años y el mercado exige cada día la reducción de costos y de ciclos de tiempo. En gran medida, esta es la razón por lo que el uso del Diseño asistido por computadora se ha vuelto una herramienta indispensable para sobrevivir en el mercado.

El modelado por computadora permite visualizar en la pantalla de computadora los fenómenos ocurridos detrás del proceso para un mejor entendimiento de que es lo que pasa o podría pasar; se pueden observar las diferentes alternativas antes de llevarlas a la línea de producción. Además de ayudarnos a reducir los desperdicios en la fundición y los ciclos de tiempo , el diseño por computadora es una alternativa ecológica para la realización de pruebas .

Esta tecnología de proceso -modelado ha estado en continuo desarrollo desde los años ochenta cuando se realizaron los primeros intentos por compañías de aeropropulsión quienes fueron los pioneros, pero debido a las limitaciones de aquel entonces tanto en software como en hardware los resultados obtenidos resultaban no prácticos. El reciente desarrollo en software y de las estaciones de trabajo han hecho de esta tecnología técnica y económicamente factible . Las empresas y organismos involucrados en el desarrollo de esta tecnología son:

- Investment Casting Corporate Arrangement
- National Institute of Standards and Technology's Consortium on Casting of Aerospace Alloys
- CASTNET un consorcio fundado por la NASA
- Sandia National Laboratories

Esta tecnología se basa en el uso del análisis por el método de elemento finito para incrementar la eficiencia del proceso y del sistema de vaciado. El modelo de elemento finito se puede construir con preprocesadores como Patran e Hipermesh. El modelo debe considerar las condiciones iniciales y de frontera; como condiciones iniciales podemos tomar a la temperatura del metal fundido y la temperatura de precalentamiento del molde y las condiciones de frontera la radiación sufrida en el transporte del horno de precalentamiento al horno de fundición.

Un código de análisis de elemento finito como el Pro-CAST se puede usar para resolver el modelo . Se pueden realizar cálculos de transferencia de calor para predecir la no-uniformidad en la distribución de temperatura antes del vaciado debido a las pérdidas por radiación durante la transportación del molde de precalentamiento al horno de vaciado.

Para resolver el sistema durante el vaciado se tiene que tomar en cuenta tanto la transferencia de calor como las condiciones de flujo en el llenado. Después del llenado se pueden realizar análisis de transferencia de calor para predecir el enfriamiento. Todo esto en conjunto nos dará el esquema básico para pronosticar defectos en las fundiciones debidos a rechupes, localizar microporosidades y eficientar el sistema de alimentación.

La predicción de defectos por el método de análisis de elemento finito es una predicción de los valores esperados, es decir, se basa solamente en las expectativas y no en las variaciones del proceso de manufactura. Es importante combinar este método con información estadística experimental que pueda proporcionar datos sobre las variaciones que se pueden presentar en el proceso y de esta manera llegar a una toma de decisiones mas acorde con la realidad.

3.3 . Prototipos rápidos

Los altos costos generados en la producción y el maquinado del modelo en cera han motivado el uso de un grupo de técnicas llamadas Prototipos Rápidos, las cuales pueden producir directamente el modelo en cera o en algún otro sustituto o inclusive construir directamente la cáscara cerámica. Estas técnicas requieren el soporte de un sistema CAD que genere los modelos ya sea como sólidos o como superficies. Generalizado es posible considerar que estos métodos construyen los modelos o moldes añadiendo una capa de material sobre la otra.

Entre las técnicas para la producción de modelos, la mas utilizada es la Estereolitografía, la cual está basada en un fluido polimérico sensitivo a la luz y un sofisticado rayo láser; sin embargo la idea básica es muy simple. En la máquina existe un recipiente que contiene el fluido polimérico , acoplado a un plato que puede subir o bajar. El plato se mueve hasta casi alcanzar la superficie dejando una delgada capa de fluido, los modelos CAD son cortados en muchas rebanadas horizontales con espesores en un rango de 0.125 a 0.75 mm. El láser se mueve trazando la figura de la primera capa en la delgada capa de fluido polimérico , en el momento en que el láser toca el fluido éste se estabiliza y se convierte en sólido . Una vez en que la primera capa se ha formado el plato se mueve hacia abajo permitien o que una nueva capa de fluido se forme sobre la parte solidificada para repetir el proceso. La esterolitografia produce partes altamente complicadas , algunas de las cuales sería imposible de realizar por métodos convencionales de manufactura .

Otro método utilizado es el Sinterizado Láser Selectivo, SLS por sus siglas en ingles (Selective Laser Sintering), que es similar a la Estereolitografia , la diferencia es que este método utiliza polvo en lugar de fluido polimérico. La máquina SLS genera una delgada capa de polvo polimérico y el láser sinteriza el polvo mientras traza la sección. Después de haber completado la primera sección se aplica otra nueva capa de polvo que es sinterizada sobre la capa anterior, el proceso se repite hasta haber terminado el modelo. El polvo que permanece intacto por la acción del láser actúa como un soporte de la parte sinterizada y es retirado cuando se completa el modelo. Un amplio rango de polímeros , incluyendo policarbonatos, PVC y nylon o las ceras utilizadas en el proceso convencional pueden funcionar con esta técnica.

Por último una alternativa mas a los métodos mencionados anteriormente para la producción de modelos es el Modelado Por Deposición Fundida o FDM (Fused Deposition Modelling). En este caso la máquina tiene un pequeño cabezal que extruye a través de una boquilla muy fina ya sea plástico liquido similar al nylon o

cera de fundición. Se aplican capas, ya sea de un material o del otro hasta obtener el modelo final.

Dentro de los métodos utilizados para la generación de moldes cerámicos podemos mencionar a la Producción Directa de Cáscara para Fundición, DSPC por sus siglas en inglés (Direct Shell Production Casting). Este método permite al fundidor producir moldes cerámicos para partes metálicas directamente de modelos creados en una pantalla de computadora por medio del diseño asistido por computadora (CAD).

La máquina DSPC convierte una representación visual en CAD a un objeto físico usando un proceso similar a la impresión por inyección de tinta. Los objetos en tercera dimensión creados en la computadora son construidos en base a capas delgadas. Primeramente una capa de polvo se distribuye por un mecanismo de rodillo, inmediatamente un cabezal de impresión, incorporando una o más boquillas similares a la usadas en las impresoras de inyección de tinta, se mueve a través de la capa depositando líquido aglomerante en las regiones correspondientes a la sección transversal de la geometría de la parte. El aglomerante penetra en los poros entre las partículas de polvo y provoca que se adhieran unas con otras .

Los materiales cerámicos y los aglomerantes son muy parecidos a los utilizados por el sistema convencional; esta técnica puede fabricar cáscaras cerámicas con corazones integrados. Cualquier metal puede ser vaciado en estas cáscaras para la producción de partes funcionales; el método ha sido probado en aleaciones como Cobalto -Cromo e Inconel.

El aparato utilizado para crear las cáscaras incluye un cilindro contenedor del polvo. Este cilindro está acoplado a un pistón que puede ser desplazado hacia abajo en pequeños incrementos controlados por computadora. Pequeñas cantidades de polvo son liberadas de un contenedor arriba del pistón y depositadas sobre la cáscara al ras del borde del cilindro; posteriormente, un rodillo se mueve alrededor del cilindro distribuyendo el polvo en una capa delgada.

Una vez distribuido el polvo, el cabezal de impresión cargado de aglomerante líquido se mueve a través de la superficie del polvo en una trayectoria de acuerdo al modelo generado por el sistema CAD. Las boquillas de inyección rocían continuamente pequeñas gotas de aglomerante a la superficie del polvo. La aplicación de un voltaje en los electrodos por debajo de las boquillas provoca que las gotas se carguen eléctricamente y sean desviadas a un contenedor antes de tocar el polvo. El voltaje de los electrodos es variado por la computadora para que el

depósito del aglomerante sea en puntos específicos correspondientes a la sección transversal del modelo.

El proceso de distribución de polvo e impresión se repite para cada sección transversal del objeto hasta que ha sido construida en su totalidad la geometría completa. Una vez construidas las cáscaras son horneadas para incrementar su resistencia. Finalmente, el polvo no aglomerado se remueve por medio de un cepillado o sacudido.

Dentro de las ventajas que presenta el DSPC podemos mencionar:

- Diseño de partes sin restricciones geométricas
- Creación de partes funcionales en cualquier aleación en un periodo de días
- Ahorro en tiempo y recursos en comparación al sistema convencional.

Este método promete reducir el tiempo y esfuerzo requerido para fabricar piezas metálicas por medio de métodos convencionales de fundición a la cera perdida. Con el DSPC se eliminan varios pasos del sistema convencional, incluyendo la manufactura de corazones, la fabricación del modelo en cera, el ensamblaje del árbol, la elaboración de la cáscara cerámica y el desencerado.

Este sistema es relativamente nuevo y todavía está en desarrollo sin embargo ha sido utilizado por compañías como United Technologies - Pratt & Whitney , Johnson & Johnson y Sandia National Laboratories.

3.4 . Nuevas tecnologías .

La tecnología de la fundición a la cera perdida ha sido el punto de partida para el desarrollo de nuevos métodos de fundición. Este es el caso de la fundición a la espuma perdida; un método utilizado hace apenas muy pocas décadas y que si bien presenta inconvenientes tecnológicos hoy en día para la creación de piezas artísticas con bajos volúmenes de producción, tal vez en el futuro encuentre nuevos desarrollos que lo hagan factible, de cualquier manera es necesario tenerlo a la vista y conocer sus bases.

La alternativa que presenta el proceso de fundición a la espuma perdida con respecto a otros procesos de manufactura incluyendo a las demás técnicas de fundición, ha sido ampliamente discutida y nos conduce a un gran número de opiniones dentro de las cuales habrá algunas que sean totalmente negativas. Sin embargo éste se ha venido usando exitosamente desde la década de los ochentas tanto en Europa como en los Estados Unidos y Japón.

La fundición a la espuma perdida es una técnica que remonta sus orígenes a la mitad de los años cuarenta, pero no fue hasta los cincuentas cuando se expidieron las patentes originales. El proceso comenzó su desarrollo cuando el poliestireno expandible estuvo al alcance comercialmente; se comenzó a fabricar en grandes bloques que podían ser cortados y moldeados como la madera aunque con un acabado final inferior.

Las fundidoras vieron las ventajas que tendría el proceso para producir modelos de fundiciones muy largas con poliestireno expandible en lugar de madera. Fue entonces cuando surgió el proceso llamado de molde lleno ; en este proceso se rodeaba el modelo con arena mezclada con un aglomerante de resina que se endurecía para formar un molde de arena rígida. El metal que usualmente se empleaba era hierro gris, se vaciaba en el modelo de poliestireno expandible que se vaporizaba para dar lugar a que el metal tomara su forma. El proceso de molde lleno se sigue usando para producir piezas únicas de fundiciones grandes.¹

Unos años después del proceso original surgió un nuevo desarrollo. En éste proceso el modelo se colocaba en un tambo de acero en el cual se vaciaba arena sílica sin aglomerante, el tambo se hacia vibrar o se golpeaba la arena con un martillo para consolidarla, entonces se vaciaba el metal, a este proceso se le dio el nombre de fundición a la espuma perdida.²

¹ Proceso patentado por H.F. Shroyer . US Patent 2,830,343 1958

² Proceso patentado por T.R. Smith . US Patent 3,157,924 1964

Hoy en día podemos resumir las etapas del proceso de fundición a la espuma perdida de la siguiente manera :

1.- Producción del modelo. En esta etapa la materia prima que son pequeñas perlas esféricas de poliestireno con un elemento expansor, usualmente pentano, y de un tamaño previamente seleccionado se pre-expanden a una determinada densidad, generalmente en un rango de 20 a 25 kg / m³ calentándolas por medio de vapor a una temperatura alrededor de los 100 °C .

Las perlas expandidas se introducen en una cavidad formada por un dado separable de aluminio el cual es calentado por vapor para el expandido total y fusión de las perlas. Después, el dado se enfría por medio de un rocío con agua y el modelo es extraído .

2.- Ensamble del modelo: Si los modelos son de formas complejas de tal manera que no puedan ser moldeados de una sola pieza, se tiene la opción de ensamblar dos o mas piezas moldeadas por medio de pegamento.

Cuando los modelos son grandes, la fundición se realiza individualmente, pero cuando las piezas son pequeñas se ensamblan varias de estas a un alimentador para dar paso a la formación de arboles o arreglos .

3.- Recubrimiento del modelo: El árbol o la pieza según sea el caso se sumergen en una pintura refractaria la cual produce un recubrimiento por toda la superficie que generalmente tiene un espesor de 3 a 5 mm .

4.- Colocación del árbol en la arena: El árbol se introduce en un tambo de acero y se cubre con arena sílica seca , posteriormente, se somete a vibración para que la arena llene los huecos del modelo y se compacte a su alrededor.

5.- Vaciado: El metal se vacía en el árbol , el modelo se derrite y se vaporiza para dar paso al metal que toma su forma. Una vez que la fundición se enfría se extrae de la arena que es reutilizada después de una etapa de enfriamiento y de limpieza .

El proceso de fundición a la espuma perdida ha sido utilizado por empresas como Ford , General Motors, Fiat, Teksid, OMC, Citroen, HNH Limited, Dong Kuk, Morikawa, etc; en países como Estados Unidos, Inglaterra, Italia, Francia, Corea y Japón para la fabricación de diversas piezas entre las que podemos mencionar ; múltiples de admisión, cabezas de cilindros , diversos componentes para motores , intercambiadores de calor, componentes de válvulas, carcazas para bombas y adaptadores para tubos. Los metales hasta el momento utilizados para fundiciones con este proceso son el aluminio y el hierro.

La experiencia de estas compañías con el proceso ha mostrado que este tiene algunas ventajas con respecto a otros métodos de manufactura; dentro de las cuales podemos mencionar :

1.-Libertad en el diseño, que es prácticamente ilimitada. Se puede crear casi cualquier figura , de hecho muchas piezas de fundición que se producen hoy por este método no pueden ser producidas económicamente por cualquier otra técnica de fundición.

2.-Una flexibilidad en la configuración de la fundición que no está disponible en cualquier otro proceso de fundición. Esta flexibilidad incluye espesores de fundición muy delgados (abajo 3 mm de espesor) , piezas curvadas y con paredes de espesor variables, agujeros ciegos y pasajes de tamaño variable.

3.-Se pueden añadir fácilmente insertos de otro material (con roscas interiores o exteriores u otras figuras especiales) a los modelos. Los agujeros para los insertos de metal pueden ser moldeados a taladrados en los modelos de espuma.

4.- Se pueden reducir grandemente los costos y el tiempo en el desarrollo de prototipos de fundición debido a la facilidad de producir modelos experimentales des bloques prefabricados o retrabajando modelos existentes por corte, taladrado, maquinado, pegado, etc.

5.-La producción de partes complejas en cantidades industriales puede tener costos muy competitivos. Asimismo se pueden tener fundidoras completamente automatizadas.

6.- Los corazones requeridos para fundiciones muy complejas ya no se necesitan . Esto representa un gran ahorro.

7.- La superficie de la fundición a la espuma perdida es generalmente muy aceptable para la mayoría de las aplicaciones gracias al desarrollo de extremadamente pequeñas perlas de poliestireno expandible (tamaño T), usadas hoy en día para producir modelos. Estas minimizan la textura “perlada” de los modelos de espuma y en su momento de la fundición.

8.- Se eliminan las líneas de partición y los costos inherentes a desaparecerlas debido a que es un modelo de una sola pieza .

9.- Los costos de maquinado se minimizan o en muchos casos se eliminan por las extremas tolerancias que se producen mediante este proceso. Los agujeros pueden ser fundidos de modo que requieran un mínimo o nada de taladrado. Inclusive roscas

gruesas o dientes de engrane pueden ser incorporados en fundiciones a la espuma perdida con un proceso mínimo adicional .

10 .- Prácticamente todos los metales y aleaciones pueden ser fundidas por el método a la espuma perdida , incluyendo hierro gris , hierro dúctil y acero. Algunos de los mas experimentados fundidores reportan que pueden colar diferentes aleaciones ferrosas y no-ferrosas en la misma línea de producción con mínimos problemas de cambio.

11.- La calidad en las fundiciones en corridas de producción cortas o largas es fácil de controlar aplicando las técnicas de Control Estadístico de Proceso. Si los modelos y los recubrimientos refractarios son producidos bajo estrictas técnicas de aseguramiento de la calidad, las fundiciones quedaran extremadamente cerca de un estado libre de defectos.

Sin embargo, la simpleza del proceso y las ventajas antes mencionadas pueden generar errores en la elección de un proceso de fundición; la fundición a la espuma perdida presenta riesgos y problemas que no son muy obvios. Uno de los inconvenientes del proceso es la falta de estándares, para los métodos convencionales existen estándares publicados, para el proceso de fundición a la espuma perdida podemos hablar solamente de las experiencias de las fundidoras que lo han ocupado.

Otro gran inconveniente es lo novedoso del proceso, ya que las fundidoras que lo quieran implantar tendrán que adquirir y desarrollar conocimientos en los plásticos usados en la elaboración de los modelos de espuma, en los adhesivos usados en la construcción de los modelos y en los cerámicos utilizados en los recubrimientos. Al ser un proceso completamente diferente a cualquier otro método de fundición se tienen que desarrollar nuevos equipos, aprender sobre la tecnología de alimentación y entender los nuevos defectos que aparecen en este tipo de fundición y su manera de solucionarlos.

Asimismo presenta problemas técnicos como cualquier otro método entre los que podemos mencionar:

1.- El moldeo y el pegado de los modelos de poliestireno expandible debe ser consistente y con la suficiente precisión. ya que la calidad del modelo será la calidad de la fundición.

2.- Las distorsiones que puedan sufrir los árboles en el proceso de recubrimiento y montaje en la arena, debido a que estos pueden ser deformados inclusive con las manos.

3.- El control del flujo de metal en los modelos para llenarlos uniformemente y sin turbulencia, así como el control de la temperatura del metal fundido ya que para algunas aleaciones no es suficiente para vaporizar el modelo completo.

4.- La contaminación que pueda sufrir el metal con residuos de poliestireno expandido; que pueden causar defectos superficiales o porosidades en la fundición .

La transición de algún otro proceso de fundición al proceso de fundición a la espuma perdida puede ser bastante difícil , ya que como se ha mencionado al ser un proceso completamente diferente a los demás el costo de nuevo equipo, en muchos de los casos, vuelve la transición económicamente no viable. Algunos aspectos para que esta pueda ser justificada son; una reducción significativa en el peso de la fundición ya sea por la reducción en el espesor o la unión de diversas partes que tendrían que ser fundidas por separado, la reducción de maquinados como agujeros roscados y cuando las piezas presenten corazones muy complejos.

CAPÍTULO 5

Optimización del proceso de fundición artesanal .

Evidentemente, con la presentación de los capítulos anteriores hay enormes brechas entre lo que debería ser y lo que es; existen errores que saltan a la vista sin embargo, hay otros que no son tan evidentes. Para éstos últimos es necesario establecer procedimientos de análisis, en primer lugar para descubrirlos y en segundo para encontrar posibles soluciones.

Entre los factores mas importantes a considerar para el análisis general de optimización del proceso, podemos mencionar los costos, el número de piezas a producir, los acabados, la exactitud dimensional y la calidad de las piezas. Así como las respectivas consideraciones inherentes a cada pieza, es decir, la aleación, el peso, el tamaño, la forma y el espesor mínimo. La combinación de los factores del proceso en general y de cada pieza en particular arrojan un sin número de casos con problemáticas distintas, los cuales se tendrán que atacar de manera individual.

La relación de precio y costo es muy variable, depende básicamente de la pieza , del escultor, la serie, el acabado requerido y la época del año. Por ejemplo una pieza de un escultor famoso se cotizará más elevada que la de un escultor con el mismo talento pero sin la fama del anterior; las piezas con un número de serie limitado o únicas son más caras que aquellas en las que no existe restricción; en muchas ocasiones se requerirán acabados especiales como ciertas tonalidades del bronce y en otras ocasiones el acabado lo dará el proceso de patinado esto por consiguiente provocará variaciones en el precio y por último al ser las piezas de arte un regalo común el precio se vera influenciado por la época del año en la que se realice la venta.

En este mercado tan complejo, es difícil determinar los alcances a los que pudiera llegar la optimización del proceso. Esta optimización deberá tener ciertos niveles en primer lugar referidos al monto de la inversión requerida y en segundo al tiempo de implementación . Este trabajo estará enfocado a las mejoras que se puedan lograr con mínima o nula inversión de inmediato o a corto plazo. El capítulo 3 “El futuro de la fundición a la cera perdida” nos muestra los posibles caminos que se pudieran tomar en caso de contar con mayores recursos económicos, humanos y de tiempo.

Bajo esta perspectiva este capítulo estará basado básicamente en un procedimiento correctivo que sirva como punto de partida para prevenir recurrencia de los errores en el futuro, que establezca procedimientos de diagnóstico y corrección y que esté enfocado a una filosofía de cero defectos. Esto por consiguiente requerirá de un gran

esfuerzo del personal directivo y operativo y de un compromiso con el aprendizaje y la mejora continua .

La siguiente etapa es establecer los problemas mencionados en el capítulo anterior en base a los fundamentos teóricos investigados; una vez que se tiene el problema bien identificado la solución aparece por añadidura, es decir, pasar de un problema general a uno o varios problemas específicos muestra el camino para resolverlos.

La mayoría de las veces se tendrán varias soluciones para un mismo problema, éste será el enfoque del capítulo posterior, en donde se realizaran las pruebas necesarias para encontrar la solución óptima.

5.1.- Recomendaciones de las materias primas a utilizar

La cera es una materia prima ampliamente utilizada en México en la fabricación de cosméticos , cremas ,velas, lubricantes para PVC, recubrimientos, crayones, acabados de cuero , goma de mascar, dulces, desmoldantes, pulimentos, tintas para papel carbón y adhesivos esto indudablemente dependerá del tipo y del origen de la cera. Debido a esta amplia gama de aplicaciones encontramos en el mercado un buen número de fabricantes y proveedores que garantizan la disponibilidad del producto en el mercado.

La siguiente tabla nos muestra el grupo de ceras disponibles en el mercado mexicano, mencionando sus características y precios promedio¹.

No.	Tipo de cera	Características	Precio (M.N.)	Comentarios
1	Parafina	Punto de fusión : 56-60 °C Estructura : cristalina Color : blanco	\$10.00 / kg	Están disponibles en series de puntos de fusión controlados
2	Microcristalina	Punto de cong. : 63 -67 °C Punto de Fusión : 65-70 °C Viscosidad(100°C):6-7 mm2/s Color : blanco Forma : Marqueta	\$25.00 / kg	Consistente de hidrocarburos de cadena lineal ramificadas y de hidrocarburos nafténicos
3	Candelilla	Punto de fusión : 68.5- 72.5 °C G E. (15°C) : 0.950 Punto de ignición : 235 - 248 °C Color : ámbar Presentación : Trozos	\$28.00 / kg	Se obtiene de la planta Euforbia Antisifilitica y Pedilantus Pavonis que es nativa de México en las llanuras de la parte norte central .
4	Carnauba	Punto de fusión min. : 82.5 ° C Punto de ignición min : 299 ° C Color : Café claro	\$72.00 / kg	Es exudada por las hojas de palmera Copernica Cefífera. Esta palma crece en la parte norte y noreste de Brasil
5	Polietilénica	Punto de fusión : 92-98 °C Densidad a 20°C : 0.917 gr /cm3 Estructura : cristalina Color : Blanco Presentación : escamas	\$5.50 / kg	Es compatible con todas las ceras naturales y sintéticas
6	Flisher Tropsh	Punto de fusión min: 110 ° C Viscosidad a 25°C : 10-14 mm2/s Color : Blanco Forma : Esferas	\$30.00 / kg	Se utiliza para mejorar la dureza y el punto de fusión
7	Abeja sintética	Punto de fusión : 61-65°C Color : amarillo Presentación : granular	\$45 00 / kg	Consiste de esterres monovalentes de ácidos grasos con alcoholes y polivalentes con ácidos grasos y alcoholes libres

Tabla 12. Características de las ceras disponibles en México.

¹ La paridad del peso con respecto al dólar americano al momento de escribir este trabajo es de 8.40

La cera a utilizar tendrá que ser una combinación de las aquí mostradas , se tendrán que prever condiciones como el precio, la disponibilidad en el mercado y las propiedades que se obtengan de cada combinación.

El aglomerante que recomienda la literatura es el sílice coloidal, el cual es un producto utilizado en algunas otras industrias , lo cual lo hace también un producto al alcance de la fundición a la cera perdida.

El sílice coloidal tienen aplicaciones en las siguientes ramas de la industria:

1.- En la industria textil para darle estabilidad a los componentes, mejor acabado elevando la fricción para hacer posible la preparación de un hilado menos trenzado , reduciendo el deslizamiento .

También son utilizadas para prevenir la disposición de polvo en fibras, debido a que llenan los poros de las fibras, además permiten al tejido humedecerse mas fácilmente aumentando su eficiencia de lavado .

2.- En la industria papelera imparte mejores propiedades al papel fabricado en la elaboración de bolsas y empaques ya que funciona como antiderrapante y da un excelente acabado para la impresión con tintas.

3.- En la industria cerámica como aglomerante dando un acabado mas uniforme y mayor resistencia al producto final.

4.- En la elaboración de pinturas se adiciona como carga aumentando el contenido de sólidos e incrementa la brillantez de la misma. Asimismo en las formulaciones de pinturas marinas y para ambientes altamente corrosivos , se integra la sílice coloidal para dar un mayor poder anticorrosivo .

5.- En la industria de plásticos y hules se utiliza para aumentar la resistencia a la compresión de celdas de hule espuma abiertas. Las resinas poliéster insaturadas pueden extenderse con una sílice coloidal estabilizada y un álcali; pueden utilizarse en recubrimientos, laminados y en artículos moldeables a vaciados.

Asimismo se emplea como aditivo en diversos procesos actuando como: Ligante , estabilizante , emulsionante, inhibidor de corrosión, flocuante, antifriccionante, soporte de catalizadores, antipelmazante, aglutinante, antideslizante, impermeabilizante, etc.

Producto	Concentración %	Tamaño de partícula promedio μ	pH	Área superficial m^2 / g	Viscosidad típica cp	Contenido de Na ₂ O Aproximado %
NX-1115	15	4	10.4	750	18	0.80
NX-1030	30	13	10.2	230	10	0.40
NX-1034	34	20	3.2	150	10	0.05
NX-1040	40	15	9.7	200	12	0.40

Tabla 13. Propiedades de los diversos productos de sílice coloidal

El precio por litro de este producto es de aproximadamente \$10.50 M.N. y su presentación es en porrones de 50 Kg o Tambores de 220 Kg netos.

La arena es la tercer materia prima de importancia dentro del proceso de fundición a la cera perdida y tiene una importante influencia sobre la calidad y costo del producto final.

La arena mas utilizada es la arena sílica, en el mercado mexicano podemos encontrar proveedores nacionales y extranjeros ofreciendo productos con características similares. Aunque las arenas caigan dentro de la misma clasificación o tipo pueden o no ser idénticas y dependerá en gran medida del lugar de origen , el proceso de fabricación y del proveedor. Existe también en el mercado mexicano las sílicas fundidas que ofrecen propiedades muy buenas para la fabricación de las cáscara cerámica.

En el pasado la arena era considerada como un material barato, simple e indiferente. La mayor influencia sobre este recurso era la localización. Pero hoy en día la elección del proveedor y de la propiedades resultantes puede convertirse en una decisión crítica para aquellas fundiciones que requieren producir piezas de mayor calidad a bajos costos .

El tamaño de grano y la distribución es la propiedad más comúnmente considerada . El tamaño de grano ha sido y continuará siendo, un promedio para clasificar la finura de un grano particular de arena .

La distribución de arena es más importante y debe de ser estrechamente revisada. Las mallas mas finas generalmente aumentan el área superficial; las mallas finas pueden ocasionar que los requerimientos de aglutinantes crezcan significativamente y que la permeabilidad disminuya notablemente.

La forma de grano, la pureza química, las perdidas por ignición y la densidad son normalmente reguladas por la formación geológica. Podría haber variaciones en un

depósito, pero la mayor variación ocurre entre proveedores o el origen geográfico de la arena .

	Arena sílica
Origen	U.S.A.
Color	Blanca - Café parda
Densidad (Seca)	Min. 1.316 Kg / dm ³ Max. 1.606 Kg / dm ³
Peso específico	2.2. - 2.6
Forma de grano	Angular / redonda
Expansión Térmica	0.018
Punto de Fusión	1426- 1760 °C
Reacción química	Ácido - Neutral
Distribución	2 mallas
N0. AFS (Rango)	25 -200

Tabla 14. Propiedades de la arena sílica

Los proveedores de arena sílica en México ofrecen productos similares, básicamente manejando dos principales líneas que son la arena nacional y la arena importada, que difieren en el precio hasta en un 70 % .

Tipo de arena	Malla	Precio por tonelada (M.N.)
Arena sílica Oklahoma .Importada	200	\$ 1,200.00
Arena sílica nacional	200	\$ 700.00
Arena sílica Oklahoma .Importada	90 /100	\$ 1,100.00
Arena sílica nacional	100/110	\$ 650.00
Arena sílica nacional	50/60	\$ 650.00

Tabla 15. Costos de las arenas sílicas

Como materias primas alternas se encuentran los yesos para joyería los cuales dejan un excelente acabado, estos yesos tiene propiedades muy específicas y sus condiciones de manejo y operación deben de tener una gran precisión .

En caso de piezas muy pequeñas como las joyas con un gran valor comercial , es posible afrontar el gasto de este tipo de yeso que en el mercado se pueden conseguir por alrededor de los \$ 12.00 M.N. el Kilogramo .

Por último por mencionar los broncees que dependiendo de su composición varían de \$ 25.00 hasta \$ 34.00 por Kg y como ya hemos mencionado, el tipo de bronce lo determinará la tonalidad requerida para la pieza.

5.2 Almacenamiento de las materias primas .

Una vez que se seleccionaron las materias primas adecuadas, el siguiente paso es cuidar que estén debidamente almacenadas y resguardadas de posibles contaminaciones o que por algún motivo sufran alguna alteración en sus propiedades. Por este motivo cada materia prima deberá de tener un estricto control de mantenimiento .

- Ceras .

Las ceras como ya se ha mencionado tienen gran influencia en la calidad final las piezas de fundición, es por eso que deberán tener un especial cuidado en su almacenamiento. Las ceras utilizadas en la fundición a la cera perdida son estables a temperatura ambiente, sin embargo se recomienda que sean almacenadas en un lugar fresco.

Mientras están en la etapa de materia prima , no se necesitan grandes cuidados salvo el estar conservados en recipientes en donde estén libres de contaminación por polvo. Si en alguna de las etapas de proceso sobró cera es necesario evaluar si se puede almacenar en la máquina o tiene que ser transferida a algún otro recipiente ; en cualquiera de los dos casos se deberá tener cuidado en no contaminarla con polvo o partículas sólidas.

Una vez transformada la cera en modelos, ésta deberá ser almacenada en refrigeración, al ser los modelos huecos hay mayor posibilidad de reblandecimiento, lo que provocaría deformaciones que afectarían directamente la fundición final. Un rango recomendado de refrigeración caería entre los 5 y 15 ° C.

- Arena .

La arena debe de ser tratada como cualquier materia prima, debiendo disponerse de departamentos o depósitos adecuados para su almacenamiento. Un depósito para almacenamiento a granel constituye una gran ventaja. Periódicamente se deberán efectuar comprobaciones del tamaño de grano, de humedad y de permeabilidad; llevando un registro y adoptando un sistema de muestreo de aceptación que permita tomar decisiones cuando la arena no sea la apropiada .

Es necesario definir perfectamente las fórmulas de las mezclas, especificando claramente el procedimiento de mezclado de manera que el obrero tenga acceso a esta información para el buen desarrollo del proceso. Se debe conservar una limpieza implacable y evitar a como de lugar la contaminación de las arenas.

- Yeso .

Este material es extremadamente delicado, se deben seguir al pie de la letra las recomendaciones de almacenamiento del proveedor, el yeso es un material que se debe conservar en un lugar totalmente seco, libre de humedad y de contaminación con algún otro material.

A diferencia de las demás materia primas el yeso tiene una fecha de caducidad y se debe de tener cuidado en la planeación de compra de este producto.

El yeso para joyería generalmente se compra empacado en bolsas de plástico dentro de envases de cartón, si este es el caso después de haber extraído el yeso requerido se deberá comprimir la bolsa a manera de eliminar todo el aire para posteriormente cerrar la bolsa apretadamente y cerrar la cubierta de cartón.

- Aglomerante (Sílice coloidal).

El tiempo de almacenaje del sílice coloidal es de máximo un año bajo techo y en su envase original. Es recomendable usar para su manejo y aplicación acero inoxidable, polietileno, PVC o metales recubiertos. Los tanques, líneas y equipo deben de ser lavados con sosa cáustica diluida para eliminar depósitos de sílice.

Los envases deberán mantenerse a temperaturas superiores a los 0°C debido a que la sílice coloidal tiende a gelarse a bajas temperaturas . No deberá mezclarse con productos que varíen el pH, concentración o carga iónica negativa; debido a que también pueden causar gelación del producto.

- Cobre .

Una vez comprobado que todo el metal adquirido tiene la composición correcta , es necesario disponer de un almacenamiento adecuado para evitar pérdidas de identidad y contaminación con otros materiales. El manejo de chatarras procedentes de la fundición o del acabado y desbardado deberán de estar limpias y tendrán que ser perfectamente identificadas. Un método muy barato de mantener la identificación consiste en emplear un código de colores , marcando cada trozo de chatarra con pintura del color apropiado. Es recomendable que las mazarotas y los bebederos se marquen antes de ser separados de las piezas a los que van unidos.

5.3 Recomendaciones para mejorar el proceso .

Tratar de definir las mejoras a un proceso de manufactura no es una tarea fácil, es necesario determinar los alcances a los que se quiere llegar, los recursos que se tienen para lograrlo y tener en mente que siempre habrá una manera mejor de hacer las cosas. Los procesos de fabricación en la víspera del nuevo siglo deben estar abiertos al cambio y ser completamente flexibles para afrontar los requerimientos de un mercado altamente mutante.

Los procesos de manufactura necesitan en forma continua una infusión de nuevas ideas, de otra manera están destinados al desuso y olvido. El poder de una compañía no solo se mide por su capacidad económica sino también por el conocimiento que se tenga del negocio; es por eso que el desarrollo tecnológico continuo permite a las empresas permanecer en el mercado .

Sería presuntuoso en este trabajo después de todo lo expuesto anteriormente establecer los métodos y procedimientos que den solución a los problemas de la industria de fundición a la cera perdida , sin embargo es posible definir o establecer una guía de los pasos a seguir para la adquisición del conocimiento mínimo necesario para poder decir al final de este trabajo que valió la pena el esfuerzo .

Mucho de lo recomendado estará enfocado a lo que se hace en otros países y que solo se tiene información en México a través de artículos publicados en revistas especializadas y que a grandes rasgos esta resumido en los primeros capítulos de este trabajo. Sin embargo, aunque las ideas no sean del todo originales , existe una gran brecha entre saber que alguien mas lo hace y hacerlo uno mismo ; siempre habrá tecnología que no se da a conocer tan fácil o existirá aquel elemento secreto que hace la diferencia. Esta será una labor de prueba y error que seguramente nos llevará a plantearnos nuevas preguntas que se tendrán que resolver.

De acuerdo a lo anterior se recomienda para cada una de las etapas del proceso lo siguiente :

1.- Producción del modelo

Este paso es posible subdividirlo en tres bloques ;

a) Obtención de la cera adecuada

La cera está en función del método de investimento que se vaya a utilizar , en el caso de utilizar el método de molde lleno se puede utilizar una cera vieja sin mucho control en su calidad, sin embargo, al utilizar el método de cascara cerámica la cera cobra especial importancia. Esto es debido a que mientras en el método de molde lleno la cera queda inmersa dentro del investimento de yeso y éste imprime la

firmeza al molde , en el método de cáscara cerámica el molde se crea sobre la cera y ésta es la que soporta el peso por lo menos en las primeras capas del recubrimiento .

El potencial de la técnica solo se podrá alcanzar totalmente si se tiene pleno conocimiento de las materias primas involucradas . lo único que se puede hacer en este sentido es desarrollar tantas combinaciones como sean posibles, registrando sus propiedades de manera cuantitativa y cualitativa .

b) Fabricación del molde o matriz para inyectar la cera

La mayor parte de la piezas artísticas tiene formas que sería imposible reproducirlas por medio de un molde rígido, es por esto que los moldes deberán ser de un material completamente flexible y que soporte la temperatura de inyección de la cera.

Los moldes fabricados en silicón son una excelente opción , estos deberán estar reforzados con fibra de vidrio con guías que garanticen que el molde estará siempre en la misma posición .

La recomendación en este campo es que no se malentienda el ahorro disminuyendo el grosor del silicón o sustituyendo el refuerzo de fibra de vidrio con uno de yeso como normalmente se hace. Como ya se ha mencionado la pieza fundida es el reflejo de la cera .

c) Fabricación del modelo en cera .

La fabricación del modelo en cera la podemos dividir en cuatro pasos ; la fusión de la cera, el acondicionamiento , la inyección y el soldado y acabado. En la fusión y acondicionamiento se deben seguir las recomendaciones del capítulo 2, las ceras sufren modificaciones en sus propiedades si no son manejadas adecuadamente .

Es necesario la adquisición de un tanque de fusión con control de temperatura garantice que la cera no será contaminada con polvo o arena. En los talleres visitados esta actividad se realiza en un tambo de lámina al aire libre, sin embargo vale la pena invertir en tanques que seguramente traerán beneficios a corto plazo.

El vaciado de la cera se realiza en forma manual para poder generar modelos de cera huecos, esta actividad necesita ser de suma precisión para poder tener espesores uniformes. Hasta el momento el vaciado es realizado por un obrero especializado que verifica que el modelo tenga los espesores adecuados. En este sentido será recomendable poner mucha atención para desarrollos posteriores.

Recubrimiento cerámico .

El método de recubrimiento cerámico que presenta mayores beneficios es el de cáscara cerámica, sin embargo es un método que tiene que realizarse con suma precaución, las materias primas necesarias están disponibles en México por productores mexicanos y el paso a seguir al igual que con las ceras es verificar que tan cerca esta la literatura de la realidad.

Es necesario establecer los métodos para lograr una implantación exitosa , será necesario comprar nuevo equipo para el mantenimiento de la suspensión y equipos de rocío tanto de la suspensión como del estuco. Sin embargo, en el periodo de transición se puede llevar el procedimiento en forma manual.

Si la pieza a producir tiene un gran valor comercial y no es de grandes dimensiones es viable utilizar el procedimiento de molde lleno pero con yeso para joyería , el cual presenta excelentes propiedades si se siguen las condiciones de operación recomendadas por el fabricante , tanto en su composición como en el ciclo de desencerado. Esto nos permitirá ahorrar tiempo el la elaboración de la cáscara cerámica y así mismo nos garantiza un excelente acabado superficial.

Por último se podría pensar en un método híbrido, es decir aplicar un determinado grosor de cáscara cerámica a un árbol de cera y montarlo en un cubilete para posteriormente llenarlo con yeso. Al servir las últimas capas solo de soporte, se puede pensar que un yeso barato podría cumplir con esa función y dejar a las primeras capas de cáscara para que brinden un buen acabado superficial.

Extracción de la cera y cocido.

En este sentido, es evidente que las cosas no se están haciendo bien , es necesario el diseño de un horno que cumpla con los requerimientos que exige el cambio a la excelencia. En primer lugar debe de ser un horno permanente, los hornos utilizados actualmente son construidos cada vez que se produce una pieza o un árbol de piezas. El costo de construir un horno a la vez tanto en materiales y horas hombre a través del tiempo justifica ampliamente el diseño y construcción de un horno permanente.

En segundo lugar debe estar instrumentado debidamente con un termómetro y un termostato para poder regular la temperatura, esto es muy importante para poder evitar errores en las piezas fundidas.

Por último es conveniente que estos hornos cuenten con un mecanismo recuperador de ceras, esto es posible si programamos un ciclo de desencerado con una

temperatura baja al principio entre los 100 y 150 °C que permita que en un tiempo aproximado de una hora pueda escurrir la mayor parte de la cera en algún recipiente para posteriormente ser extraída. Esta sugerencia es debido a dos causas, una evidentemente es la recuperación de los materiales y la otra es por razones de seguridad ya que las ceras pueden tener un punto de ignición y podrían causar leves explosiones.

Colado .

Para el colado podríamos sugerir tres métodos :

1.- Por gravedad .

Para piezas grandes o monumentales hasta el momento no tendremos otra opción , El colado por gravedad puede tener sus inconvenientes pero no necesita una inversión adicional.

2.- Por centrifugado .

Es posible conseguir en México máquinas de colado con centrifugado , estas máquinas están acopladas a un motor eléctrico que proporciona el giro y cuentan con hornos de inducción acoplados para realizar la fusión del metal dentro de la misma máquina . Los moldes deben ser introducidos en forma de cubiletes con un diámetro máximo de 6 “ y una altura de 8” . el precio aproximado de éstas es de \$ 30,000.00 .

3.- Vaciado por succión .

Este tipo de maquinaria se encuentra en México para varios tamaños de cubiletes siendo el máximo de 10 “ de diámetro por 12 “ de largo , lo cual proporciona las dimensiones de una pieza mediana. Su precio en el mercado es de alrededor de los \$60,000.00 y es de fabricación nacional .

En cualquiera de los métodos sugeridos anteriormente es necesario poner mucha atención a la temperatura de vaciado. Este es el factor esencial en la producción de piezas fundidas de cualquier aleación, ya que la temperatura de colada ejerce influencia sobre la fluidez , reacción metal -molde, contracción, microestructura, tamaño de grano y acabado superficial.

Una vez que se ha determinado la temperatura de colada adecuada para la pieza a fundir, deberá ser anotada y pasará a formar parte de las instrucciones de proceso de dicha pieza. Cuando se obtengan cierto número de piezas pequeñas de un solo crisol o cuchara , se producirá inevitablemente una caída de temperatura entre la primera colada y las últimas. Es preciso entonces llegar a una solución de compromiso para que las primeras no se vuelen demasiado calientes, ni las últimas demasiado frías. En consecuencia, la temperatura se deberá medir siempre junto a los moldes

inmediatamente antes de la colada, aún cuando haya sido comprobada en el horno poco antes. Resulta conveniente contar con una instalación de pirómetros fija en los hornos con instrumentos que se puedan leer fácilmente a distancia, sin embargo también son necesarios instrumentos portátiles.

Todos los instrumentos medidores de temperatura deben ser manejados cuidadosamente en especial los portátiles ya que su sensibilidad se puede alterar fácilmente por un manejo descuidado. Los pirómetros deberán ser calibrados por lo menos una vez por semana.

Acabado .

La limpieza y terminado de piezas constituyen una parte significativa de los costos de producción. El costo de esta operación se ha estimado en el orden de un 15 % a un 33% del costo total de la producción ¹. Las empresas con mayores problemas son aquellas que utilizan arena para fabricar sus moldes.

De acuerdo a las recomendaciones señaladas anteriormente se pretende llegar a reducir significativamente las operaciones de limpieza y acabado que hoy en día representa una intensa labor manual. De cualquier manera siempre habrá operaciones de corte, esmerilado y limpieza para eliminar coladas, alimentaciones, defectos menores y remover el investimento adherido a las piezas. Es necesario que se tenga un mejor entendimiento de la tecnología disponible para mejorar los costos - efectividad del cuarto de acabado y limpieza.

Los costos actuales de las operaciones de esmerilado varían de acuerdo a los siguientes factores :

Tipo de metal

Volumen de producción

Calidad y acabado requeridos

Peso y tamaño de las piezas

Complejidad de la geometría de la pieza

Sin embargo existen otros factores como la remoción de los alimentadores y coladas, así como la remoción de arena que pueden incrementar los costos. La avanzada tecnología en piedras de esmeril, discos de corte, bandas abrasivas, o equipo de "sand - blasting"² en sus respectivas combinaciones con los abrasivos existentes actualmente en el mercado, ofrecen grandes ventajas con respecto a los métodos abrasivos convencionales.

¹ Norris B. L. " Improving Grinding Technology for Casting " Modern Casting . Enero 1995

² Limpieza con chorro de arena .

Aunque significativamente se reducirán los costos y el tiempo de acabado será necesario revisar los métodos de acabado y limpieza, la inversión requerida variará de acuerdo a el equipo deseado.

5.4. Reglas básicas de seguridad e higiene .

La razón de escribir esta parte del capítulo que aparentemente sale fuera de contexto es la de cuidar de los recursos mas importantes en cualquier empresa , es decir sus recursos humanos. En las visitas realizadas a las plantas de fundición artística fue notoria la falta de precaución que se tiene de los accidentes y enfermedades laborales.

Esta situación no es exclusiva de este tipo de industria , según estimaciones oficiales cada año se producen en México alrededor de 600 ,000 accidentes de trabajo accidentes o enfermedades laborales , de los cuales 20,000 son causa de invalidez permanente para algún trabajador. Los costos directos e indirectos ocasionados por la falta de prevención representan en total más de 7,500 millones de dólares y se calcula que un 95 % de las empresas establecidas incumplen alguna o todas las normas de seguridad e higiene a las que están legalmente sometidas.

La prioridad en la mayoría de las empresas es producir y se deja a un lado todo lo que soporta la producción, la seguridad y la prevención de accidentes se debe percibir como un buen negocio. Las malas condiciones de trabajo implican ausentismo del personal , días perdidos en capacidad, pérdidas de materia prima, daños a la maquinaria, etc .

	1993	1994	1995
Trastornos al oído	2,715	2,813	1,328
Neumoconiosis por sílice	2,305	3,189	1,148
Bronquitis química	554	667	207
Dermatosis y enfermedades del tejido celular	387	351	330
Efectos tóxicos del plomo	105	127	23
Enfermedades del aparato respiratorio	134	141	62
Trastornos del ojo	35	26	7
Efectos tóxicos de sustancias no medicinales	22	19	9
Efectos tóxicos de sustancias aromáticas y corrosivas	8	2	6
Efectos tóxicos de otros metales	10	7	4
Neurosis	1	7	6
Varias de frecuencia menor	89	3	104
Total	6,365	6,370	3,134

Tabla 16 . Frecuencia de las principales enfermedades de trabajo en México .

Como podemos observar la Neumonoconiosis es la segunda enfermedad laboral en número de casos, esta es causada por inhalación de polvos de sílice lo que provoca una fibrosis pulmonar que en términos generales es un endurecimiento de las fibras

pulmonares. Debido al gran manejo de polvos de sílice tanto en las arenas como en los aglomerantes, es necesario tomar las medidas necesarias para prevenir esta enfermedad.

Aunque el equipo de protección personal debe ser el último recurso debido a lo incómodo que resulta para el trabajador en este tipo de industrias es necesario debido a lo peligrosos de los procesos. La recomendación en equipo de seguridad es:

- Protección contra ojos: Operaciones de fundido e inyección de la cera , fundición del metal, colado y acabado
- Guantes: Fundición del metal, colado y acabado
- Cascos: En todas las operaciones
- Calzado de seguridad: En todas las operaciones
- Mascarilla: En la elaboración de la cáscara cerámica

Debido a que se trata de una industria que corre el riesgo de incendios y explosiones, se deben tomar medidas de precaución para prevenirlos; para que un incendio estalle en un lugar es necesario que ocurran en él tres elementos : que haya oxígeno, algún material combustible y cierta cantidad de calor. Si se elimina uno de cualquiera de estos tres elementos , el incendio no puede iniciarse y si ya se inició, no puede continuar. Todos los métodos de prevención de incendios consisten en esencia de la reducción o eliminación de uno de estos tres elementos.

La gama del equipo para la extinción de incendios va desde los cubos de agua o de arena hasta instalaciones completas de rociadores. El tipo o la cantidad de equipo necesarios dependen del tamaño y construcción de la planta que ha de ser protegida y de los procesos que se efectúan en su interior. La recomendación en este sentido es evaluar las maneras de prevenir incendios y tener los medios suficientes para que en el momento en que se presenten poder sofocarlos, cualquier inversión en este rubro podrá salvar recursos materiales y sobre todo humanos .

CAPÍTULO 4

Situación actual de la fundición a la cera perdida en la industria de la fundición artesanal .

El desconocimiento de las ventajas y los alcances que se tienen del procedimiento de fundición a la cera perdida en México han motivado que el mercado industrial para este tipo de fundición de precisión sea muy limitado. Otros métodos de fundición resultan mas baratos y sencillos para el tipo de piezas producidas por fundición en este país.

Sin embargo, la tradición artística que ha sido heredada desde la época precolombina ha permitido que la fundición a la cera perdida sea un método ampliamente utilizado en la joyería, en la fabricación de esculturas y monumentos en bronce, así como en la producción de implantes dentales.

La industria joyera mexicana tiene un amplio mercado tanto nacional como extranjero y produce finas piezas tanto en oro, platino, plata o algún otro metal o aleación que resulte atractivo o que por algún método de galvanoplastia sea recubierto por algún metal de los antes mencionados. Los métodos y las técnicas utilizados en la industria joyera mexicana se encuentran perfectamente bien establecidos y estructurados; se han desarrollado proveedores tanto nacionales como extranjeros que ofrecen productos que facilitan la labor de los joyeros mexicanos.

La producción de esculturas y monumentos ha sido un tanto abandonada por la generación de nuevas técnicas, materiales, máquinas y mecanismos que hicieran mas fácil la producción. No existe un procedimiento bien establecido y documentado que garantice buena reproductibilidad y calidad de las piezas.

Las materias primas utilizadas , como las ceras, las arenas y el yeso no son los adecuados para ésta aplicación y se han olvidado de los cuidados y controles que el procedimiento debe tener para la obtención de buenos resultados. Muchos de los artesanos tienen la idea errónea de tratar de ahorrar unos cuantos pesos en las materias primas y no se dan cuenta de que lo único que provocan son desperdicios inútiles y grandes gastos posteriores en retrabajos y acabados de las piezas.

Este capítulo pretende ser un espejo de la situación actual de los talleres con los que se tuvo contacto, mencionando las materias primas, procedimientos, y técnicas tal y como son utilizados actualmente. La información fue obtenida a base de observación y encuestas realizadas a los artesanos y dueños de los talleres.

4.1.- Descripción de los procedimientos utilizados .

El procedimiento de fundición en la industria artesanal comienza con la realización de una obra que está a cargo del genio creativo de un escultor quien entrega la pieza en materiales diversos como la madera, el barro, la plastilina o algún otro material moldeable. En este paso lo mas importante es el aspecto artístico del autor; los procedimientos o las técnicas para la realización de las obras se aprenden en las escuelas de arte.

Una vez que se tiene la obra, se prepara un molde de cola o un molde de hule de silicón en función del tamaño de la pieza y del número de piezas que se vayan a producir, en el caso de ser menos de cinco piezas o producciones únicas de piezas monumentales se utiliza el molde de cola y para producciones de mas de cinco piezas y de tamaño pequeño o mediano se utiliza el molde de silicón.

El procedimiento utilizado en la producción del molde de cola es el siguiente:

- El modelo o la obra se barniza con goma laca o laca industrial transparente y se dibuja la línea de moldeo
- Se construyen “galletas” de barro con un espesor de 2 a 2.5 cm y con una longitud y ancho de acuerdo a la pieza
- Posteriormente , la pieza se coloca sobre una superficie plana y se acomodan las galletas sobre la superficie de la pieza de manera que quede toda cubierta
- Se construye la cubierta o caja de yeso ,es decir, se coloca yeso manualmente sobre la superficie de las “galletas” de barro ; marcando cuidadosamente la línea o líneas de moldeo y se espera a que fragüe.
- Se separan las partes que forman la cubierta o caja de yeso y se eliminan los residuos de las “galletas” de barro tanto en el yeso como en el modelo.
- Se deja secar la cubierta de yeso hasta eliminar por completo la humedad
- Se barniza la caja de yeso hasta tapar los poros en su parte inferior
- Una vez limpia la figura se barniza con algún aceite o grasa u otro material que sirva como separador.
- El siguiente paso es preparar el agua de cola calentándola a baño María
- Sobre una base se coloca el modelo y la caja de yeso procurando que queden perfectamente alineados .
- Se vacía el agua de cola por una perforación previamente preparada en la cubierta de yeso .
- Después del curado de la cola se retiran las partes de yeso, con lo que queda el modelo cubierto completamente del agua de cola fraguado que es flexible y fácil de cortar.

- Se procede a cortar la cubierta de cola de acuerdo a las huellas de las líneas de las partes de yeso
- Posteriormente se procede a despegar las partes de cola del modelo

Las partes de agua de cola que copian fielmente la pieza en negativo conjuntamente con la caja de yeso que funciona como soporte, forman una parte de molde o un molde completo. Las partes de agua de cola con sus respectivas cajas de yeso se unen con un cordel o alambre para formar el molde en donde se realiza el vaciado de la cera. Este tipo de moldes no son muy duraderos y como ya se mencionó se utilizan en corridas de producción muy pequeñas o en la fabricación de piezas monumentales. El tipo de cera utilizado en este tipo de moldes debe ser de un punto de fusión muy bajo ya que el agua de cola comienza a reblandecerse por encima de los 40 °C.

A continuación presentaremos el procedimiento para preparar un molde de fibra de vidrio de una pieza sencilla con un molde de dos partes :

- Se prepara el hule o caucho de silicón agregando el catalizador recomendado por el fabricante y aplicando agitación en toda la mezcla
- La pieza se coloca en una superficie plana para poder trabajar
- El primer paso consiste en formar un dique o plantilla de plastilina , el cual sirve para delimitar el área que tendrá cada sección del molde y crear las guías del mismo .
- Una vez lista la plantilla se aplica la primera capa de hule de caucho sobre la primera parte de la pieza incluyendo la plantilla de plastilina. Este paso se repite hasta tener tres capas .
- Sobre la tercera capa todavía fresca se coloca un refuerzo de fibra de vidrio en toda la superficie que después se recubre con otra capa de hule .
- El siguiente paso es rellenar aquellas partes que muestren huecos , hendiduras o cavidades que pudiesen atorar o impedir el desmolde de la pieza , aplicando en principio una capa de cera y posteriormente una pasta de resina poliéster .
- Mientras los empastes de resina se secan , se deben de cortar el excedente de fibra de vidrio que sobresale del molde
- Se aplica una capa de hule de silicón sobre los empastes de resina y se procede a la fabricación del contramolde.
- El contramolde es una serie de capas de fibra de vidrio y resina poliéster con lo que quedaría terminada la primera parte del molde.
- El siguiente paso el voltear la pieza y cubrir la ceja de hule de silicón de la primera parte del molde con una solución de jabón concentrado que servirá como agente separador.

- El procedimiento se repite para fabricar la segunda parte del molde .
- El ultimo paso es realizar unas perforaciones a ambas partes del molde para pasar tornillos o pasadores que sirvan como guías al momento de armar el molde .

Cuando las piezas son muy intrincadas o de grandes dimensiones, se requiere de la fabricación de un molde múltiple que facilite tanto la realización del modelo en cera como en su momento del vaciado del metal. El hule de silicón presenta muchas ventajas en comparación a otros materiales, podemos mencionar que no presenta adherencia o daño a ningún tipo de material, tiene buena resistencia al desgaste y se pueden inclusive colar aleaciones metálicas de bajo punto de fusión (hasta 300°C).

Sea cual fuera el tipo de molde y el número de partes que lo conforman, se procede al siguiente paso que es el vaciado de la cera. La cera utilizada es una cera microcristalina y en algunas ocasiones es combinada con brea; ésta es derretida en un recipiente que está en contacto directo con un quemador de gas. Durante el derretido la cera es removida con una pala de madera para alcanzar cierta uniformidad.

Una vez que la cera está totalmente líquida, se vierte en el interior del molde y se mueve para que la cera tenga contacto con toda la superficie del molde; se escurre el exceso quedando una delgada capa de cera en la superficie. Dependiendo de la complejidad y tamaño del molde, éste se puede abrir y colocar cera en estado pastoso manualmente en los lugares en los que no se logró un buen espesor, para volver a cerrar el molde y repetir la operación de vaciado de la cera hasta obtener una capa de aproximadamente 3 mm.

El espesor de la cera será el espesor final de la pieza metálica, un espesor demasiado delgado provocará problemas de llenado y de un espesor grueso se obtendrán piezas demasiado pesadas y por ende aumentarán los costos por la cantidad de bronce vaciado.

Una vez obtenido el espesor adecuado es separar el modelo de cera del molde, para este proceso es recomendable enfriar el molde con agua para lograr que la cera se solidifique y al momento de desmoldar el modelo de cera no sufra daños . El modelo obtenido debe ser una copia fiel de la figura o pieza original, solo que éste estará hueco.

En el caso de que el modelo de cera tuviera que ser construido en varias partes se procede a una etapa de soldado y acabado en donde se sueldan las diversas partes del modelo y se detallan los errores que pudieran aparecer en el modelo; esta etapa debe

ser de absoluta precisión ya que cualquier detalle en la cera por pequeño que éste sea se verá reflejado en la fundición. Cuando el modelo está listo se atraviesa con pequeños alambres de cobre en ciertas partes , los que servirán como soporte para el corazón de arena que se forma en el interior.

En esta etapa se preparan pequeños tubos o cilindros macizos de cera con un diámetro de 7 a 8 mm que servirán como canales para la salida de la cera y como sistema de alimentación del metal a vaciar , estos tubos son soldados al modelo y su distribución determinará la forma de llenado. No existen reglas para la disposición de estos tubos ya que varían de artesano a artesano tomando como base solamente su experiencia para la correcta salida de la cera y llenado de metal. En esta operación se preparan también con cera lo que en su momento serán el bebedero y rebosaderos.

El siguiente paso después de haber preparado el modelo de cera y el sistema de alimentación es preparar la mezcla que formará el molde y corazón cerámico. Esta mezcla se realiza de varias maneras, la más común es utilizar dos porciones de arena por una de yeso y la cantidad de agua necesaria para que sea una mezcla homogénea y manejable, en lugar de arena se puede usar tabique rojo molido o cantera.

Para la construcción del molde se utilizan cilindros de acero para soportar el molde mientras ocurre el fraguado. Dependiendo de la manera elegida para el sistema de alimentación, la figura mostrará su parte hueca en dirección al bebedero o la parte exterior de la pieza con esta dirección ; en este caso se tendrá que preparar el corazón de la pieza antes de soldar los canales de cera. El corazón se prepara vaciando la mezcla de arena y yeso al interior de la pieza, aplicando una pequeña vibración para que el penetrado sea efectivo.

En el caso de que la pieza no necesite corazón se procede a vaciar directamente la mezcla de arena y yeso al interior del cilindro metálico colocando el modelo en cera en el interior. El vaciado de la mezcla se realiza hasta cubrir perfectamente la figura y nivelar hasta el bebedero. Es recomendable aplicar cierta vibración al cilindro para que la mezcla se acomode perfectamente sobre toda la superficie del modelo en cera

Se espera al fraguado del molde, se voltea y se construye alrededor un horno utilizando tabiques refractarios y cemento , se introduce un quemador de gas, el cual permanece funcionando aproximadamente un día y medio, en los que se consigue que la cera haya desalojado el molde y que el cocido de éste le de la suficiente firmeza para soportar el vaciado (Figura 1).



Figura 1. Hornos de desencerado y cocido

Se espera a que el molde se enfríe , mientras se lleva a cabo la fusión del bronce. En caso de que se tengan varios moldes, estos se introducen y acomodan en un banco de arena con el propósito de mantener el calor uniforme durante el enfriado del metal y facilitar el vaciado manual. El bronce utilizado generalmente se obtiene de desperdicio de válvulas y tuberías y no se lleva ningún control sobre la aleación.

Después de realizar el colado se espera a que la pieza se enfríe, una vez fría se rompe el molde y se extrae la pieza que pasa a una etapa de acabado en donde se limpia, se le quitan las coladas , esmerilando todas las partes en donde estuvo el sistema de alimentación, se corrigen errores como cuarteaduras, cortinillas, porosidades o algún otro defecto (Figura 2).

Esta etapa de acabado se realiza con herramientas abrasivas como esmeril, lijas, limas, auxiliándose de martillos y cinceles. Una vez acabada se lava con ácido nítrico y después con agua .



Figura 2 .Etapa de acabado

Para darle el acabado final pasa a la etapa de patinado. La pátina se prepara en un bote de plástico en el cual se agrega ácido nítrico industrial y fibra fina metálica, se mueve hasta que la fibra se deshaga en el ácido; después se agrega agua en un volumen de 1 a10, agregándole también ciertos químicos como nitrato férrico o nitrato cúprico obtener el tono requerido.

La pátina se aplica con una brocha después de haber calentado la pieza a 250 °C aproximadamente con un soplete hasta darle el tono o color deseado. El brillo final se le da con una capa de grasa para calzado, lo que ayuda también a protegerla contra la corrosión.

Como ya mencionamos, dependiendo del tamaño y la complejidad, las esculturas pueden ser fabricadas en varios segmentos que después se soldan. La soldadura utilizada es una aleación de cobre, estaño y plomo, a las cuales se les agrega Bórax como fúndente.

La soldadura es aplicada con arco eléctrico el cual es formado por un electrodo de grafito logrando la suficiente temperatura para llevar a cabo la soldadura en la escultura.

4.2.- Factores que provocan los defectos en las fundiciones .

Los factores que provocan los defectos en las fundiciones pueden ser de muy diferente índole; podemos mencionar entre los mas comunes , errores humanos, materias primas defectuosas , procedimientos inapropiados y falta de controles que puedan monitorear las principales variables del proceso.



Figura 3 . Pieza que muestra defectos típicos en la fundición a la cera perdida

Muchos de estos factores son evidentes , algunos otros son mas difíciles de detectar y solo los podemos percibir indirectamente , sin embargo lo mas importante no es detectar lo que está mal sino establecer los procedimientos adecuados con sus respectivos documentos para garantizar reproductibilidad en el futuro .

Algo mas importante todavía es cambiar en principio la mentalidad del empresario y posteriormente la del artesano u obrero ; comprometerlos con la calidad en los

productos y con nuevos sistemas de ahorro de materiales y de energía que por consiguiente traerán ahorro de recursos económicos y minimizaran la generación de residuos contaminantes al ambiente y a la atmósfera .

Como ya se mencionó los procedimientos utilizados la industria de fundición artesanal han sido transmitidos de generación en generación , sin embargo parece ser que en determinados momentos de la historia se han olvidado los secretos , las técnicas y procedimientos originales , y han degenerado en otros muy diferentes; motivados tal vez por un malentendido ahorro de recursos . De la misma forma no ha habido una integración de los avances tecnológicos tanto en procedimientos como en materiales utilizados en la fabricación de piezas industriales .

En base a lo anterior y a la investigación realizada en los talleres visitados podemos mencionar los principales factores que generan piezas de mala calidad .

- En primer lugar la cera utilizada es una mezcla de cera microcristalina y brea lo que produce un color ámbar . No existe una combinación adecuada de ceras y resinas que cumpla con los requerimientos de dureza , plasticidad y viscosidad necesarios la obtención de un buen modelo . Generalmente se usa esta mezcla de cera y brea sin combinarla con algún otro material o cera para mejorar sus propiedades ; sin embargo se tiene una idea vaga de que combinando dos tipos de cera diferentes se obtienen mejores propiedades , la combinación depende de la preferencia de quien realiza los modelos de cera basándose en propiedades cualitativas .
- Continuando con la cera, ésta es derretida en un recipiente o bote a fuego directo y se utiliza una pala de madera para aplicar una agitación eventual . No existe un control de temperatura que garantice en primer lugar que la cera no se queme y en segundo que se vacíe al molde a una temperatura adecuada para un correcto llenado .
- La cera es derretida a la intemperie y está expuesta a contaminación por muchas fuentes , principalmente por polvo , arena y yeso provenientes del mismo taller .
- El investimento o recubrimiento cerámico utilizado no es el adecuado , un mal entendido ahorro en las materias primas provoca errores muy grandes en las piezas. El recubrimiento utilizado no tiene ningún control en cuanto a las características de los materiales , se utiliza arena y yeso económicos sin considerar los requerimientos necesarios para garantizar la obtención de un recubrimiento aceptable.
- No existe control en cuanto a cantidades en los componentes del recubrimiento cerámico utilizado , aunque las materias primas fueran las adecuadas , no hay procedimientos que controlen la composición de la suspensión . Las mezclas se

realizan en base a “paladas “ o bultos sin tomar en cuenta la importancia que tiene el perfecto equilibrio que deben de tener .

- Las suspensiones no reciben el mantenimiento adecuado y están expuestas a contaminación . No se toman en cuenta aspectos tan importantes como el pH y el contenido de sólidos .
- Los moldes son desencerados y cocidos en hornos donde la distribución del calor no es uniforme y no se tiene un control sobre la temperatura . Un mal control de la temperatura provoca gradientes de temperatura que pueden fracturar el molde . Un dato curioso es que los hornos para el cocido y desencerado son construidos individualmente por cada lote de piezas en un mismo investimento cada vez que se realiza una operación . Estos hornos son de forma cilíndrica construidos mediante tabiques refractarios y yeso . Evidentemente la construcción de un horno que pudiera albergar varios investimentos , con una buena transferencia de calor y perfectamente bien instrumentado a la larga traería mayores beneficios y sería mas económico.
- El molde es enfriado después del cocido ; no se consideran los cambios de fase en el cuarzo . Antes del vaciado , el molde se deja enfriar a temperatura ambiente sin embargo el vaciado debe realizarse con el molde por encima de los 700 °C .
- En el vaciado no existen mecanismos de prevención contra contaminación por polvo . Los moldes son acomodados en un contenedor en donde son rodeados por arena , la que fácilmente con una leve vibración o brisa puede caer dentro del molde provocando grandes errores .
- El bronce utilizado se obtiene fundiendo chatarras, las escorias se eliminan justo antes del vaciado y no se tiene control sobre la aleación.

Básicamente como se puede observar , los errores principales son debidos a falta de control , inadecuada aplicación del método y situaciones de ahorro de materiales que en lugar de favorecer perjudican .

CAPÍTULO 6

Pruebas y análisis de resultados

Las pruebas realizadas dependieron de los recursos económicos y de las facilidades de tiempo y maquinaria proporcionados por las empresas involucradas. Las pruebas se tuvieron que concentrar en el desarrollo de combinaciones de ceras, en evaluar los costos utilizando investimento de joyería en el proceso de molde lleno y de conocer la factibilidad de fabricar piezas artísticas por medio del proceso de cáscara cerámica.

Los recursos con los que se contaron para la realización de las pruebas :

Materias primas:

Ceras: Suficientes para realizar las diferentes combinaciones recomendadas en la literatura .

Investimento: Yeso para joyería importado

Aglomerante: Sílice coloidal (muestras proporcionadas por el proveedor)

Arena sílica: Diferentes mallas (muestra proporcionadas por el proveedor)

Bronce: 85 % cobre ; 15 % Estaño

Material y equipo :

Herramienta manual

Equipo de seguridad

Moldes de silicón

Termómetro de mercurio

Hornos de gas para desencerado .

Máquina de vaciado por centrifugado equipada con horno de inducción.

La estancia en las empresas fue limitada y evidentemente faltaría mucho por desarrollar, sin embargo los resultados obtenidos proporcionan un mejor entendimiento de las materias primas y de los procesos en este tipo de fundiciones . Es necesario ver a este trabajo como punto de partida para poder llegar a las soluciones óptimas que solo se descubrirán con la experiencia a través del tiempo.

Las pruebas realizadas nos indican lo que se puede hacer y cuanto costaría hacerlo, pero la práctica diaria en la mayor parte de la ocasiones resultará diferente, por lo que será fundamental llevar estos resultados a un periodo de prueba antes de su implantación total.

6.1.- Modificación en las ceras utilizadas .

Podemos considerar que las características esenciales que debe tener una buena cera para la fabricación de los modelos para este tipo de industria debe de ser la siguiente:

- Un alto punto de fusión ; en primer lugar para que una vez extraído el modelo después de haber inyectado o vaciado la cera en el molde pueda ser almacenada en un lugar a temperatura ambiente sin que sufra deformaciones y en segundo lugar permita al modelista poder trabajar el modelo en el ensamblaje y la eliminación de defectos .
- Buena dureza; el modelo debe de ser suficientemente duro para soportar operaciones como el traslado o la manipulación sin sufrir deformaciones .
- Una diferencia entre su línea de solidus y liquidus mínima; esto facilita la operación de ensamblaje ya que minimiza el tiempo de secado de las uniones .
- Bajos índices de contracción y expansión; para evitar variaciones en las dimensiones o fracturas en el investimento.

Teniendo en mente estos cuatro parámetros se realizaron combinaciones de ceras en función de lo que recomienda la literatura y de la experiencia anterior de los talleres de fundición. Se descarto el uso de las ceras Carnauba u Fisher Tropsh debido a su costo y su variabilidad en el mercado por ser importadas.

La medición de la temperatura se realizó con un termómetro de mercurio de acuerdo a las recomendaciones del capítulo 2. La dureza y los índices de contracción y expansión solo se midieron en forma cualitativa. Los resultados obtenidos fueron los siguientes.

Primera combinación.

Componentes	% en peso
Cera microcristalina	40
Cera Parafínica	40
Cera Candelilla	20

Línea de solidus: 59 °C

Línea de liquidus: 72 °C

$\Delta T = 13 \text{ °C}$

Precio : \$ 19.60 / kg

Características: Dureza media y un índice de contracción aceptable. Color café claro.

Segunda combinación.

Componentes	% en peso
Cera microcristalina	40
Cera 4096 (Polietilenica)	40
Cera Candelilla	20

Línea de solidus : 70 °C

Línea de liquidus : 87 °C

$\Delta T = 17 \text{ °C}$

Precio : \$ 17.80 /kg

Características: Una dureza muy alta y un índice de contracción bajo. Color café claro

Tercera combinación.

Componentes	% en peso
Cera microcristalina	40
Cera Parafínica	40
Cera de abeja sintética	20

Línea de solidus :59 °C

Línea de liquidus : 65 °C

$\Delta T = 6 \text{ °C}$

Precio : \$ 23.00 /kg

Características: Demasiado suave y un índice de contracción muy alto. Color amarillo claro

Cuarta combinación .

Componentes	% en peso
Cera microcristalina	50
Cera Parafínica	50

Línea de solidus : 57 °C

Línea de liquidus : 66 °C

$\Delta T = 9 \text{ °C}$

Precio : \$ 17.50 /kg

Características: Dureza media y un índice de contracción alto. Color blanca

De acuerdo a los resultados obtenidos la utilización de la primera combinación o la segunda a pesar de tener un ΔT elevado, proporcionaría los requerimientos necesarios para poder trabajar y en base a la experiencia en la utilización de estas combinaciones poder ajustarlas mas acorde con las necesidades, es importante mirar los resultados obtenidos en la cuarta combinación ya que la mezcla de parafina con cera microcristalina sin tener buenas propiedades tiene un ΔT muy bajo, lo que nos lleva a dos conclusiones; en principio, la modificación de la primera combinación aumentando las concentraciones de estas dos ceras o pensar en la posibilidad de obtener una cera exclusivamente para el soldado y ensamblaje de piezas o modelos fabricados en alguna otra combinación.

El siguiente paso sería buscar una combinación de cuatro ceras o en su defecto la utilización de los aditivos y rellenos recomendados en el capítulo 2 lo que permitirá mejorar un poco las propiedades; sin embargo la mayoría de las piezas artísticas no requieren tolerancias ajustadas, ni ensambles complicados por lo que no es recomendable tratar de obtener propiedades que realmente no se necesitan .

6.2. Método de molde lleno con investimento de joyería y vaciado por centrifugado .

El yeso actualmente usado en la fabricación de esculturas es el utilizado en la industria de la construcción. El precio del yeso utilizado en la joyería es aproximadamente 12 veces el del yeso utilizado en la industria de la construcción. Es conveniente evaluar los resultados obtenidos con este yeso debido a que puede ser factible su uso en dos casos; cuando se tenga poco tiempo para preparar el investimento normal o la cáscara cerámica y cuando el valor de la comercial de la pieza se lo bastante elevado para poder soportar el costo del investimento .

El fabricante de este yeso solo da información para la preparación de investimento hasta un cubilete de aproximadamente 20 cm de diámetro por 25 cm de altura , por lo que no es recomendable utilizarlo para piezas mayores.

Parámetros de la prueba :

Pieza a realizar: Mujer sentada

Dimensiones del cubilete : 6 “ de diámetro por 8 “ de altura .

Investimento utilizado : Satin cast regural, Kerr investement .

Descripción de la prueba :

- 1.- El modelo de cera se preparó uniéndolo a las alimentaciones y montándolo en la base de plástico o hule del cubilete (peana)
- 2.- Se realizó la mezcla recomendada por el fabricante de investimento y agua para posteriormente vaciarlo en el cubilete con el modelo de cera
- 3.- El yeso se dejó fraguar 2 días
- 4.- Se desmontó la peana y el cubilete se introdujo al horno al ciclo de desencerado
- 5.- Se pasó a la etapa del vaciado por centrifugado

Preparación del investimento :

El número de libras de investimento se obtiene de dividir las pulgadas cúbicas del cubilete entre 20 .

$$V = 0.7854 \times d^2 \times h = 226.19 \text{ pulg}^3 = \text{ci}$$

$$W = \text{ci} / 20 = 11.30 \text{ lb} = 5.125 \text{ kg}$$

Interpolando de la tabla recomendada por el fabricante se tiene que el contenido de agua es de :

1948 ml para fundiciones pesadas

2052 ml para fundiciones regulares

El valor utilizado fue para fundiciones regulares .

La mezcla se realizó manualmente sin aspirado en un tiempo aproximado de 4 minutos .

El ciclo de desecado fue el siguiente .

Tiempo (horas)	Temperatura (°C)
1	150
2	400
2	800

Vaciado del metal :

El metal fue fundido en el horno de inducción de la máquina de vaciado en un crisol de grafito alcanzando una temperatura de vaciado de aproximadamente 1400°C^1 . El vaciado del metal toma unos cuantos segundos una vez que empieza a trabajar la máquina.

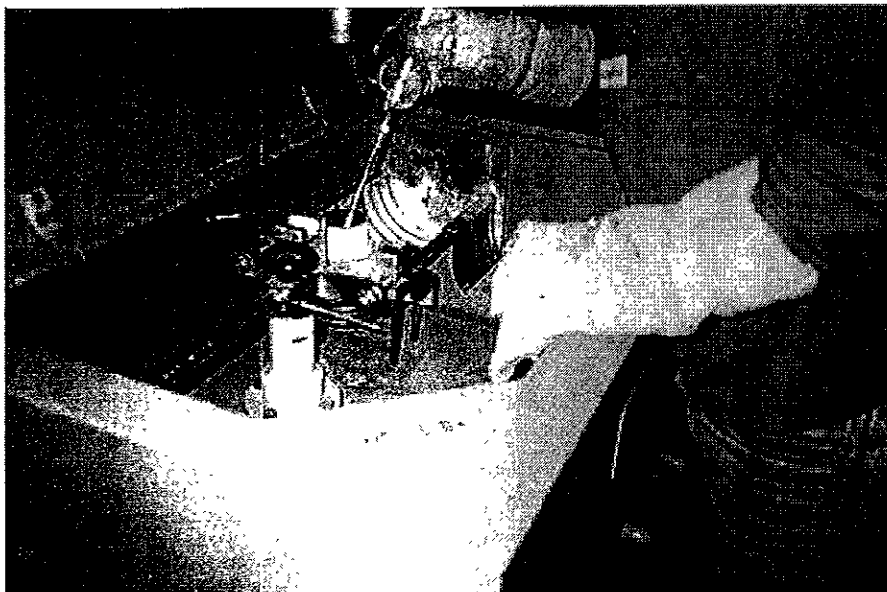


Figura 4. Máquina utilizada para el vaciado por centrifugado

La medición de esta temperatura se realizó de acuerdo al código de colores .

Los resultados obtenidos en esta prueba muestran una enorme adelanto en el acabado superficial de las piezas. Aun con este método y con estricto control de las condiciones de operación se presentaron pequeños defectos superficiales en forma de cortinillas; es decir leves fracturas en el investimento, podemos estimar que la reducción de defectos superficiales con respecto a las técnicas convencionales es del 80 % .

Se debe tener mucha precaución en el ciclo de desencerado y procurar que el calentamiento del cubilete sea uniforme, ya que en pruebas realizadas en donde se descuidó este aspecto se fracturó gravemente el investimento.

6.3. Utilización del proceso shell.

La realización de esta prueba es demostrar en primer lugar que es posible fabricar piezas de artesanía con la utilización del proceso shell y en segundo lugar poder demostrar que es económicamente viable.

Descripción de la prueba :

- 1.- El modelo de cera tendrá que se preparó adaptándole un sostén de alambre para poder sumergirlo en la suspensión y poder aplicarle el estuco sin tocarlo.
- 2.- Se preparó la suspensión y las arenas para el estuco.
- 3.- Se siguió una secuencia para la aplicación de las capas con un tiempo de secado entre capa de 30 minutos .
- 4.- Una vez seca la última capa de cáscara cerámica se procedió a montarla en un peana de un cubilete de 4“
- 5.- La cáscara fue recubierta con yeso para que este sirviera de soporte para el desencerado y colado.

La utilización del proceso shell implica un control en las materias primas y en los procedimientos muy minucioso que garantice la obtención de piezas de calidad. En primer lugar se tiene que verificar las propiedades de las materias primas, su composición y determinar las cantidades a utilizar por medio de un balance de masas.

Las materias primas utilizadas para este proceso fueron :

Sílice coloidal . Con una concentración del 30 % de partículas sólidas

Arena sílica : Malla 200 o malla 100/110.

Agua destilada .

De acuerdo a lo establecido en el capítulo 3, la suspensión que proporciona el mayor porcentaje de líquido es:

10 % de sólidos del aglomerante

30 % de líquido (Agua)

60 % de refractario

Pudiendo en determinado momento poder ajustar los parámetros del aglomerante y del refractario. Se hace esta consideración tomando en cuenta la evaporación del

agua que de presentarse no afectaría de manera considerable el desarrollo de la suspensión , ya que su parte proporcional puede disminuir hasta el 15 % .

Realizando el balance de masas obtenemos lo siguiente :

Datos

Materia primas .

- A = Sílice coloidal .

Contenido : 30 % de partículas sólidas (ps)
70 % de agua (a)

- B = Agua (a)

- C = Arena refractaria (ar)

Producto deseado .

Contenido : 10 % de partículas sólidas (ps)
30 % de agua (a)
60 % de arena refractaria (ar)

Análisis .

Realizando un balance de masas entre las materias primas y el producto obtenemos un sistema de tres ecuaciones .

Partículas sólidas .

$$0.30 A = 10.00 \quad \text{Despejando} \quad A = 10.0 / 0.30 = 33.33$$

Agua

$$0.70 A + B = 30.0$$

$$0.70 (33.33) + B = 30.0$$

$$B = 30 - 23.33 = 6.67$$

Arena refractaria

$$C = 60.0$$

En donde A, B y C son los porcentajes a agregar de cada una de las materia primas. Concluyendo, tenemos que ; la suspensión debe contener:

33.33 % de sílice coloidal

60.00 % de arena refractaria

6.67 % de agua .

El total de sílice coloidal utilizado fue de 200 gr, lo que arrojó un total de 600 gr de suspensión aproximadamente, con lo que se generaron 7 cascaras cerámicas de 3 mm para piezas con un peso total en bronce de 300 gr y con un tamaño suficiente para ser montadas en un cubilete de 4" de diámetro y 5" de altura. El remanente de suspensión fue de 260 gr.

Las pruebas se realizaron de manera manual, con lo que resultó un proceso tardado con respecto a las técnicas convencionales sin embargo es un proceso en el que fácilmente se puede implementar maquinaria ya sea comprada o desarrollada internamente.

En el proceso de generación de las capas se encontró que es difícil la formación de la primera capa, sin embargo la literatura no anticipa nada al respecto. Evidentemente será necesario la búsqueda de un agente humectante que ayude a la formación de la primera capa. Para capas subsecuentes la adherencia es mucho más fácil debido a que se soportan en las primeras capas.

La secuencia de capas realizada fue la siguiente:

- 1.- Refractario de la suspensión : 200 mallas
Estuco : 200 mallas
- 2.- Refractario de la suspensión : 200 mallas
Estuco : 200 mallas
- 3.- Refractario de la suspensión : 100/110 mallas
Estuco : 100/110 mallas
- 4.- Refractario de la suspensión : 100/110 mallas
Estuco : 100/110 mallas
- 5.- Refractario de la suspensión : 100/110 mallas
Estuco : 50/60 mallas

La serie de capas nos dieron un espesor recomendado de aproximadamente 3 mm . Se detectaron pequeños espacios críticos a simple vista como bordes o esquinas en los que la formación de la cáscara no fue uniforme. Los errores en la formación de la cáscara se remediaron manualmente en las zonas afectadas.

El ciclo de desecado utilizado fue el siguiente :

Tiempo (horas)	Temperatura (°C)
1	150

1	200
1	350
1	400
2	650

El ciclo de desencerado se llevó a cabo con aumentos de temperatura graduales con el fin de controlar las expansiones bruscas que pudieran fracturar la cáscara. El vaciado se realizó por gravedad debido a que las piezas tenían espesores relativamente gruesos y no necesitaban el vaciado por centrifugado.

Los resultados obtenidos fueron muy variables. En apariencia todos los investimentos fueron exitosos sin embargo hubo pruebas en las cuales las grietas fueron de tal magnitud que no permitieron la formación de la pieza. En otros resultados la formación de la pieza se dio pero con una buena cantidad de defectos , en su totalidad fueron defectos debidos a grietas en la cáscara cerámica que se detuvieron en algún lugar del yeso, la mayor parte de estos defectos se presentaron en forma de cortinillas que fácilmente se pudieran desaparecer con un leve pulido .

Por el otro lado se obtuvieron resultados magníficos, es decir con cero defectos , las pruebas muestran una copia fiel de la cera utilizada. Esta variabilidad de resultados indica la necesidad de un mayor empeño para identificar donde se cometieron los errores y lograr obtener los parámetros esperados .

Conclusiones

Los objetivos planteados al principio de este trabajo fueron el de optimizar los procesos de fundición a la cera perdida sin grandes erogaciones de dinero, bajo la perspectiva de tener tres niveles de implementación a corto, mediano y largo plazo. Lo que buscaba dicha optimización era básicamente mejorar la calidad, disminuir los costos de la producción, incrementar el margen de utilidad y reducir el personal requerido, en otras palabras, hacer el negocio más productivo.

A pesar de sus orígenes ancestrales la fundición a la cera perdida es un método vigente, en donde existe un sinfín de posibilidades para nuevos desarrollos. Tanto el método de molde lleno, como el método shell encuentran cada día nuevos campos de aplicación y representan una opción muy rentable para piezas demasiado intrincadas. En el desarrollo de este trabajo pude constatar que cualquiera de los dos métodos llevados a la práctica con un estricto control, puede dar excelentes resultados, sin embargo, creo que el método shell representa una mejor opción debido al ahorro en materiales, facilidad en el manejo y la posibilidad de almacenamiento en verde que tienen las cáscaras cerámicas.

La manera en que trabaja la industria de fundición artesanal en México, a pesar de distinguirse por fabricar piezas de gran valor artístico, tiene muchos puntos de oportunidad, algunos de ellos son ahorros mal entendidos que se traducen en pérdidas en tiempo, dinero y esfuerzo debido al retrabajo y otros debido a la mala aplicación de las técnicas o desconocimiento de éstas.

La implementación de las nuevas tecnologías o la mejora de las existentes es un proceso que requiere de todo el esfuerzo tanto de los empresarios, como el de los obreros y artesanos. De acuerdo a lo establecido en el capítulo 5, se sugiere la siguiente división para la optimización del proceso de acuerdo al tiempo y los recursos económicos requeridos :

a) Primera etapa. En esta etapa se utilizarán los recursos existentes en la empresa o se pondrán materias primas sustitutas que permitan mejorar la calidad.

- Utilizar nuevas combinaciones de ceras
- Sea cual fuere el método de investimento a utilizar se debe aplicar un recubrimiento primario con arena fina para mejorar la calidad superficial de las piezas
- Mejorar las áreas de almacenamiento de las materias primas, con el propósito de evitar contaminación entre estas
- Utilizar los bronce y latones adecuados

b) Segunda etapa. En esta etapa se necesitará de un pequeño esfuerzo en recursos económicos y humanos.

- Compra de un tanque de fusión de cera con control de temperatura
- Implementación del proceso shell, lo que se traduce en la compra de equipo para el mantenimiento de la suspensión, equipos de rocío para la suspensión y el estuco y un mecanismo transportador de las cáscaras cerámicas.
- Fabricación de un horno para el desencerado y cocido .
- Compra de máquinas de vaciado por centrifugado o vaciado por succión
- Establecimiento de los procedimientos de medición y control adecuados

c) Tercera etapa. Se requiere de una fuerte inversión .

- Podemos incluir todas las tecnologías mencionadas en el capítulo 3, esto sin embargo requiere de un análisis mas profundo.

Un punto importante que no se debe dejar de mencionar es la seguridad. Es de vital importancia cuidar la salud de los trabajadores y evitar al máximo los accidentes de trabajo. Al final de cuentas nada esto sería posible sin los recursos más importantes de una empresa, es decir, los trabajadores.

Considero que los resultados del trabajo práctico de este primer esfuerzo fueron favorables, ya que arrojaron información muy valiosa que encuentra aplicación de una manera inmediata, evaluando las pruebas realizadas podemos concluir que:

1.- El cambio de las ceras utilizadas actualmente por las propuestas en este trabajo no elevarían el costo del producto y se obtendrían mejores modelos, por consiguiente mejores piezas fundidas. Se debe poner mucha atención al hacer la mezcla de ceras para que siempre tengan las mismas propiedades.

Es indispensable adaptar un mecanismo recuperador de ceras en el horno de desencerado ya que nos permitiría tener un ahorro y no generar gases contaminantes al ambiente .

2.- La segunda prueba presenta dos conclusiones muy importantes. La primera es con respecto al uso del yeso para joyería, podemos afirmar que este yeso eleva enormemente el costo del producto, sin embargo la preparación del investimento se realiza en cuestión de minutos y el acabado superficial que se obtiene es excelente; por lo que considero, es una muy buena opción cuando el tiempo es un factor importante o cuando el valor artístico del producto sea tal, que no afecte considerablemente el margen de utilidad.

La segunda conclusión de esta prueba es que el uso del vaciado por centrifugado es ampliamente recomendable para la fabricación de piezas chicas, se puede reducir la

cantidad de las alimentaciones en un 60 % y su grosor a menos de la mitad de lo que se utilizarían en el vaciado por gravedad. Asimismo, los espesores de la pieza pueden ser reducidos notablemente, inclusive por debajo de los 3 mm. Sin embargo, se requiere de cierta inversión inicial para adquirir la maquinaria.

3.- La conclusión de la tercera prueba representa la certeza de que es posible producir piezas por el método shell a precios accesibles. Los proveedores de las materias primas son mexicanos y los productos tienen buena disponibilidad en el mercado debido a que son utilizados para otros procesos industriales.

Los resultados nos indican que es un proceso que requiere del control minucioso de todos los parámetros involucrados. Si existen fallas en el proceso, se obtienen grandes pérdidas, sin embargo, si es exitoso, la pieza fundida presenta defectos mínimos con lo cual se obtendría un ahorro considerable en el retrabajo.

Es difícil evaluar los costos utilizando este nuevo método, en primer lugar se requiere de una inversión inicial para tanques de almacenamiento de la suspensión, sistemas de aplicación de la suspensión y del estuco así como un mecanismo transportador de las cáscaras cerámicas. Aún así, como ya se menciona en los primeros capítulos, esta técnica es ideal para la automatización.

Sin embargo podemos comparar las materias primas involucradas, mientras que el costo del investimento, como el que actualmente se usa para las piezas producidas, hubiera sido de aproximadamente \$ 5.00; con el método shell la cáscara cerámica tuvo un costo de \$ 7.25, lo que nos da un incremento del 45 %.

Este incremento es aparente, ya que mientras en promedio un obrero se tardaría aproximadamente 4 horas en corregir una pieza de este tamaño producida mediante la técnica convencional, con la enorme reducción de defectos que presenta el método shell se reducirá el tiempo de retrabajo a menos de una hora.

Considero que se debe de estar al pendiente de la utilización de los sistemas CAD/CAM para la producción de esculturas ya que en un futuro no muy lejano pueden estar al alcance, de acuerdo a información recibida de última hora estos métodos ya se están utilizando en investigaciones arqueológicas y en la producción de modelos para la industria filmica.

Otro punto de oportunidad es el desarrollo de nuevos materiales para la fabricación de los modelos. Actualmente la cera y el polietileno son los más utilizados, sin embargo, la aparición de nuevas técnicas como la fundición a la espuma perdida que utiliza el poliestireno expandible para la fabricación de modelos indica nuevas posibilidades.

Evidentemente los conocimientos científicos y tecnológicos deben estar mezclados con una retroalimentación de conocimientos empíricos que permitan encontrar la solución más adecuada a cada problema en específico. Este trabajo se debe considerar como el punto de partida para el cambio de los viejos sistemas de producción a métodos más eficientes.

Como conclusión general puedo decir que en esta época de crisis en donde las pequeñas y medianas empresas de México tienen que cerrar sus puertas debido a las condiciones actuales del mercado, es necesario plantear programas de vinculación con las universidades públicas para poder generar desarrollos tecnológicos que hagan a estas empresas más competitivas y que puedan seguir siendo fuentes de trabajo y de riqueza para el beneficio de nuestro país.

REFERENCIAS

1. Anselment, George. Et al. "Grinding operations for investment casting: keeping an eye on cost", *Modern Casting*. V. 79. Noviembre 1989. p. 48-49.
2. Argueso, John. "Frequently encountered problems in a wax room", *Modern Casting*. v. 83. Agosto 1993. p. 32-33.
3. Armitage, S. "SPC leads to the right mix for investment casters", *Modern Casting*. V.79. Agosto 1989. p. 39-42.
4. "Basic elements of feeding investment castings", *The American Foundrymen's Society, Inc.* 1988
5. Beazley, Tammy. "Making the Oscar: metal's award winning performance", *Journal of Metals*. V. 47. Marzo 1995. P.10-11
6. Beffel, M et.al. "Computer simulation of investment casting processes". *Journal of Metals*. V. 41. Febrero 1989. p. 27-30.
7. Bralowe, Paul. "Wealth of molding methods meet every casting need", *Modern Casting*. V. 79. Junio 1989. p. 53-56.
8. Brown, John. " The lost foam casting process", *Metals and Materials*. V.8. Octubre 1992. p.550-555.
9. Brown, J.R. " The Evaporative Casting Process", *The Foundryman*. Diciembre 1988. p. 560-566
10. Cohen, Adam. "New investment casting method combines CAD and CNC", *Modern Casting*. V. 82 . Septiembre 1992 p. 46.
11. "Developments in precision castings in Japan and South Korea.", *Metallurgia*. V. 57. Abril 1990. p. 182.
12. Dick James. "Process controls of investment casting slurries and shell molds", *Modern Casting*. V. 76. Octubre 1986. p. 23-25.
13. Dickens, P. "Rapid prototyping for investment casting", *Metallurgia*. V. 60 Junio 1993. p. 213 – 214.
14. Draper,Doug.Et al. "Laser welding of wax patterns", *Modern Casting*. V. 77. Octubre 1987. p. 24-26.
15. Hendricks, Michel. "Getting more from your ceramic shell slury", *Modern Casting*. V. 80. Agosto 1990. p. 32-33.

16. Hines, Albert. Et al. "An integrated procedure for modeling investment castings", *Journal of Metals*. V.47. Octubre 1995. p.64- 68.
17. Hines, Albert. "Computer-aided development of an investment casting process.", *Journal of Metals*. V. 45. Octubre 1993. p. 29-32.
18. Horne, Lee. "A study of traditional lost wax casting in India", *Journal of Metals*. V.42. Octubre 1990 p. 46-47.
19. "Improved investment casting ,mould production.", *Metallurgia*. V.61. Junio 1994 p.198.
20. "Investment casting's future soars", *Modern Casting*. V. 78, Octubre 1988. p. 27.36
21. "Investment casting process", *Metallurgia*. V. 51. Abril. 1984. p.133.
22. Kirkwood, Howard. "Investment casting without tolling", *Modern Casting*. V.79. Octubre 1989. p. 58.
23. Krohn, Barbara. "The art and science of investment casting.", *Modern Casting*. V.74. Diciembre 1984. p.22-26.
24. LaVoie, Larry. "Recent developments in precision castings" *Metallurgia*. V. 60. Junio 1993. p.216.
25. "Lost wax process in jewellery casting", *Metallurgia*. V. 53. Enero 1986. p.32.
26. Marie, Ann. "Optimizing control of shell cracking in investment casting", *Modern Casting*. V. 77. Febrero 1987. p.30-33.
27. Matzek, Charles. "Using stucco more effectively", *Modern casting* .V.78. Febrero 1988. p.50.
28. Mitchell, S "Wax an historical pattern for tomorrow's progress", *Modern Casting*. V.79. Abril 1989 p. 74.
29. Mueller, Boyd. "A new paradigm: the investment casting cooperative arrangement.", *Journal of Metals*. V. 46. Septiembre 1994. p. 17-20
30. "New generation binders for ceramic shells", *Metallurgia*. V. 59. Enero 1992. p. 36.
31. Ostrowski, Richard. "Identifying causes of investment shell related defects", *Modern Casting*. V. 77. Noviembre 1987. p. 29-31.
32. Philbin, Matthew. "Signicast aims for the future", *Modern Casting*. V.85. Octubre 1995 p. 33-36