



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“PARAMETRIZACIÓN, PRUEBA E IMPLEMENTACIÓN DE
PARÁMETROS EN LA FABRICACIÓN DE CORAZONES PARA
FUNDICIÓN POR EL PROCESO SHELL.”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO METALURGICO

P R E S E N T A

RAÚL ANTONIO MORALES DOMÍNGUEZ



MÉXICO, CIUDAD DE MÉXICO, 2016



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: ARTURO ALEJANDRO SANCHEZ SANTIAGO

VOCAL: AGUSTIN GERARDO RUIZ TAMAYO

SECRETARIO: LUIS DARIO ESCOBAR MEJIA

1ER. SUPLENTE: LUIS ENRIQUE JARDON PEREZ

2DO. SUPLENTE: EUSEBIO CANDIDO ATLATENCO TLAPANCO

CROUSE-HINDS, UNA EMPRESA DE EATON / FACULTAD DE QUÍMICA UNAM, EDIFICIO D, LABORATORIO DE ARENAS

ASESOR DEL TEMA: M. EN I AGUSTIN GERARDO RUIZ TAMAYO

SUPERVISOR TÉCNICO: M. EN M EUSEBIO CANDIDO ATLATENCO TLAPANCO

SUSTENTANTE: RAÚL ANTONIO MORALES DOMÍNGUEZ

ÍNDICE

Capítulo 1. Introducción.....	4
1.1 Hipótesis.....	5
1.2 Objetivos.....	5
Capítulo 2. Antecedentes.....	6
2.1 Cajas de Corazones.....	7
2.2 Máquinas Sopladoras.....	8
2.3 Corazones al Aceite.....	9
2.4 Proceso Silicato CO ₂	10
2.5 Corazón en Cáscara (Shell-Core).....	11
Capítulo 3. Descripción al proceso Shell.....	12
3.1 Características de las Arenas para Shell.....	12
3.2 Efecto de la forma y tamaño de Grano.....	12
3.3 Resinas para Corazones Shell.....	15
3.4 Mezclas de arena para Corazones Shell.....	15
3.5 Efecto de las variables en el proceso.....	17
3.8 Control de calidad para corazones Shell.....	20
Capítulo 4. Mejora Continua.....	21
4.1 Mejora Continua para Procesos.....	21
4.2 Diagrama de Causa-Efecto.....	23
4.3 Diagrama de Dispersión.....	25
4.4 Diagrama de Pareto.....	28
Capítulo 5. Procedimiento Experimental.....	30
5.1 1ª Etapa-Adquisición de Datos.....	30
5.2 2ª Etapa-Tratamiento y Análisis de los datos obtenidos.....	31
5.3 3ª Etapa-Prueba y Validación de los parámetros.....	32
5.4 4ª Etapa-Pruebas Complementarias.....	32
Capítulo 6. Resultados y Discusión.....	34
6.1 Influencia de la Inversión y Curado en los tiempos de trabajo.....	34
6.2 Influencia de la Inversión y Curado en el peso final de las piezas.....	39
6.3 Evaluación de la Propuesta.....	50

6.4 Pruebas Complementarias.....	54
Conclusiones.....	59
Bibliografía.....	60
Anexo 1 Información Obtenida para las diferentes Etapas Experimentales.....	61

Capítulo 1. Introducción

Existe una gran cantidad de variables que causan defectos en las piezas fabricadas por fundición, muchas de estas causas se encuentran descritas en libros que han sido tratados por expertos durante años. El proceso Shell para la fabricación de corazones es una de las posibles causas de estos defectos, esto se debe a que los corazones con escasas propiedades pueden llegar a fracturarse, lo que genera una pérdida de funcionalidad del corazón y un menor rendimiento del metal.

Generalmente la forma de fabricación de corazones se no tiene un control estricto, por lo que la operación de las máquinas y al final la fabricación de corazones es resultado de la experiencia del operador en turno.

Para tener un control en la fabricación de corazones y así mismo conseguir la reproducibilidad del proceso se sugiere una recolección de datos, la finalidad de este trabajo es la de llegar a reproducir condiciones y resultados constantes. La recolección de datos es algo crítico en el control de un proceso, frecuentemente esta actividad es olvidada, esta recolección de información tiene como finalidad mantener un registro de la arena, resina y configuración de la máquina, por lo que esta información debe de ser la correspondiente a la producción de un corazón de calidad. Hay una gran cantidad de variables que intervienen en la fabricación de un corazón de calidad, por lo que una lista de estas variables sería muy grande y fácil de olvidar.

El método Shell de fabricación de corazones, corresponde a la elaboración de corazones por medio del proceso de caja caliente o *Hot Box* en inglés, en este proceso se requiere que la caja para corazones se encuentre a la temperatura necesaria para poder fraguar una resina, la resina empleada para este proceso se recubre la parte exterior del grano de arena.

La temperatura tiene como efecto el fraguado de la arena, anteriormente se mencionó esto, por lo que mantener una distribución uniforme de la temperatura en la caja para corazones es crítica, permitiéndole al corazón tener un endurecimiento homogéneo.

El desarrollo de este trabajo comienza desde la recolección de información y tratamiento de la misma, logrando proponer configuraciones adecuadas para cada uno de las piezas seleccionadas, obteniendo corazones de calidad con resultados reproducibles.

1.1 Hipótesis

El control de parámetros para el proceso Shell tiene como resultado una reproducibilidad sistematizada.

1.2 Objetivos

1. Obtener el efecto de las variables en el proceso de corazones Shell.
2. Determinar los parámetros de trabajo óptimos para las piezas elegidas.
3. Implementar el control de proceso en corazones Shell.
4. Proponer alternativas al control y optimización en la fabricación de corazones Shell.

Capítulo 2. Antecedentes

Los procesos de moldeo de piezas se dividen en dos categorías de acuerdo al tipo de molde:

1. Molde Unitario
2. Molde Permanente

Los procesos de fundición con molde unitario, éste se destruye para obtener la parte fundida, como se requiere un nuevo molde por cada nueva pieza colada, las velocidades de producción son limitadas, ya que se requiere más tiempo para hacer el molde que la fundición en sí, sin embargo, hay máquinas semi y automáticas que pueden producir moldes y piezas a grandes velocidades. El otro tipo de molde es de tipo permanente, este molde es de metal, ya que permite usarlo de forma continua en la fundición, debido a sus propiedades, este tipo de moldes tiene una mayor precisión en sus piezas.

Los procesos de fundición emplean generalmente moldes unitarios, este tipo de molde se hace con arena en verde, por lo tanto se ha convertido en el proceso más usado. El moldeo en arena tiene la facilidad de poder ser usado en casi todas las aleaciones, y también se le puede emplear con metales que tienen altas temperaturas de fusión, las piezas fundidas pueden ser desde un tamaño pequeño hasta piezas con tamaños grandes, debido a lo anterior este proceso de moldeo es versátil.

Para poder obtener una pieza metálica por fundición, es necesario vaciar el metal fundido a un molde, posteriormente se deja solidificar y enfriar, al finalizar el enfriamiento se desmolda para sacar la pieza, posteriormente pasa por un proceso de limpieza e inspección, dependiendo de lo demandado por el cliente algunas aleaciones pueden ser tratadas térmicamente para mejorar sus propiedades.

La fundición en arena requiere una placa modelo con las dimensiones requeridas del tamaño de la pieza a obtener, también la placa modelo será ligeramente más grande, ya que considera la contracción, también la tolerancia para el maquinado de la pieza final, el uso de recubrimiento para el molde con pintura refractaria, ángulos de salida para la pieza, en caso de necesitar un hueco se agrega el espacio para un corazón. La fabricación de un modelo puede hacerse en diferentes tipos de materiales, metal, plástico y madera son los más comunes [1].

La madera tiene la facilidad de ser trabajada y de tomar forma, sin embargo su desventaja viene a ser el desgaste por abrasión de la arena empleada para crear el molde, por lo tanto, los moldes de madera se usan para piezas de baja producción. El modelo metálico tiene una mayor resistencia a la abrasión, debido a esto el modelo metálico es empleado en grandes producciones, su inconveniente está en el costo por modelo. Los modelos de plástico se encuentran entre la madera y el metal en propiedades. El material que se elija en el modelo dependerá de la cantidad de piezas por producir.

Si la pieza a obtener posee huecos o superficies internas, entonces es necesario un corazón para poder formar estos huecos. Un corazón es un modelo al tamaño de los huecos por formar, el corazón se coloca dentro del molde, delimitando de esta forma la parte exterior e interior de la pieza. Así como las placas modelo incluyen la contracción y maquinado en su diseño, el corazón también ha de incluir estos valores en su dimensionamiento.

La fabricación de un corazón se realiza con arena sílica, la cual debe de ser nueva, esto hace que este proceso sea costoso, un corazón debe de cumplir con lo siguiente:

- Resistencia al choque
- Resistencia a la abrasión
- Resistencia a la tensión
- Permeabilidad
- Colapsabilidad
- Refractoriedad

En la actualidad existen varias formas en las que podemos fabricar un corazón [2]:

2.1 Cajas de Corazones

Las cajas para este método pueden ser de madera, metal o plástico, en donde las dos secciones de la caja son acoplables por medio de pernos o guías, en la parte hueca la arena es apisonada; para extraer el corazón se separan las secciones de la caja y se hace vibrar la sección donde quedó el corazón, la vibración sirve para retirar el corazón fabricado.



Ilustración 1. Caja para Corazones (2015). Recuperado de <http://www.sheardown3d.co.uk/wp-content/uploads/2015/12/CORE-BOX1-LRG.jpg>

2.2 Máquinas Sopladoras

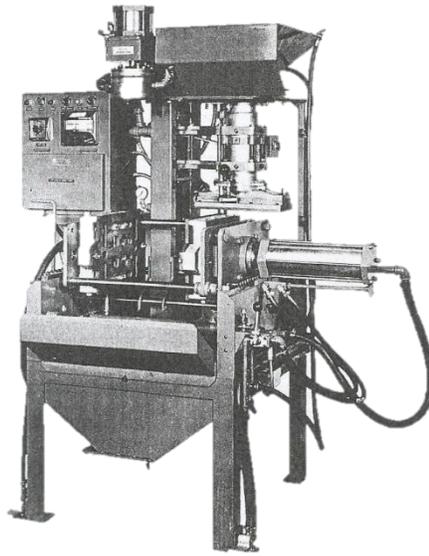
Estas máquinas soplan la arena mediante aire comprimido a través de la placa para corazón, la arena para corazón queda empacada de forma uniforme y firme en la caja, la capacidad de producción va de baja a media.



Ilustración 2. Sopladora de Corazones Autofraguantes Palmer CoreMaker™ Serie-CM (2016). Recuperado de <http://www.palmermfg.com/images/img18F.jpg>

2.3 Corazones al Aceite

Este proceso requiere el uso de aceites para preparar la mezcla de arena, posteriormente la arena se calienta en un rango de 400° a 500°C, logrando así un efecto fraguante entre la arena y el aceite. El inconveniente de este método es que el corazón no puede ser almacenado por periodos largos, ya que absorbe humedad del medio ambiente.



*Ilustración 3.*Dietert Harry (1966). Máquina de Caja caliente.[Fig.26.2]. Recuperado de Foundry Core Practice

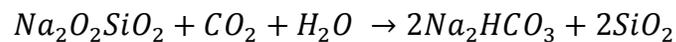


*Ilustración 4.*Corazones al Aceite. Recuperado de <http://2.imimg.com/data2/WD/LD/MY-3959714/oil-sand-cores-500x500.jpg>

2.4 Proceso Silicato CO₂

Este proceso emplea silicato de sodio y dióxido de carbono. La arena puede ser de cualquier granulometría, la cantidad de silicato de sodio agregado es con respecto al peso de la carga de arena, la cual generalmente va de 2 a 16%, el tiempo de mezclado para el silicato de sodio y la arena es de 5 minutos aproximadamente.

A la arena se le da forma apisonando la mezcla en la caja, al corazón se le hacen unos cuantos respiraderos, de esta manera el dióxido de carbono puede ser inyectado y favorece la reacción con el silicato de sodio, esta reacción endurecerá al corazón.



Al igual que los corazones al aceite, este tipo de corazón absorbe humedad del ambiente, por lo que se recomienda emplearlos inmediatamente para evitar defectos en las piezas.

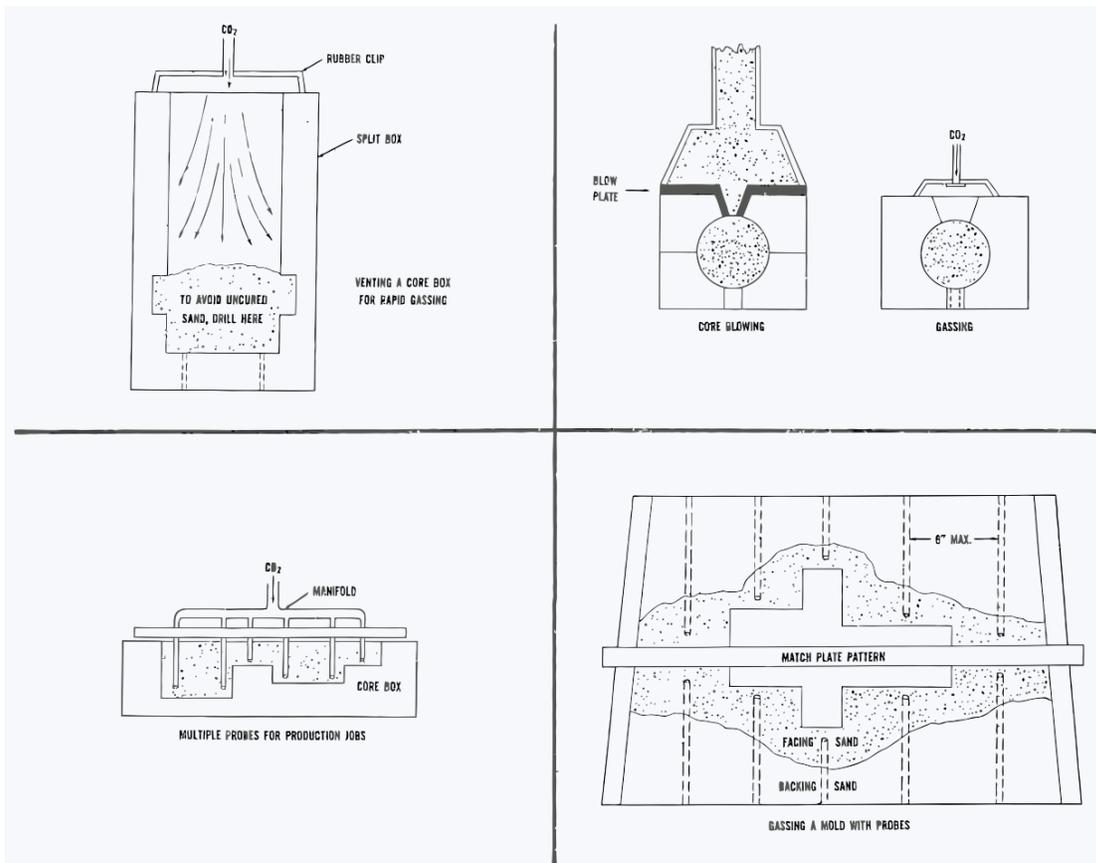


Ilustración 5. Dietert Harry. (1966). Arreglos para la inyección de CO₂. Recuperado de Foundry Core Practice



Ilustración 6. Piezas Resultantes al proceso de Silicato CO₂ (2013). Ferrari Core Making. Recuperado de <http://www.hansberg.com/wp-content/uploads/2013/05/FERRARICoremaking06-470x264.jpg>

2.5 Corazón en Cáscara (Shell-Core)

En este proceso la arena es recubierta con resina fenólica, ésta contiene un catalizador de hexametilentetramina. Previamente la caja es precalentada a una temperatura entre 232° - 343°C y posteriormente la arena es vaciada en la caja para corazones.

Por último el proceso Shell tiene los siguientes beneficios:

- ✓ Buen acabado superficial en la parte donde va el corazón
- ✓ Exactitud dimensional
- ✓ Almacenamiento indefinido
- ✓ Gran volumen de producción
- ✓ Se puede ahorrar arena en función del espesor de la cáscara



Ilustración 7. Corazón Shell. Recuperado de <http://4.imimg.com/data4/LM/XO/MY-9591886/shell-core-500x500.jpg>

Capítulo 3. Descripción al proceso Shell

El proceso de fabricación de corazones por el método Shell consta de una gran cantidad de variables, algunas de estas variables son en las características de la arena, también el tamaño y forma de grano, las resinas empleadas para recubrir la arena, las propiedades de la mezcla de arena recubierta y por último los parámetros de las máquinas. En este capítulo se profundizará la descripción a las variables previamente mencionadas.

3.1 Características de las Arenas para Shell

Todos los procesos de elaboración de corazones poseen algo en común, están basados en el tipo de arena con la que se realizan los corazones. Para la producción de corazones por el proceso Shell esta debe de cumplir con las siguientes características [3]:

- Resistencia térmica
- Baja variación dimensional por dilatación
- Textura similar al acabado superficial que se desea obtener
- Tener una buena textura después de ser fraguada

Debido a lo anterior cada fundición debe evaluar la arena que se utiliza en la producción de corazones, las propiedades que se determinan son la distribución del tamaño de grano, pérdidas por ignición, permeabilidad, resistencia en verde, resistencia a la tracción en frío y caliente.

3.2 Efecto de la forma y tamaño de Grano

Dependiendo de la forma del grano, es posible tener diferentes efectos, por lo que la arena para corazones se divide en tres tipos:

- Grano Redondeado: Este tipo de grano posee una buena permeabilidad, esto se debe a que el contacto es mínimo entre los granos. Requiere una menor cantidad de resina para tener una alta resistencia en frío, sin embargo en corazones calientes, las resistencias para moldes y corazones son bajas.
- Grano Angular: El grano angular posee la menor permeabilidad después del fraguado entre los tres tipos de grano, por lo que procesos de caja fría este

tipo de arena poseerá muy bajas resistencias, y en procesos de caja caliente poseerá grandes resistencias sin adicionar un extra de resina.

- Grano Subangular: Las arena con forma subangular tienen la mejor relación entre una cantidad baja de resina, media resistencia en frío y una alta resistencia en caliente.

Por otra parte, el tamaño de grano se relaciona directamente con la cantidad necesaria para poder fabricar corazones fríos o calientes, a mayores tamaños de grano la cantidad de resina empleada es mayor, también a tamaños de grano más grandes los finos disminuyen.

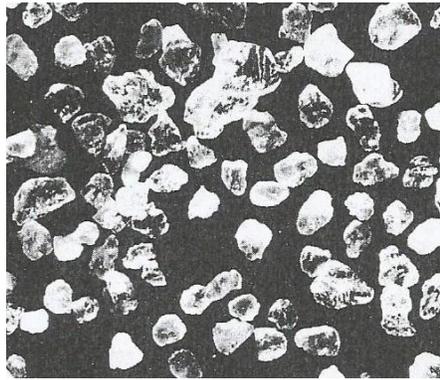


Ilustración 8. Dietert Harry. (1966).Grano Redondeado de Arena para corazón de Nueva Jersey [Fig. 2.9]. Recuperado de Foundry Core Practice

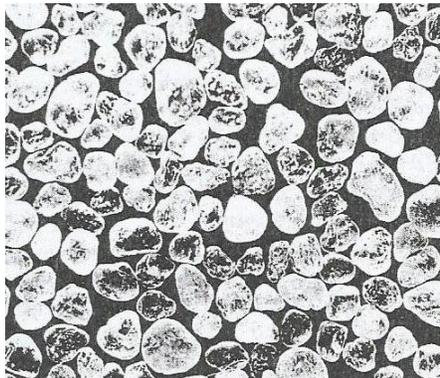
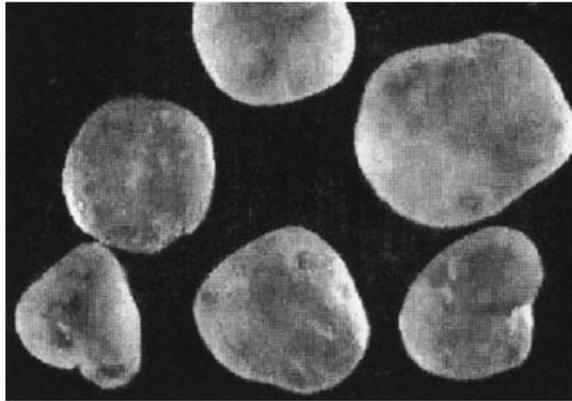
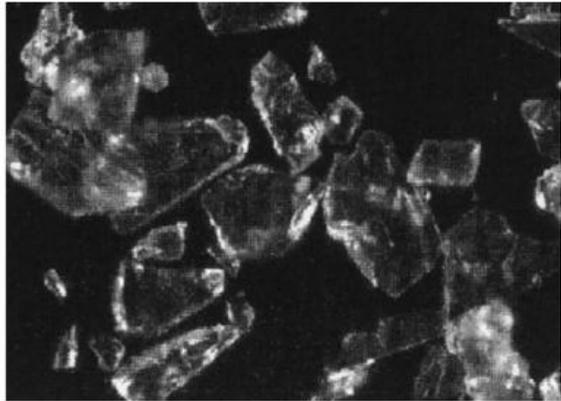


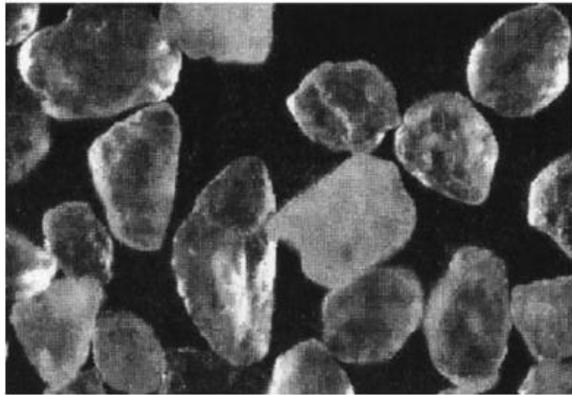
Ilustración 9. Dietert Harry. (1966).Grano Subangular de Arena para corazón de Nueva Jersey [Fig. 2.10]. Recuperado de Foundry Core Practice



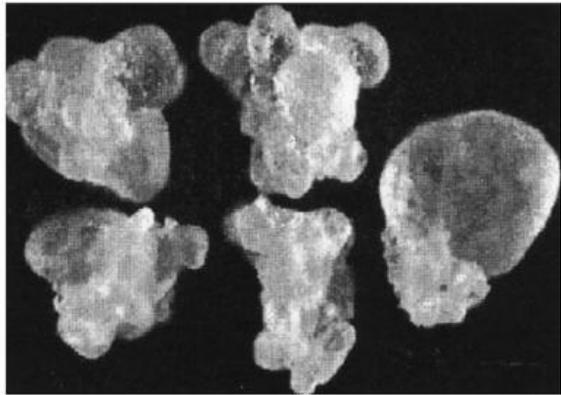
Rounded



Angular



Subangular



Compound

Superior Izquierda – Grano Redondeado

Inferior Izquierda – Grano Subangular

Superior Derecha – Grano Angular

Inferior Derecha – Grano Recubierto

Ilustración 10. Estándar de la AFS para la comparación y determinación de morfologías de grano (2004)

3.3 Resinas para Corazones Shell

Las resinas en el proceso Shell tienen la función de adherir entre sí los granos de arena, de manera sencilla, se puede entender que la resina es el aglutinante para la arena.

En el mercado existen diferentes tipos de resinas, a continuación se mencionan algunas recomendadas por la *American Foundrymen's Society* (AFS) [3]:

- Dry Powdered Novalak (polvo seco): Esta contiene hexametilentetramina pulverizada, se usa en mezclas secas y procesos en frío.
- Novalak Resins in Solvent Solutions (resina novalak en solución): Se emplea en procesos con aire caliente o frío, por lo que requiere hexametilentetramina y la adición de un lubricante mientras se hace el revestimiento de la arena.
- Liquid Waterbone Novalak (solución líquida): Esta resina es usada para revestimientos en caliente, contiene hexametilentetramina y un lubricante que es añadido durante la mezcla.
- Dry angular or fake Novalak (polvo seco): Es para revestimiento en caliente. El lubricante es usualmente agregado a la resina y también requiere la adición de hexametilentetramina mientras ocurre el revestimiento de la arena, esta resina es líquida.

3.4 Mezclas de arena para Corazones Shell

Los corazones Shell se obtienen de la mezcla de arena, resina y aditivos químicos. La arena provee la refractabilidad, la resina provee propiedades de adhesión y los aditivos evitan que el corazón reaccione con el metal, por lo que un aditivo inhibe las reacciones corazón-metal líquido.

Cuando se prepara una mezcla de arena para corazones Shell, es importante lo siguiente:

- La parte gruesa de la arena determina el acabado superficial que se obtendrá
- El tamaño de grano proporciona el acabado superficial
- El acabado no se ve afectado si no se excede en adición un 33% de gruesos
- Se permite hasta un 15% de finos para disminuir problemas de permeabilidad
- El aditivo debe de considerar la diferencia de densidades entre los materiales
- La permeabilidad de la arena angular es 20% menor que la arena redondeada



Ilustración 11. Mezclador para arena de corazones de tipo continuo con rotor de alto desempeño. Marca KLEIN. Recuperado de <http://www.directindustry.com/prod/klein/product-57835-375280.html>

3.5 Efecto de las variables en el proceso

La fabricación de un corazón Shell se puede obtener en máquinas de tipo Shalco, los parámetros están basados en tiempos (soplado, inversión, curado, carga de arena), este tipo de fabricación es automática, este tipo de procesos se utilizan en fundiciones que tienen una alta demanda de corazones. Por otra parte los corazones Shell también pueden ser fabricados de manera manual, este método de fabricación de corazones se usan en fundiciones con una demanda baja de corazones.

La elaboración manual de un corazón no tiene un control estricto sobre las variables involucradas en su elaboración, pueden listarse una gran cantidad de variables, sin embargo, depende principalmente de la experiencia de los operadores, lo único que se controla es la temperatura y en menor control los tiempos de los parámetros.

Las máquinas Shalco son considerados un método de fabricación automático, estas se encuentran en modelos U-150, U-180, U-360, etc, las más usadas U-150 y U-180:

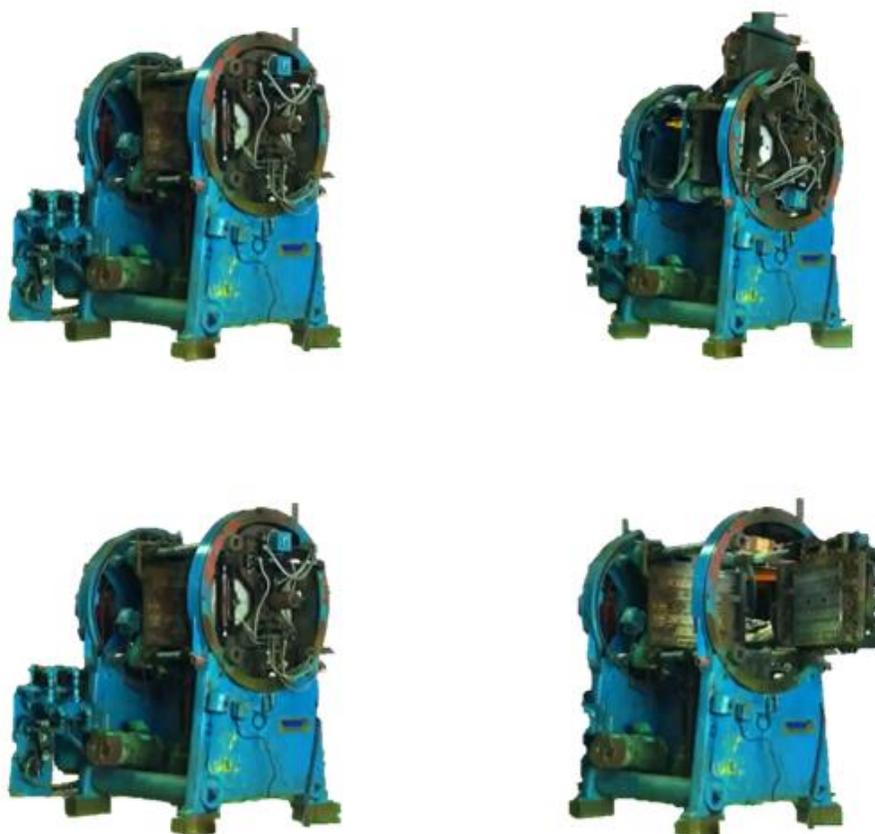
- Shalco U-150: Puede fabricar piezas pequeñas y medianas, cuenta con boquillas para calentar las cajas, la capacidad de soplado es de 11 Kg, la capacidad de arena recubierta en su tolva es de 19Kg, el peso máximo de molde es de 182 Kg.
- Shalco U-180: El funcionamiento de esta máquina es automático, sirve para piezas medianas a grandes, cuenta con 77 boquillas como calentadoras, la capacidad de su tolva es de 80 Kg, el peso máximo de molde es de 454 Kg.

3.6 Parámetros para las máquinas Shalco

De los tipos anteriores U-150 y U-180 se controlan los siguientes parámetros:

- **Soplado**: Tiempo que tarda en llenar o alimentar con arena Shell la cavidad para corazón (el mecanismo es neumático).
- **Inversión**: Tiempo para controlar el espesor.
- **Curado**: Tiempo de fraguado de la arena recubierta.
- **Carga de Arena**: Tiempo de alimentación de arena desde el silo de almacenamiento hacia la tolva de soplado.

Pese a que los cuatro parámetros mencionados anteriormente son de vital importancia, se decide poner mayor atención a los tiempos de inversión y curado, esto se debe a que se pueden asociar estos parámetros a los pesos finales de los corazones.



Superior Izquierda – Inicio de Operación
Superior Derecha – Soplado de la Arena
Inferior Izquierda – Cocción del Corazón y Desarenado
Inferior Derecha – Finalización del Ciclo

Ilustración 12. Máquina para Corazones Shalco U-180.(2012). Capturas de pantalla. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=OhybSXyqtdk>

3.7 Proceso de fabricación de corazones Shell en máquinas Shalco

Los pasos que se describen a continuación son aquellos que se efectúan al fabricar corazones por el proceso Shell en máquinas Shalco

1. Pre calentamiento de la caja corazonera (280°C aprox)
2. Montaje de la caja corazonera en la máquina Shalco seleccionada
3. Ajuste de los parámetros *Soplado, Inversión, Curado y Carga*
4. En caso de que no se obtenga una pieza buena sin poros se ajusta el tiempo de *Soplado*, si el corazón tiene una cascarilla muy delgada se ajusta el tiempo de *Inversión*, si el corazón se rompe fácilmente se ajusta el tiempo de *Curado*, si el llenado de la tolva de soplado desde el silo de almacenamiento es insuficiente se ajusta el tiempo de *Carga*
5. Teniendo los parámetros adecuados se comienza una producción normal de corazones

Durante el proceso de fabricación de corazones la máquina estará siguiendo un ciclo de operación el cual es el siguiente:

1. Se aplica al molde metálico un desmoldante líquido
2. Cierre de la puerta
3. La máquina se ubica en una posición invertida
4. Soplado de la arena desde la tolva de llenado a la caja corazonera desde la posición invertida
5. Residencia del molde en posición invertida (el tiempo de residencia es dado por el tiempo de *Inversión*)
6. Retorno del molde a posición normal e inicio del curado de la pieza
7. La tolva se separa de la caja corazonera permitiendo el desarenado interno del corazón
8. Fin del curado de la pieza (determinado por el tiempo de *Curado*)
9. Se abre la puerta en la mitad liberando el corazón fabricado
10. Con vibración se retira el corazón del molde metálico
11. Se reinicia el ciclo

3.8 Control de calidad para corazones Shell

Existe una gran cantidad de problemas los cuales se pueden controlar fácilmente, sin embargo aquellos que se descartan es por no tener una influencia alta. Algunos de estos problemas son los siguientes:

- **Cajas para corazones:** El metal para hacer una caja para corazones es el Hierro fundido, esto es debido a su capacidad calorífica y de conducción, las cuales son considerables. El hierro también logra mantener su forma y dimensiones a una temperatura de 260°C. El principal problema con la caja de corazones es un cierre no alineado de la caja, lo que logra un desplazamiento de la línea de partición en el corazón, la solución generalmente es una alineación correcta y una presión de cierre adecuada.
- **Temperatura y tiempo de Curado:** Cuando la temperatura entre las dos partes de la caja para corazones es muy grande existirá una diferencia en espesor de cascarilla, un espesor delgado de cascarilla tiene como consecuencia una escasa resistencia mecánica cuando el corazón entra en contacto con el metal líquido, por otra parte mientras más tiempo suceda se consigue una alta resistencia en caliente y escasa resistencia en frío.
- **Arena:** Generalmente el principal problema de los corazones se encuentra en la materia prima, ya que la morfología del grano, la humedad o la permeabilidad de la arena afecta directamente a la calidad final de los corazones.



Ilustración 13. Inspección de Calidad a corazones. (2013). Recuperado de <http://www.foundry-shell-casting.it/en/>

Capítulo 4. Mejora Continua

4.1 Mejora Continua para Procesos

La mejora continua es un modelo de trabajo por el cual se busca mejorar la capacidad y resultados en un proceso u organización. Para ello se utiliza un ciclo PDCA (Plan, Do, Check, Adjust / Planear, Hacer, Checar, Ajustar).

La base del modelo de mejora continua es la evaluación. En ella es posible detectar área de oportunidad, estas áreas de oportunidad son las áreas en las que se trabajará, cuyo objetivo deberá ser un proyecto de mejora.

El ciclo PDCA se basa en los siguientes apartados:

Plan (Planificar) ORGANIZACIÓN LÓGICA DEL TRABAJO

- Identificación del problema y planificación
- Observaciones y análisis
- Establecimiento de objetivos a alcanzar
- Establecimiento de indicadores de control

Do (Hacer) CORRECTA REALIZACIÓN DE LAS TAREAS PRINCIPALES

- Preparación exhaustiva y sistemática de lo previsto
- Aplicación controlada del plan
- Verificación de la aplicación

Check (Comprobar) COMPROBACIÓN DE LOS LOGROS OBTENIDOS

- Verificación de los resultados de las acciones realizadas
- Comparación con los objetivos

Adjust (Ajustar) POSIBILIDAD DE APROVECHAR Y EXTENDER LA EXPERIENCIA ADQUIRIDA

- Analizar los datos obtenidos
- Proponer alternativas de mejora
- Estandarización y consolidación
- Preparación de la siguiente etapa del plan

En adición a la herramienta del PDCA es posible emplear herramientas complementarias, estas herramientas suelen ser las siguientes:

- Gráfico de Pareto (80/20): Método de análisis que permite discriminar entre las causas más importantes de un problema y las que son menos importantes, este nos dice que el 20% de una muestra afecta al 80% restante.
- Histograma de frecuencia: Registro de datos relativos a la ocurrencia de determinados sucesos.
- Control estadístico de procesos (CEP).
- Diagrama de causa-efecto: Ayuda a identificar, clasificar y poner manifiesto posibles causas, tanto de problemas específicos como de efectos deseados.
- Gráfico de control: Herramienta utilizada para controlar y mejorar un proceso mediante el análisis de su variación a través del tiempo.
- Hoja de comprobación: Registro de datos relativos a la ocurrencia de determinados sucesos.
- Histograma: Gráfico de barras verticales que representa la distribución de frecuencias de un conjunto de datos.
- Diagrama de dispersión: Herramienta que ayuda a identificar la posible relación entre dos variables.

4.2 Diagrama de Causa-Efecto

El diagrama de Ishikawa se conoce también por los nombres de diagrama de espina de pescado o diagrama de causa-efecto. La herramienta fue creada por el Dr. Kaoru Ishikawa en 1943. Este diagrama es muy efectivo cuando deseamos analizar un problema. Si se combina con otras herramientas de control de calidad como la lluvia de ideas y los cinco porqués de Toyota, podremos explotar al diagrama de una mejor forma.

Para poder elaborar un diagrama de Ishikawa se debe hacer lo siguiente:

En la parte que vendría siendo la cabeza del pescado escribimos el efecto síntoma que se pretende analizar. La espina central del pescado agrupará las causas, estas causas las conoceremos de un análisis sobre lo que produce tal efecto

Las diferentes categorías en que se pueden agrupar las causas conforman las espinas que se desprenden de la horizontal principal. Escribimos el nombre de la categoría en el extremo de cada nueva línea

Cada causa concreta que se haya encontrado se va añadiendo en la categoría que se considere encajar mejor

Es prudente conocer los diversos efectos involucrados en el proceso de fabricación para corazones, muchos de estos generan y ocasionan que la variación en los parámetros sea mayor a la estimada, se presenta en este apéndice un diagrama simplificado de Causa-Efecto para este proceso, en donde se incluyen de manera simple y sencilla algunas de las causas al obtener corazones defectuosos.

Algunas de las causas tienen solución rápida, otras causas requieren de un mayor tiempo e investigación para poder resolver el efecto, se sugiere la construcción de diagramas de pescado como una herramienta para el área, el diagrama expuesto a continuación muestra un ejemplo acoplado a la finalidad de este trabajo:



Figura 1. Diagrama de causa-efecto para corazones Shell considerando al Material, Mano de Obra, Maquinaria y Método

El diagrama de la figura 1 fue construido considerando cuatro partes de las 6M del control de calidad, estas son:

Material: Referente a los proveedores y su certificación, tipo de materia prima, lo que no ayuda a cumplir con nuestra meta de calidad.

Mano de Obra: Trata la capacitación del personal, esto nos lleva a tener gente mejor calificada ejecutando el proceso.

Maquinaria: Se enfoca más a tener un mantenimiento preventivo.

Medio ambiente: Todo aquello que rodea al proceso y contexto de la empresa.

Medición: Controles de calidad adecuados, equipos, calibración, muestreos y aseguramiento de la calidad.

Método: Documentación adecuada a los procesos.

4.3 Diagrama de Dispersión

Los gráficos de dispersión se emplean para poder observar las variaciones de los datos obtenidos, ya que se pueden expresar datos de dos variables , con lo que se pueden lograr predicciones basadas en los datos registrados, la particularidad en la elección de este tipo de gráficos recae en poder usar los datos de manera individual.

Para poder hacer uno de estos gráficos se pone en el eje “X” la variable independiente, y en el eje “Y” se coloca la variable dependiente.

Con el uso de estos gráficos se puede ver cómo se relacionan dos variables, a este comportamiento se le conoce con el nombre de correlación, la correlación puede ser de tres tipos:

- Positiva: Ocurre cuando la variable aumenta y la otra también
- Negativa: Es cuando una variable aumenta y la otra disminuye
- Sin correlación: Es cuando no hay una relación aparente entre las variables

Para poder conocer la correlación existente se debe de trazar una línea de ajuste, esta línea debe de cruzar la mayor parte de datos, por lo que si hay puntos por encima o debajo de los puntos que marcan tendencia, se deben dejar fuera de la recta.

El proceso de elaboración de corazones por medio del proceso Shell involucra una relación directa entre el peso y espesor en el corazón, de manera cualitativa la relación indica que a un mayor peso de corazón el espesor de la cascarilla es mayor.

El espesor de la cascarilla se debe a la inversión que se efectúa al fabricar un corazón, este paso ocurre en una posición en donde la matriz metálica se encuentra invertida, es decir, los huecos por donde se alimenta la arena se encuentran apuntando hacia arriba, por lo que a la posición opuesta, en donde los huecos de alimentación apuntan hacia abajo se le puede nombrar posición estándar, el tiempo de inversión, es el tiempo medido en segundos que la máquina está en posición invertida. Al finalizar el proceso la arena que no se ha fraguado puede salir por efecto de la gravedad, de esta forma el hueco se forma, luego de este paso ocurre el curado del corazón.

Para ejemplificar el uso de diagramas de dispersión se busca la relación entre el peso del corazón y su espesor, para esto se elaboraron y analizaron algunos gráficos para poder observar fácilmente las tendencias, los resultados se encuentran a continuación:

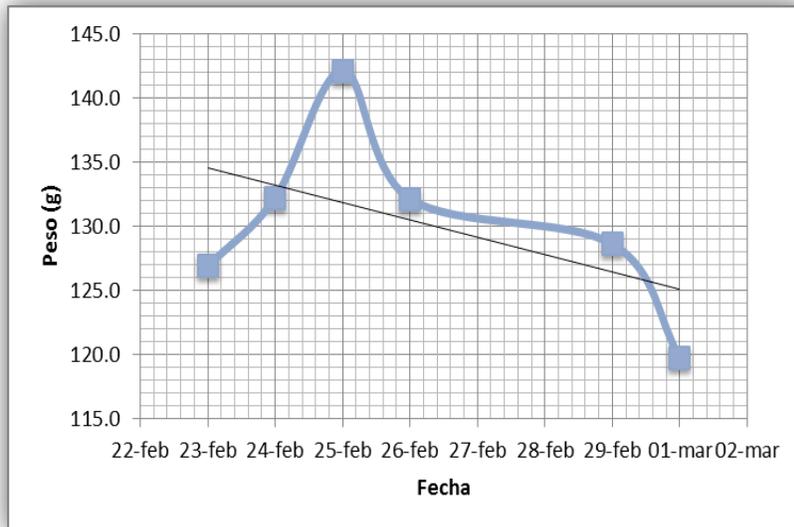


Figura 2. Variación de Peso para corazones Shell en diez días

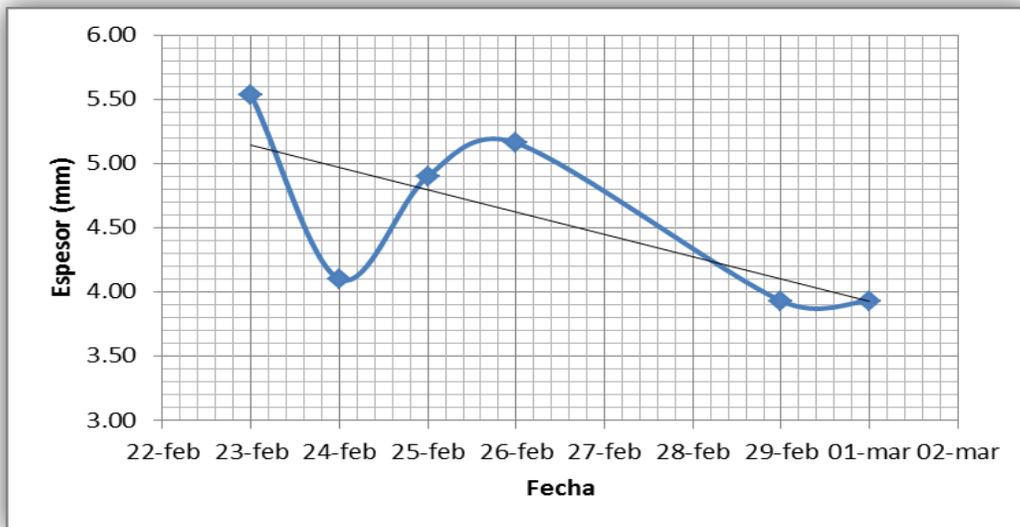


Figura 3. Variación del Espesor de cascarilla en diez días

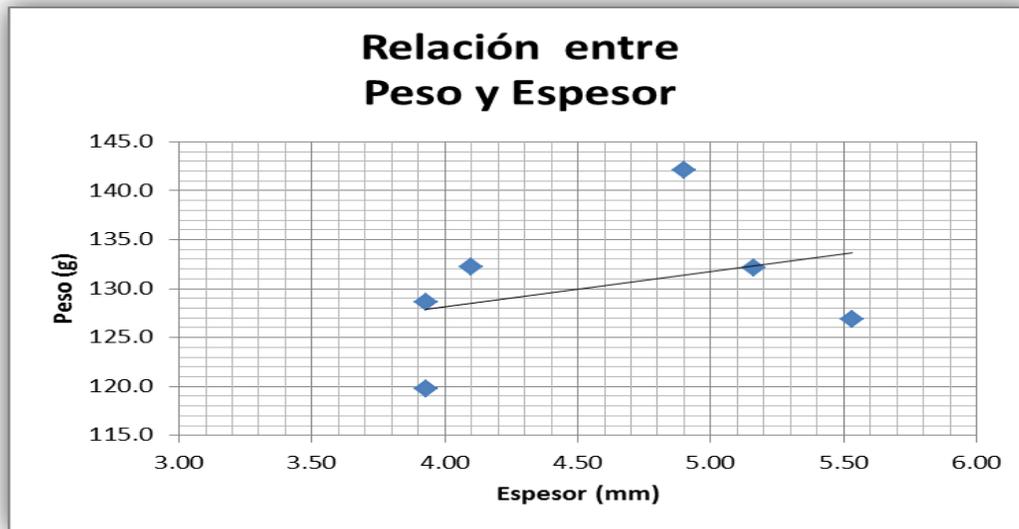


Figura 4. Gráfico de dispersión para la relación entre Peso y Espesor de corazones

Las figuras 2 y 3, ambos con una línea de tendencia negativa, nos muestran que el comportamiento del peso y espesor tuvo la tendencia a disminuir.

Para la figura 4 con título Relación entre Peso y Espesor, muestra una correlación positiva (obsérvese su línea de tendencia), la tendencia es de tipo positivo, por lo que se puede decir que a mayor peso, el tamaño de cascarilla será más grande, lo cual afirma lo que se pensaba anteriormente de manera empírica, sin embargo, este análisis no aclara el efecto del tiempo, por lo que también puede sugerir que a mayores tiempos de inversión el peso será mayor.

De manera práctica y al momento, la medición de espesores no parece ser una forma rápida de evaluación para corazones, ya que requiere un tratamiento posterior de datos, en donde será posible observar el comportamiento, por este motivo el seguimiento de los parámetros y su influencia solamente considera el peso.

4.4 Diagrama de Pareto

En el año de 1909 Vilfredo Pareto (1848-1923) publicó un estudio sobre la distribución de la riqueza, en los resultados de esta investigación observó que el 80% de la riqueza la poseía el 20% de la población.

Joseph Moses Juran fue un consultor experto en calidad y gestión de calidad, cercano al final de los años 30, en General Motors Corporation conoció los trabajos de Pareto sobre la distribución de la riqueza. Posteriormente Juran en un manual de control de calidad, mostró algunos de los ejemplos sobre los resultados de Pareto en la distribución desigual de la riqueza, a estas curvas Juran las tituló como *Principio de Pareto de la distribución desigual aplicado a la distribución de la riqueza y la distribución de las pérdidas de calidad*.

La relación del 80/20 que comenzó con Pareto puede ser encontrada en distintos campos. Como ejemplo tenemos que el 80% de los problemas de una organización se deben a un 20% de las causas posibles. En cuestión de calidad, el 80% de los defectos de un producto se debe al 20% de las causas potenciales. En práctica la relación 80/20 no se encuentra exactamente en esta proporción, sin embargo aún es posible emplearlo para poder encontrar las causas posibles a un problema.

El diagrama de Pareto constituye un gráfico en el cual se puede analizar y discriminar entre las causas más importantes de un problema y las que son menos importantes.

Las ventajas del diagrama de Pareto son las siguientes:

- Permite centrarse en los aspectos que tendrán más impacto
- Proporciona una visión simple y rápida de la importancia relativa de los problemas
- Ayuda a evitar que se empeoren algunas causas al tratar de solucionar otras y ser resueltas
- La visión gráfica del análisis es fácil de comprender y estimula al equipo para continuar la mejora

A continuación se muestra un ejemplo de lo que es el diagrama de Pareto (Ilustración14), en este caso un gerente desea investigar las causas de la insatisfacción de los clientes en un hotel determinado. El gerente investiga y registra las razones de las quejas de los clientes.

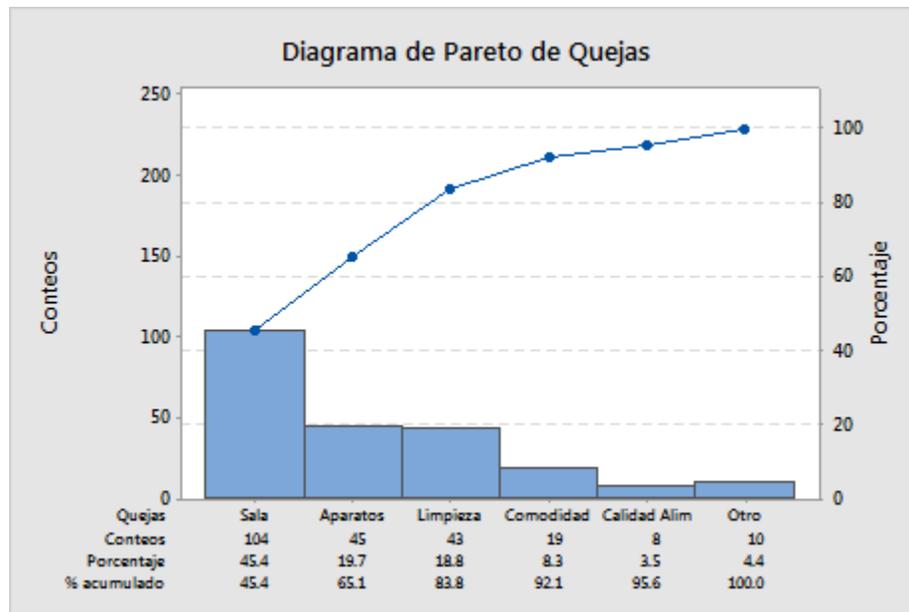


Ilustración 14. Diagrama de Pareto de Quejas. (2016). Recuperado de <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/topic-library/quality-tools/quality-tools/29areto-chart-basics/>

En la ilustración 14 se observa que el eje “y” en la parte izquierda es donde se ubica la frecuencia de ocurrencia, mientras que el eje “x” muestra las categorías de los defectos. La interpretación de esta ilustración nos deja saber que el 80% de las quejas de los clientes son por la sala, aparatos y limpieza en el hotel, mientras que el 20% restante de las quejas son para la comodidad, calidad alimenticia y quejas de otro tipo; por lo que el 80% de quejas son áreas de oportunidad para el gerente del hotel.

Capítulo 5. Procedimiento Experimental

Para poder llevar a cabo este desarrollo se realizó una planeación en la cual se consideran cuatro etapas de trabajo:

- 1ª Etapa - Adquisición de Datos*
- 2ª Etapa - Tratamiento y Análisis de los datos obtenidos*
- 3ª Etapa - Prueba y Validación de los parámetros*
- 4ª Etapa – Pruebas complementarias*

Mediante el transcurso de cada una de las etapas se obtuvieron resultados, la primera y segunda etapa se consideraron para conocer el estado actual del proceso, aparte de conocer el proceso. La segunda etapa funcionó para poder formular una propuesta, logrando crear un posible estado futuro para el actual proceso Shell, por último la tercer etapa sirvió para validar los parámetros propuestos, logrando afinar los tiempos sugeridos y su rango de efectividad.

5.1 1ª Etapa-Adquisición de Datos

La obtención de datos fue llevada en cinco pasos:

1. Establecimiento de un criterio de estabilidad previo a la recolección de datos
2. Registro de los catálogos por producir en el día y la máquina donde serían producidos
3. Registro de los tiempos en segundos para los parámetros (Soplado, Inversión, Curado y Carga)
4. Pesaje de tres corazones por catálogo fabricados en el día
5. Vaciado de la información a una matriz general de Catálogos

El criterio de estabilidad consideró tazas de producción superiores a las 300 piezas por día, en piezas grandes 11/4 la producción mínima debía ser mínimo de 50 piezas por día, se consideró también un tiempo mínimo de operación con los parámetros, este tiempo de operación fue mínimo veinte minutos; si se cumplía la condición de producción, también con la condición operativa, y por último la condición temporal, se consideró que los parámetros podían ser registrados.

Posteriormente se hizo registro del peso promedio para cada pieza, los corazones se tomaron de diferentes partes de la charola en donde se colocaban después de retirarles el exceso de arena, los corazones fueron pesados (se reporta el valor promedio) y este se anota junto a los tiempos que se registraron, esto se hizo para evitar errores al relacionar los parámetros obtenidos con el peso final del corazón. Respecto al equipo de medición, los corazones pequeños fueron pesados en la balanza granataria (máximo 600g sin contrapeso, 1100g con contrapeso de 500g, margen de error: ± 2 g), mientras que los corazones que superaban 1kg se pesaron en una báscula (margen de error ± 100 g)

La condición de producción o carga, determinó la cantidad de información que se obtuvo para cada pieza, por lo que en algunas piezas solamente se obtuvo un solo registro.

Los resultados de esta etapa pueden encontrarse en las tablas 4, 5, 6 y 7 del anexo.

5.2 2ª Etapa-Tratamiento y Análisis de los datos obtenidos

En esta etapa se conoció el estado actual del proceso, posteriormente al tratamiento y análisis de los datos obtenidos, se proyectó el estado actual a un estado futuro de proceso con la información obtenida.

En esta etapa, se consideró el tratamiento de manera estadística, logrando obtener el valor medio que se trabajó el estado actual, después de esto para la proyección a futuro del proceso, se empleó a los menores tiempos registrados en cada pieza.

La propuesta se formuló a partir de los menores tiempos registrados, esto se hizo para cada corazón, en algunos corazones solamente se pusieron los tiempos con los que se contó para tener una referencia.

Adicionalmente al tratamiento de los parámetros para los estados futuro y actual, se determinó el 80-20 del proceso, en donde se logró observar la susceptibilidad de reproducir cada uno de las piezas en función del tamaño.

5.3 3ª Etapa-Prueba y Validación de los parámetros

Considerando la propuesta de parámetros, se trabajaron los corazones que se produjeron en el día, para poder validar el tiempo se revisaron los tiempos en los parámetros, en caso de que la variación fuera muy diferente al valor de la propuesta, se sugirió al operador hacer algunas pruebas con tiempos cercanos a lo propuesto, si el operador reconocía que el corazón era adecuado se continuó trabajando con esos tiempos, en caso contrario, si no era posible emplear los valores de la propuesta se buscaban las posibles causas, de esta manera se corrigieron las causas y se volvió a aplicar la prueba.

Los datos pueden encontrarse en las tablas 8 y 9 del anexo.

5.4 4ª Etapa-Pruebas Complementarias

En esta última parte se evalúa la arena empleada, las pruebas realizadas son: resistencia a la tracción, granulometría y pérdidas ignición para la arena empleada en el proceso de fabricación de corazones, el método empleado en estas pruebas es acorde por la American Foundry Society (AFS) [4]

Metodología para la prueba de resistencia a la tracción:

Preparación de la probeta para ensayos

1. Pre calentamiento caja de corazones a una temperatura entre 235 -245 °C
2. Llenado del molde con arena y retirar el exceso
3. El ciclo de cocción es de 3 minutos
4. Se desmolda la probeta resultante

Posterior a la fabricación de la probeta se evalúa la resistencia a la tracción en frío y caliente.

1. La prueba en frío es a temperatura ambiente, la prueba en caliente es inmediatamente después de desmoldar la probeta
2. Inserción de la probeta en las mordazas de la máquina y ajuste de la carga de tensión
3. Accionar la máquina
4. Registrar los valores tras romperse la probeta

Metodología para el ensayo granulométrico:

1. Tomar 1 kg de arena
2. Cuartear el kg de arena hasta quedarse con una muestra aprox a 100-125 gr
3. Vaciar la arena cuarteada al juego de mallas (6, 12, 20, 30, 40, 50, 70, 100, 140, 200, 270, PAN)
4. Colocar en RO-TAP y llevar el timer a 15 minutos
5. Retirar el juego de cribas
6. Pesar y registrar la arena retenida en cada una de las mallas
7. Llenar la tabla para el análisis granulométrico y determinar el número AFS de la muestra

Metodología para la prueba de pérdida por ignición (Loss on Ignition LOI):

1. Pesar aproximadamente 2 gr de muestra
2. Pesar el crisol a emplear en la prueba
3. Precalentado de la mufla a una temperatura de $926^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$
4. Introducir la arena con el crisol a la mufla y dejar por 15 minutos
5. Deja enfriar el crisol con la muestra
6. Pesar de nuevo la muestra y el crisol
7. Efectuar los cálculos para obtener el %LOI (Loss on Ignition/Pérdidas por Ignición)

Los resultados para las pruebas mencionadas se encuentran en el anexo, las tablas 10 y 11 tienen la información.

Capítulo 6. Resultados y Discusión

6.1 Influencia de la Inversión y Curado en los tiempos de trabajo

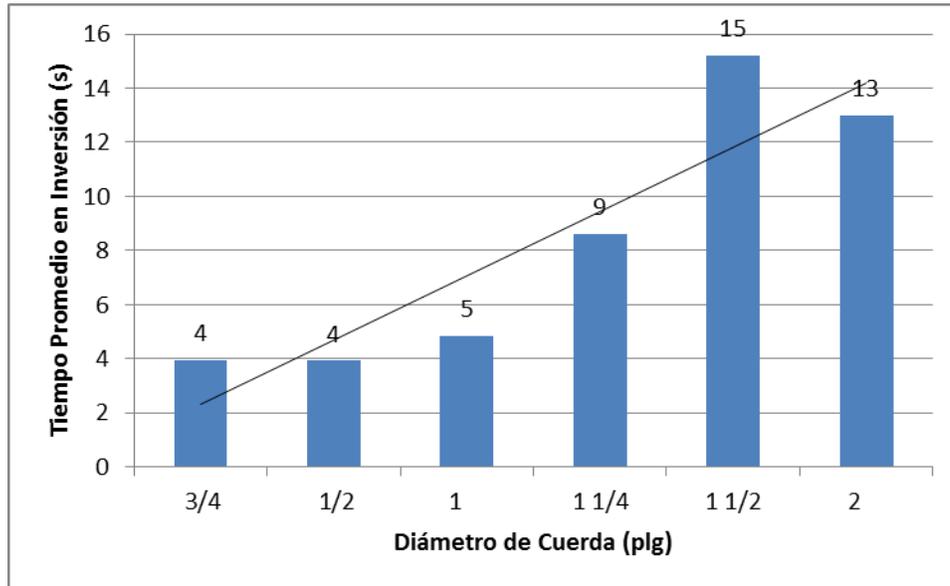


Figura 5. Gráfico de Barras para el tiempo de Inversión promedio en los diferentes Diámetros de cuerda, incluye línea de tendencia

El tiempo de inversión en el proceso Shell es aquel que determina el espesor de la cascarilla formada, en la información obtenida es posible obtener un promedio de los tiempos de inversión para los diferentes diámetros de cuerda, la figura 5 muestra el resultados de los tiempos promedio para la inversión.

La línea de tendencia observada en la figura 5 nos sugiere que a mayores diámetros de cuerda, es necesario un mayor tiempo. Si se comparan los promedios obtenidos es posible notar que los corazones con un diámetro de $\frac{3}{4}$ y $\frac{1}{2}$ de pulgada, se comportan de igual al fabricarlos, es decir, pueden fabricarse ambos con el mismo tiempo de inversión; otro caso es con los corazones de medida $1 \frac{1}{2}$ y 2 pulgadas, entre ambos solo existe una diferencia de dos segundos, esta diferencia en porcentaje es de aproximadamente 13%, lo que termina proponiendo emplear el mismo tiempo de inversión para corazones de $1 \frac{1}{2}$ y 2 pulgadas de diámetro de cuerda.

Las medidas de 1 y 1 ¼ se comportaron de manera diferente, la medida de 1 ¼ posee una diferencia significativa entre los tiempos de los extremos, mientras que la de 1 pulgada, al tener una diferencia menor y más parecida a las medidas pequeñas, podría considerarse en emplear el mismo tiempo de curado para las medidas de ¾ y ½ pulgadas.

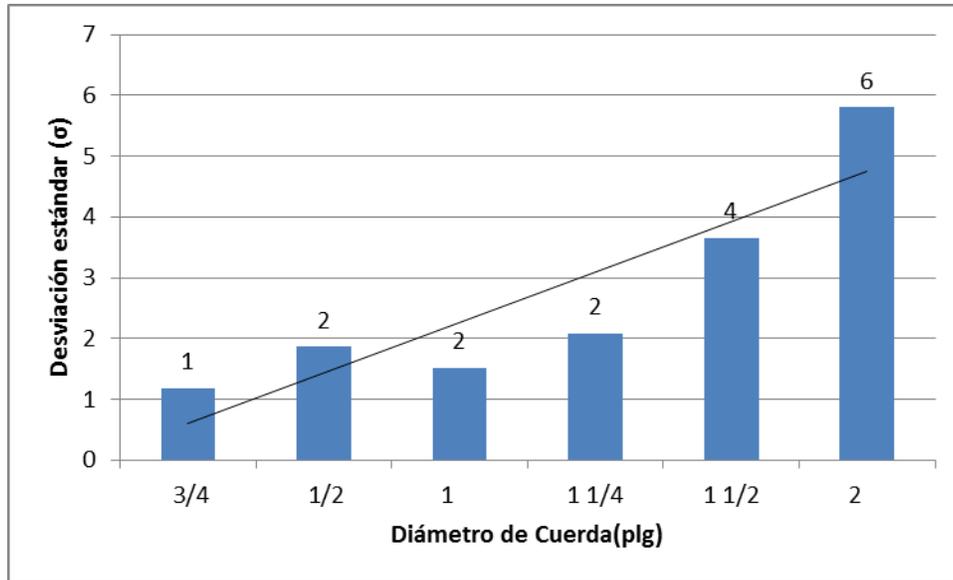


Figura 6. Gráfico de Barras para la desviación estándar del tiempo de Inversión, se incluye línea de tendencia

Poder emplear el mismo tiempo de inversión para un 50% de los corazones simplemente ayuda a la reproducibilidad de resultados, sin embargo se requiere evaluar si esto es posible, la figura 6 nos muestra las desviaciones estándar en los diferentes diámetros de cuerda, esta desviación estándar puede entenderse como la variación del tiempo que existe al trabajar el proceso, esta desviación se puede expresar con el símbolo “±”, ya que esta variación se le puede sumar o restar al tiempo promedio obtenido.

Para piezas pequeñas se tiene que la variación es menor, lo que insinúa que el proceso es más estable, por otra parte, en tamaños mayores como 1 ½ y 2 pulgadas de diámetro la variación aumenta de manera considerable respecto a las variaciones en medidas como ¾, ½, 1 y 1 ¼ pulgadas, la línea de tendencia también los enseña este comportamiento, el cual tiende en aumentar conforme el tamaño del diámetro de cuerda es mayor.

Una sugerencia resultante de la figura 6 tendría que ser disminuir la variación en los tiempos de inversión, la disminución es posible siempre y cuando se atienda primeramente otras áreas de oportunidad para el proceso, algunas de estas áreas pueden ser mantenimiento, materia prima y capacitación.

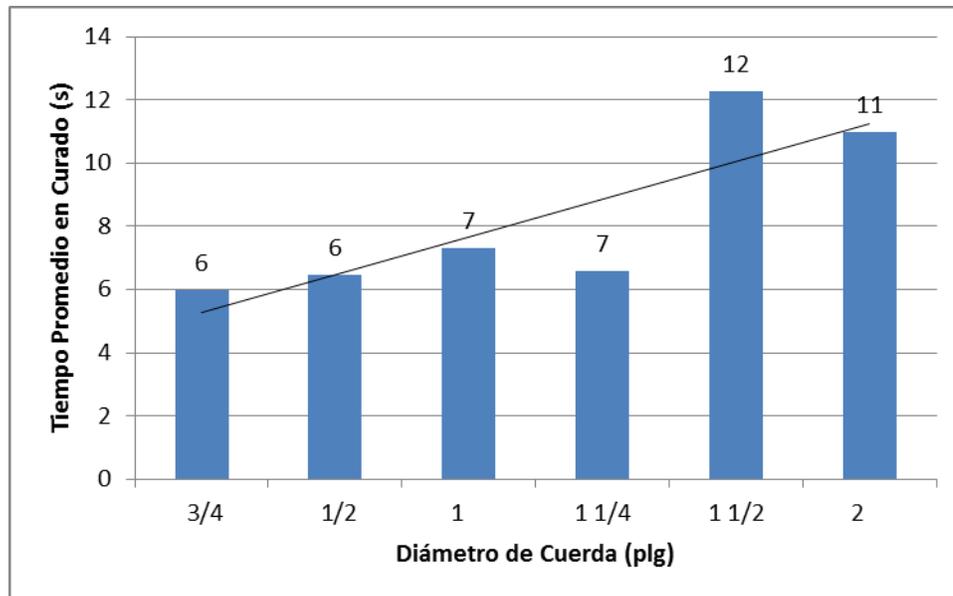


Figura 7. Gráfico de Barras para el tiempo de Curado promedio en los diferentes Diámetros de cuerda, incluye línea de tendencia

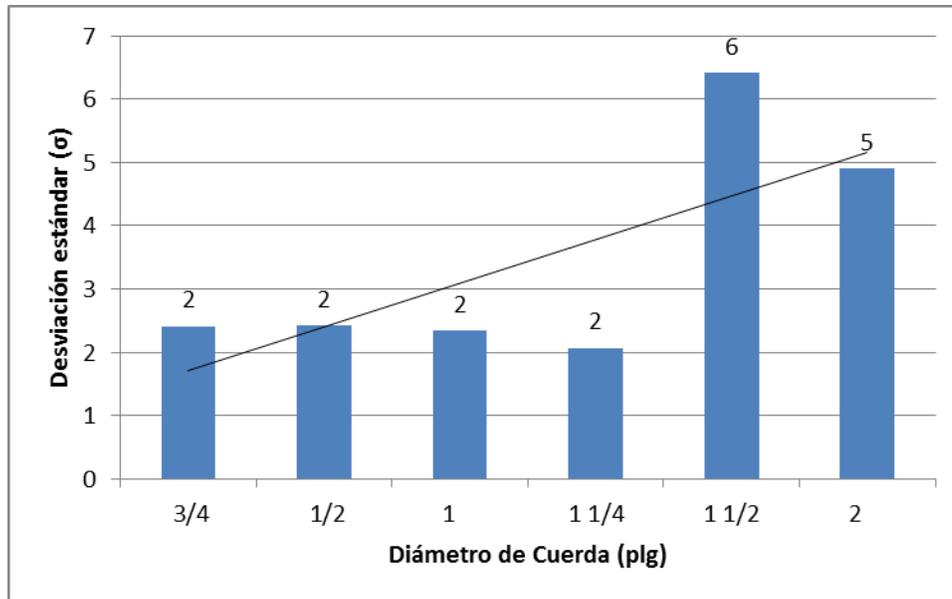


Figura 8. Gráfico de Barras para la desviación estándar del tiempo de Curado, se incluye línea de tendencia

Las figuras 7 y 8 nos ofrecen el mismo tipo de gráficos analizados para el tiempo de inversión, a diferencia de los gráficos 5 y 6 estos corresponden al tiempo de curado.

Se recuerda que el tiempo de curado, es aquel tiempo de residencia en la máquina para poder fraguar la resina en la arena, y poder obtener corazones con la resistencia mecánica necesaria.

La figura 7, muestra prácticamente el comportamiento de su homóloga 5, las piezas en esta ocasión hasta 1 ¼ de pulgada son susceptibles a poder trabajar con el mismo tiempo de curado, mientras que las medidas de 1 ½ y 2 pulgadas se encuentran muy cercanas entre sí, la variación entre las piezas con una medida de hasta 1 ¼ de pulgada y a partir de 1 ½ pulgada es de un segundo, por lo que en ambos casos es igual.

Analizando la variación en los tiempos de curado (figura 8), nos es posible observar que a diferencia de los tiempos de inversión estos parecieran ser más constantes, idealmente estas variaciones tendrían que ser cercanas a cero, sin embargo esperar una variación de un solo segundo sería lo más ideal.

La variación es aproximadamente de 2 segundos hasta tamaños de 1 ¼ de pulgada, 6 segundos para 1 ½ de pulgada y cinco segundos para 2 pulgadas. Observar la variación de las piezas grandes es fundamental, esto se debe a que de principio requieren una mayor cantidad de material para poder ser fabricadas, aparte de que también requieren una mayor cantidad de energía, otro impacto del tiempo de curado recae en el gasto monetario por el calentamiento de las cajas, sin embargo, la variación que se obtiene tanto las figuras 8 y 6 , puede ser resultado de las condiciones de trabajo, así como de la calidad de operación y experiencia del operador, lo que termina haciendo crecer una lista de causas probables, incrementando poco a poco el error típico.

La procedencia de los datos obtenidos en la totalidad de este trabajo se debe a una acción de medición y muestreo, posteriormente ocurriendo al tratamiento de la información obtenida, cada una de estas etapas suma un error que suele terminar siendo acumulativo y difícil de rastrear.

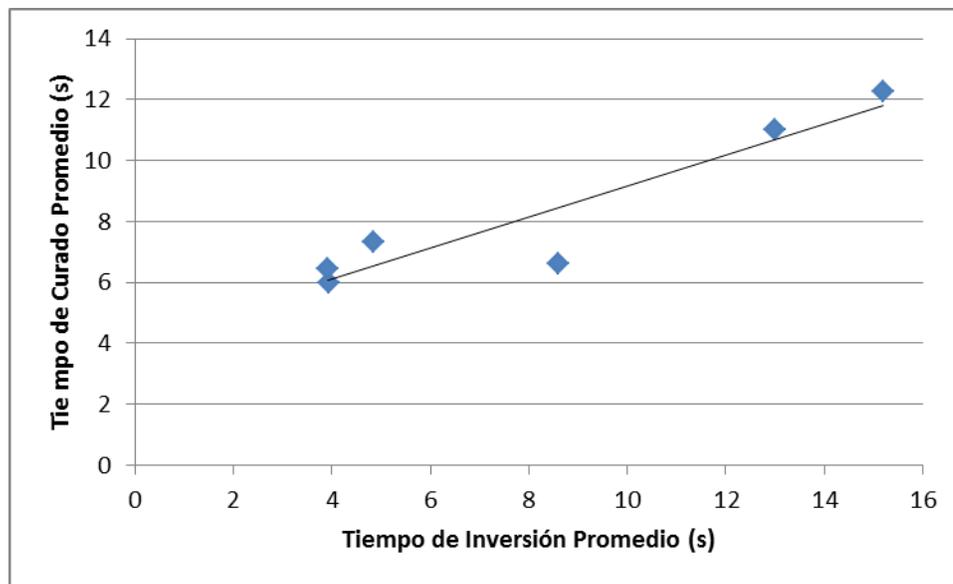


Figura 9. Gráfico de Correlación para los tiempos de Inversión y Curado en las diferentes medidas de cuerda para las piezas

La correlación entre los parámetros inversión y curado queda clara en la figura 9 en donde ambos se ajustan en una pendiente positiva, es decir, conforme

aumentamos el tiempo de inversión también será necesario aumentar el tiempo de curado, la justificación a este incremento en tiempo de curado está en el aumento de masa en las piezas, un mayor tiempo de inversión resultará en un aumento a la masa final de un corazón por el método Shell, el tiempo de residencia del corazón por lo tanto aumenta conforme la masa aumenta, y en complemento, la temperatura suministrada en el proceso debe de poder penetrar hasta donde se requiere, obteniendo así un efecto fraguante en la resina, traduciéndose este tiempo en el endurecimiento de la mezcla de arena que compone al corazón para fundición.

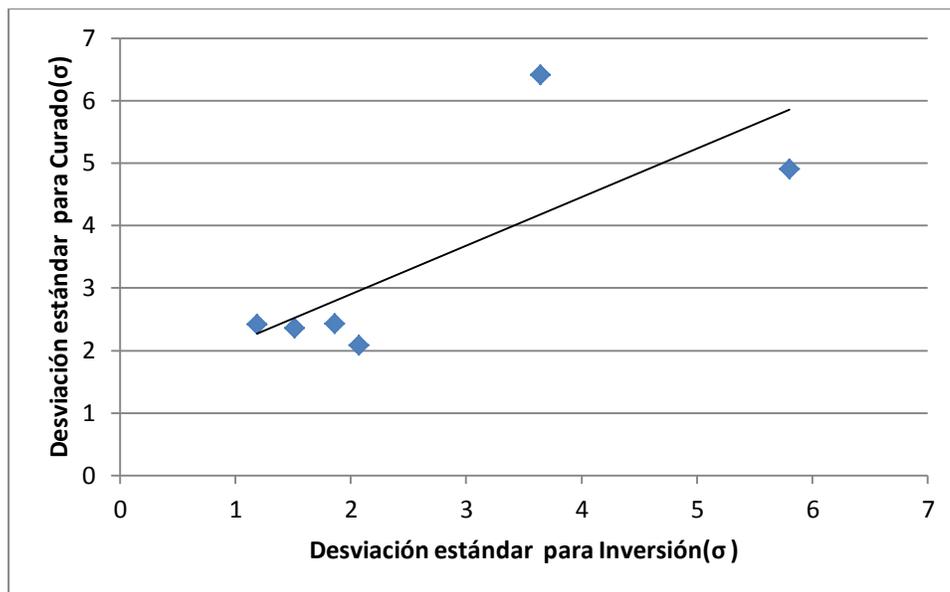


Figura 10. Gráfico de Correlación para las Desviaciones estándar de Inversión y Curado

Si el tiempo de inversión aumenta, por lo tanto el tiempo de curado lo hace también, la variación en el proceso tiene la misma tendencia a incrementar, obsérvese la línea de tendencia en la figura 10, también se nos muestra que mientras menor sea la variación en los tiempos de proceso este tenderá a ser más homogéneo y menos heterogéneo, el resultado de un proceso con una homogeneidad mayor resultará en una mayor reproducibilidad del proceso.

La estabilización y reproducción para los tiempos de curado e inversión debe de ser una prioridad en el proceso Shell que se lleve de manera automática o semiautomática, para así evitar pérdidas monetarias por material y energéticos.

6.2 Influencia de la Inversión y Curado en el peso final de las piezas

Anteriormente se sugirió que es posible emplear los mismos parámetros tanto en curado para inversión para algunas medidas de las piezas, sin embargo existía una variación resultante en cada medida, esta nos dice que es posible emplear los mismos parámetros en base, pero las variaciones pueden no ser las mismas, es necesario conocer la influencia que tienen los tiempos de inversión y curado para poder reconocer el efecto final que tiene en los corazones.

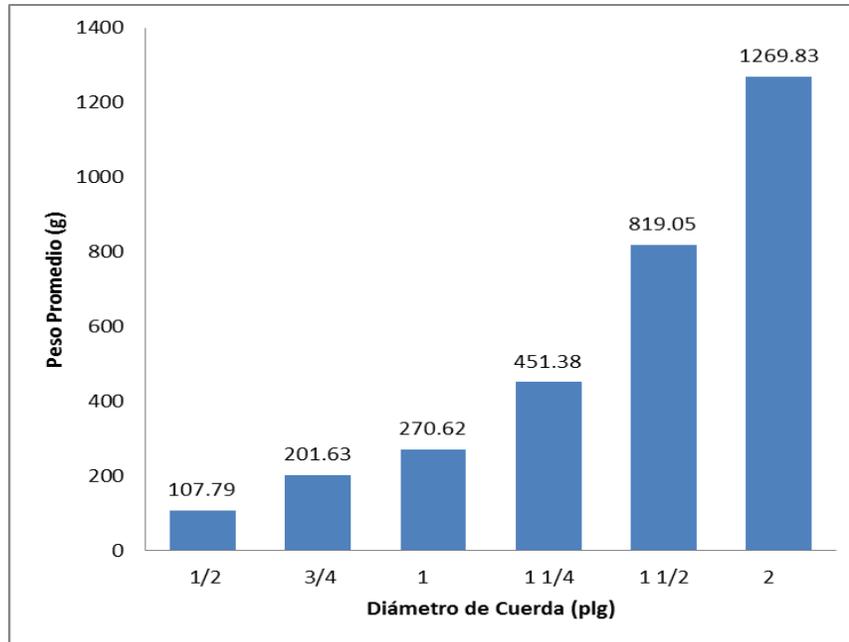


Figura 11. Gráfico de barra para pesos promedio según el diámetro de cuerda

La tendencia en tiempos de curado e inversión fue a incrementar conforme el tamaño de la pieza es mayor, en la figura 11 la tendencia a incrementar el peso es la misma que en los tiempos necesarios para fabricar los corazones. Con el peso de las piezas es posible diferenciar entre cada una de las medidas, sin embargo se recalca que los pesos mostrados en la figura 11 son correspondientes a pesos promedios, para cada medida en todas las piezas.

Para conocer la influencia de la inversión y curado en el peso se analizan tres casos representativos: inversión constante, curado constante y ambos tiempos constantes.

Tabla 1

Datos representativos para la Pieza 11 para tamaños de cuerda $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$ y 1 plg,

Inversión Constante

Pieza 11 Diámetro de Cuerda 3/4"		
Inversión (s)	Curado (s)	Peso (g)
3	3	106.7
3	5	101.0
3	8	101.8

Pieza 11 Diámetro de Cuerda 1/2"		
Inversión (s)	Curado (s)	Peso (g)
4	3	124.2
4	4	144.9
4	6	134.1
4	8	145.7

Curado Constante

Pieza 11 Diámetro de Cuerda 3/4"		
Inversión (s)	Curado (s)	Peso (g)
2	7	140.8
3	7	129.2
3	7	132.2
5	7	152.9

Pieza 11 Diámetro de Cuerda 1/2"		
Inversión (s)	Curado (s)	Peso (g)
3	5	95.5
3	5	101.0
5	5	93.4

Curado e Inversión Constantes

Pieza 11 Diámetro de Cuerda 1"		
Inversión (s)	Curado (s)	Peso (g)
4	4	258.7
4	4	295.3
4	4	270.5

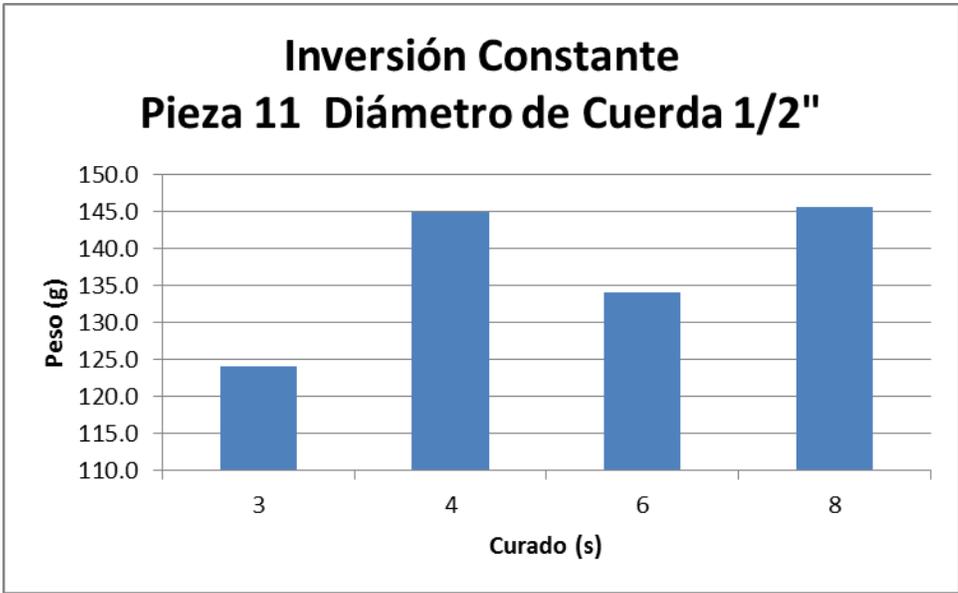


Figura 12. Gráfico de Barras de la Pieza 11 Diámetro de Cuerda 1/2 de pulgada con tiempo de inversión constante, a tiempos de 3, 4, 6 y 8 segundos de curado, compara los pesos a cada tiempo

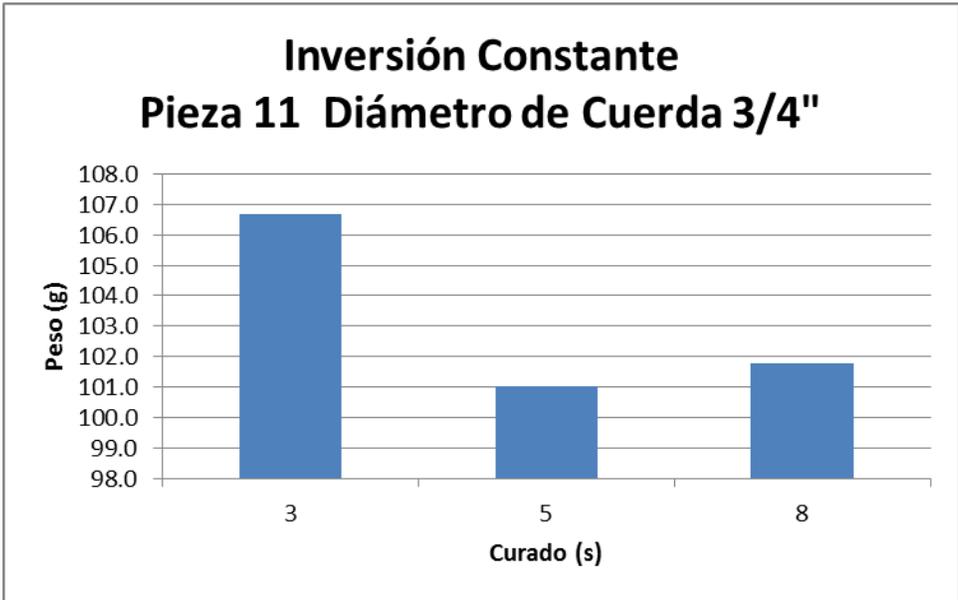


Figura 13. Gráfico de Barras de la Pieza 11 Diámetro de Cuerda 3/4 de pulgada con tiempo de inversión constante, a tiempos de 3, 5 y 8 segundos de curado, compara los pesos a cada tiempo

Por simple lógica se puede conocer que piezas de mayores tamaños tendrán un peso mayor, este razonamiento puede ser aplicado al tiempo de inversión, cuando se posee un tiempo de inversión constante se esperaría que el tamaño de la cascarilla sea más grande, en el apartado 4.3 sobre gráficos de dispersión, se hizo uso de información respectiva al tamaño de cascarilla, el resultado que se obtuvo en este apartado fue que el tamaño de cascarilla posee una tendencia a incrementar cuando el valor de inversión es mayor, sin embargo la homogeneidad del tamaño de cascarilla es un problema, ya que la cascarilla que se forma se mantiene heterogénea, fue debido a esta heterogeneidad que se sacaba un espesor promedio para la cascarilla.

La figura 12 y 13 muestran algunos de los datos para la pieza 11 en medidas $\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$ de pulgada, en ambas figuras el tiempo de inversión fue el mismo.

Se sabe que el tiempo de inversión incrementa el tamaño de la cascarilla, en las piezas obtenidas para las figuras 12 y 13 existe una variación en el peso, siendo que para la medida de $\frac{1}{2}$ pulgada la variación es aproximadamente de 20 gramos, en el caso de la medida $\frac{3}{4}$ la variación es de aproximadamente 7 gramos. La variación en $\frac{3}{4}$ de pulgada es menor, sin embargo se puede explicar que para $\frac{1}{2}$ de pulgada en ocasiones las piezas no se desarenan con facilidad, esto puede deberse a diferentes causas, la primera causa probable sería una vibración insuficiente, es decir, la cantidad de vibración aplicada al corazón para desarenarse es insuficiente respecto al tiempo que pasó en posición de inversión, otra explicación es que existe arena en el interior del corazón en posiciones donde no se puede escapar la cual termina siendo parte del corazón final, una última explicación es la formación de "cúmulos" de arena que se interponen a la salida de la arena del corazón, añadiendo finalmente un extra de peso a las piezas.

Con el rastreo de los pesos en 14 y 15 se facilita la observación del comportamiento del peso, en estos gráficos se agregan las barras de error típico, en este tipo de error se incluyen los errores de muestreo, medida, observacional y operacional, siendo el error típico en la figura 14 es de 10 gramos para cada una de las mediciones mientras que para la figura 15 es de 2.5 gramos en cada medición.

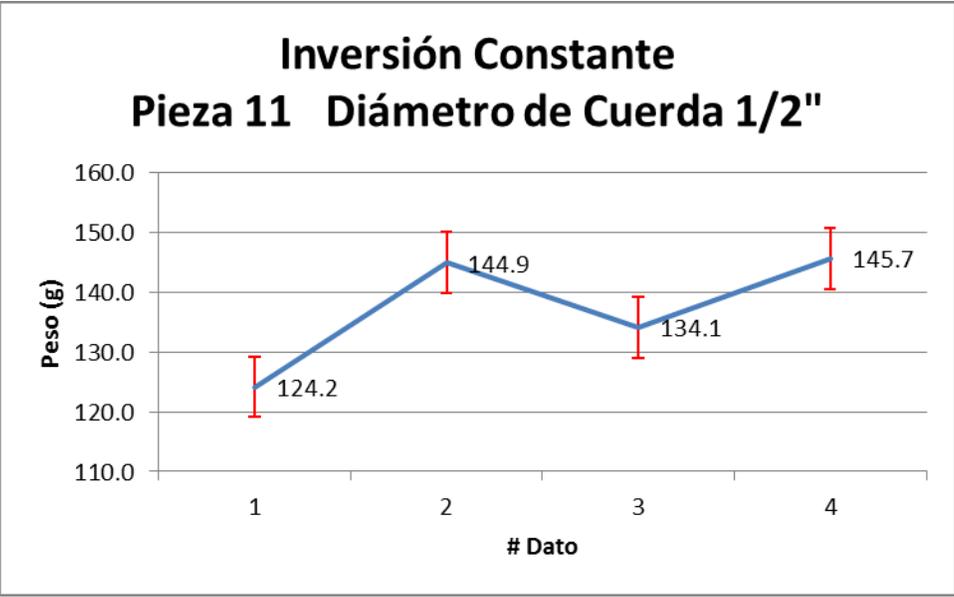


Figura 14. Rastreo de peso en la Pieza 11 Diámetro de Cuerda 1/2 de pulgada a tiempo de inversión constante, con 3, 4, 6 y 8 segundos de curado

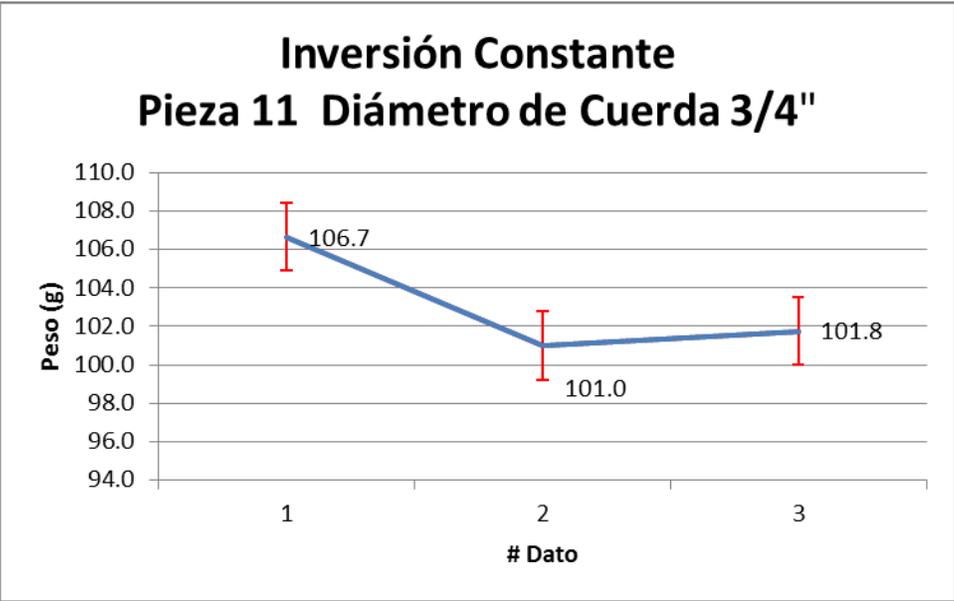


Figura 15. Rastreo de peso en la Pieza 11 Diámetro de Cuerda 3/4 de pulgada a tiempo de inversión constante, con 3, 5 y 8 segundos de curado

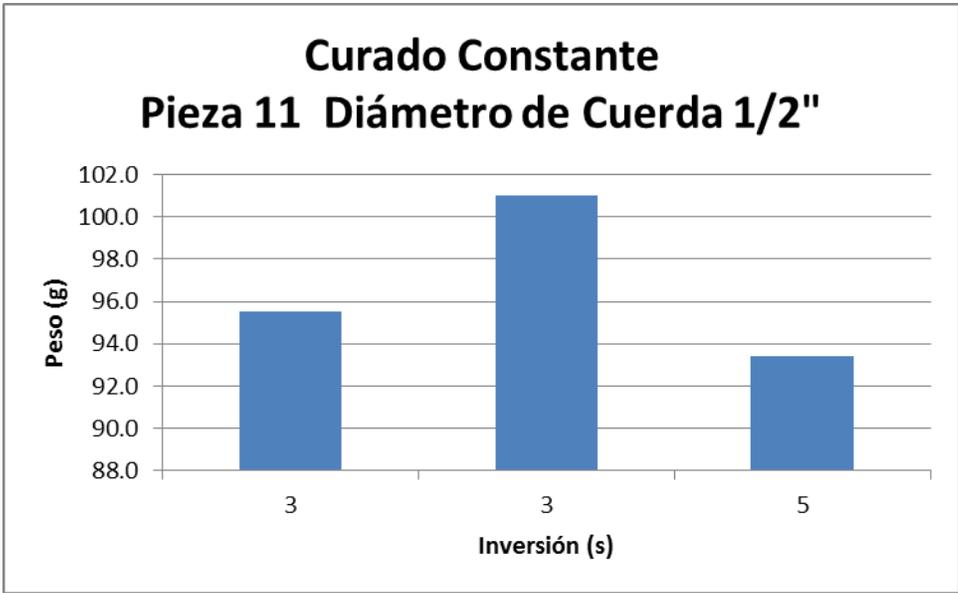


Figura 16. Gráfico de Barras para la Pieza 11 Diámetro de Cuerda 1/2 de pulgada con tiempo de curado constante, a tiempos de 3 y 5 segundos de inversión, compara los pesos a resultantes

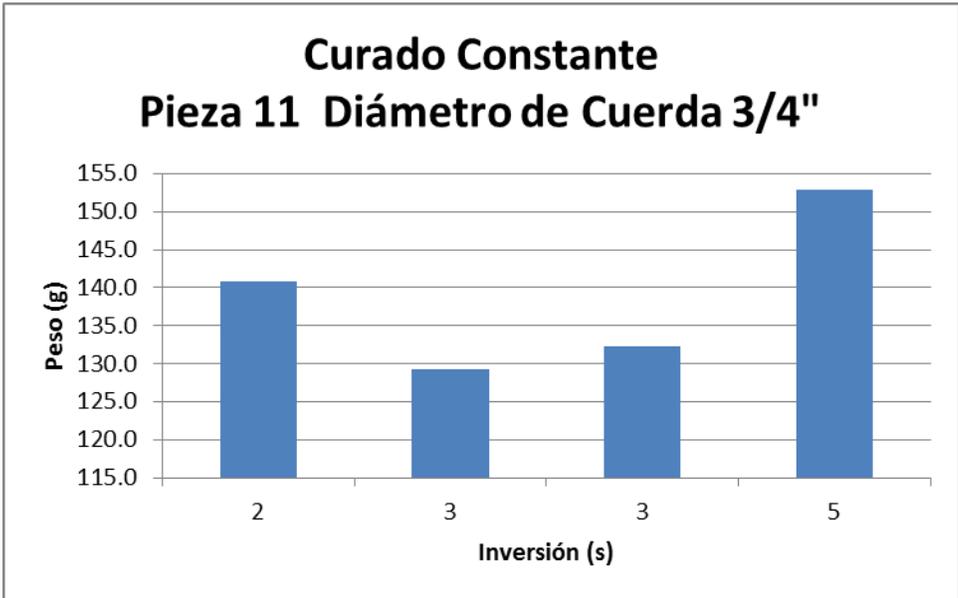


Figura 17 - Gráfico de Barras para la Pieza 11 Diámetro de Cuerda 3/4 de pulgada con tiempo de curado constante, a tiempos de 2, 3 y 5 segundos de inversión, se comparan los pesos a resultantes

En las figuras 16 y 17 se tiene también para la pieza 11 en medidas de $\frac{1}{2}$ y $\frac{3}{4}$ de pulgada, en estos gráficos los datos son manteniendo el tiempo de curado constante, lo que varía en esta ocasión es el tiempo de inversión.

Con los datos empleados es más sencillo apreciar que a un tiempo mayor de inversión el peso es mayor (figura 17), los datos obtenidos en las figuras anteriores muestran una tendencia al incremento, sin embargo no son contundentes, esto se debe a la figura 16 en donde el valor máximo de peso es un valor de inversión en donde tenemos dos valores, uno mayor que otro y con una variación aproximada de 6 gramos.

Si se analizan una mayor cantidad de datos para las demás piezas que se obtuvieron posiblemente se observaría una variación como se encuentra en la figura 16, este comportamiento abre el espacio a la creación de intervalos o variaciones permitidas.

Anteriormente se discutió sobre la eficiencia en el desarenado, así como la influencia de diferentes errores, los cuales terminan afectando al peso final de la pieza, al inicio de este capítulo se mostró un gráfico de los pesos promedios en cada medida, a pesar de existir una variación asociada a los errores que son acumulativos, la mejor forma de ver este tipo de cambios es por medio del comportamiento de la media, esto nos sugerirá que será la tendencia en la cual se acostumbrará trabajar, por lo que cada peso promedio puede ser representante de cada medida.

En mediciones al momento como ocurrió en la obtención de información para este trabajo, es posible emplear valores de referencia para poder determinar si se está trabajando en condiciones trabajo estándar, para esto se crean patrones los cuales se siguen, metodologías de trabajo y también metodologías de evaluación al final, el uso promedio de los pesos nos puede decir al momento si se está trabajando de manera adecuada, el peso promedio para las piezas de $\frac{3}{4}$ de pulgada es de 107.9 gramos, mientras que para la pieza 11 el promedio de peso para la figura 16 es de 96.63 gramos, el promedio de la pieza 11 es inferior al obtenido para los correspondientes $\frac{1}{2}$, empleando el gráfico 18 en donde se hizo rastreo de los pesos para la pieza 11 en tenemos una barra de error con valor de 5 gramos, por lo que a pesar de sumarle este error sigue siendo menor; en el caso de la figura 19, el valor de las barras de error era de 10 gramos.

El valor para las barras de error en inversión y curado constante a $\frac{3}{4}$ pulgada es idéntico y diferente en $\frac{1}{2}$ de pulgada, este resultado sugiere incrementos en los errores a tamaños mayores.

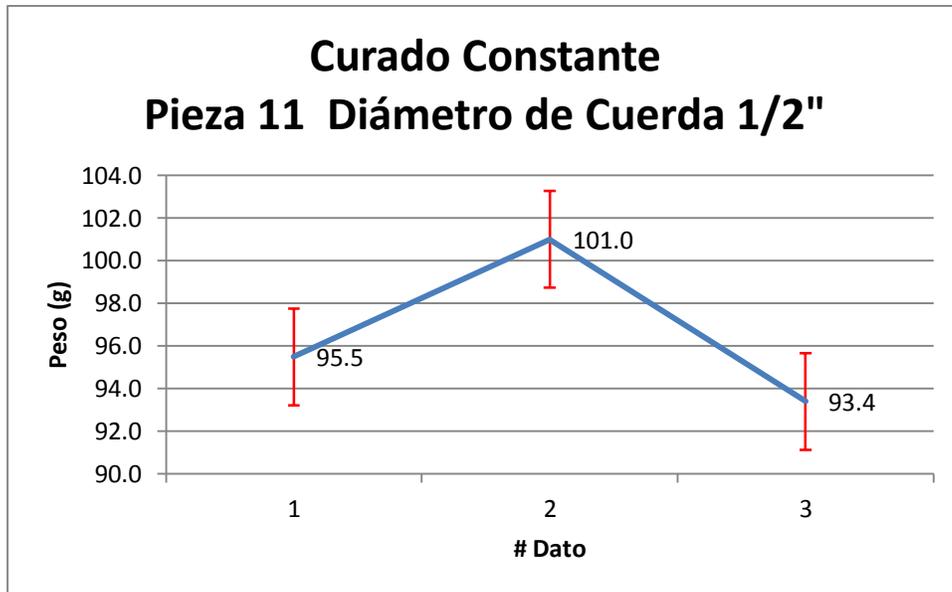


Figura 18. Variación de peso en la Pieza 11 Diámetro de Cuerda ½ de pulgada a tiempo de curado constante, con 3 y 5 segundos de inversión

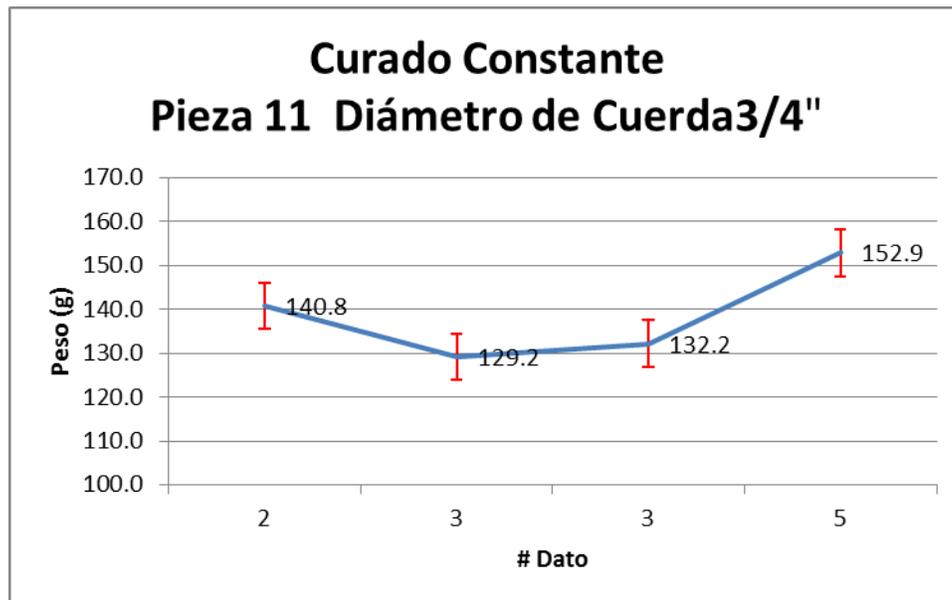


Figura 19. Variación de peso en la Pieza 11 Diámetro de Cuerda ¾ de pulgada a tiempo de curado constante, con 2, 3 y 5 segundos de curado

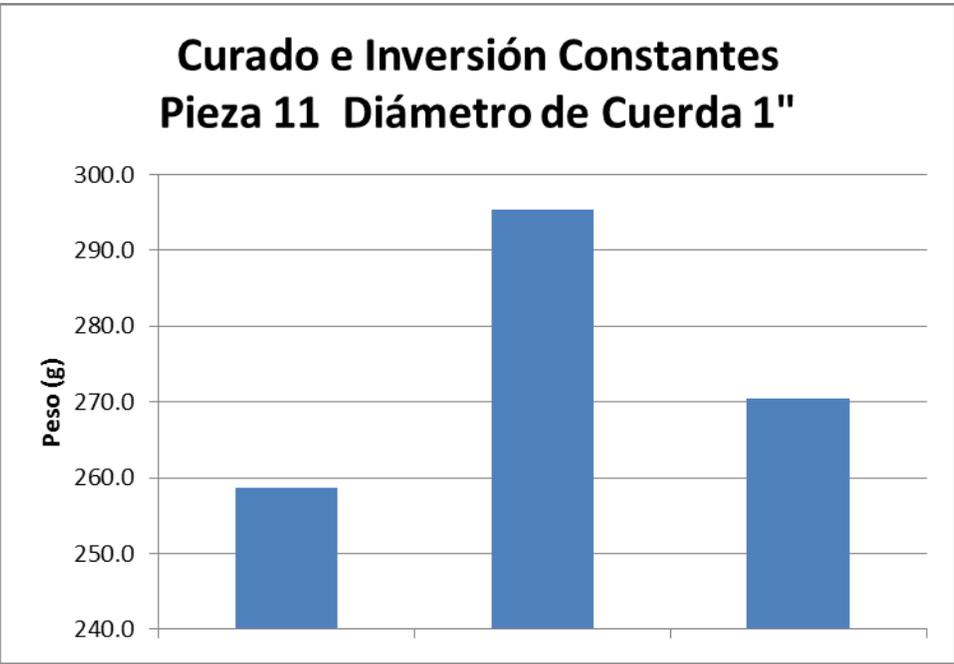


Figura 20. Gráfico de Barras de la Pieza 11 Diámetro de Cuerda 1 de pulgada con tiempo de inversión y curado constante

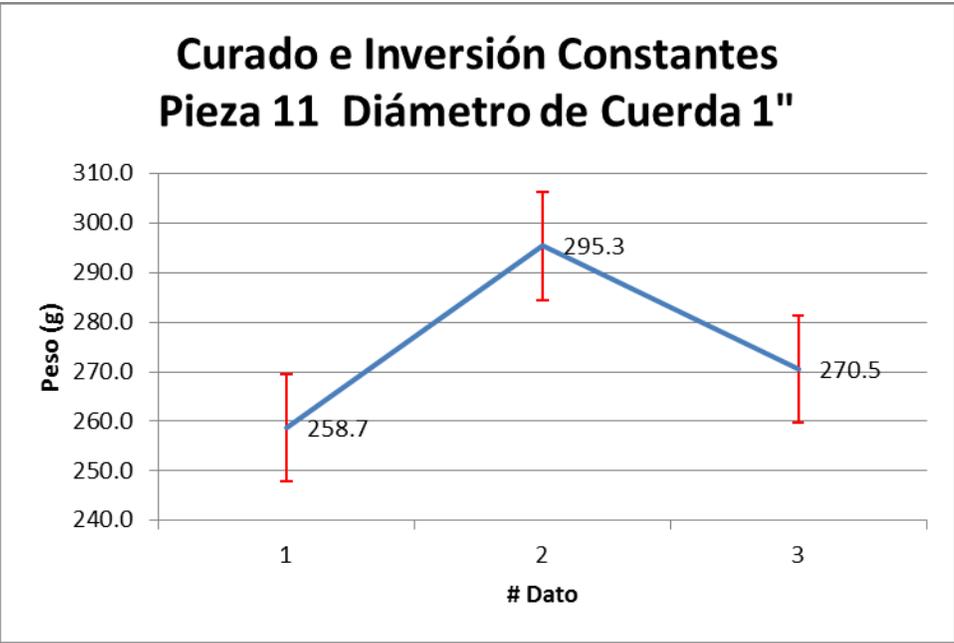


Figura 21. Variación de peso en la Pieza 11 Diámetro de Cuerda 1 de pulgada con tiempo de inversión y curado constante

Hasta el momento se vieron casos en donde los tiempos de inversión y curado se mantienen constantes mientras el otro varía, por lo tanto es necesario recurrir a conocer un caso donde los tiempos de inversión y curado se mantienen iguales, con el análisis de este tipo de situación es posible la idea de considerar la variación del proceso como un efecto acumulativo, por lo tanto es posible trabajar con valores promedio.

Las figuras 20 y 21 son al igual que las figuras presentadas anteriormente de la pieza 11, sin embargo en esta ocasión el diámetro del cuerda para la pieza es únicamente 1 pulgada.

El caso de la figura 20 nos muestra un comportamiento similar al de los gráficos anteriores, no existe una constancia en los pesos, en este caso en donde los tiempos de inversión y curado son constantes se esperaría tener una variación mínima, por otra parte al mostrar una variación en diferentes ocasiones en donde se fabricó esta pieza nos puede estar mostrando la variación propia del proceso.

Existen algunos planteamientos los cuales ayudan a reducir la variación en un proceso, se comienza con encontrar la principal fuente de variación en el proceso, también se determinan las causas que originan la variación, posteriormente se determina el límite de variación.

Como era de esperarse el error marcado por las barras es aproximadamente de 20 gramos, lo cual llega a duplicar el valor obtenido para el tamaño de $\frac{3}{4}$, en este último es posible conocer que existe un efecto acumulativo en la variación de los corazones elaborados a mayores tamaños la variación es mayor.

La variación tratada a razón del peso nos deja ver que el resultado depende directamente de los parámetros inversión y curado, debido a que estos representan ser los más característicos, el rastreo de los pesos para los corazones obtenidos en el proceso es un modo de saber si estamos trabajando en los límites permitidos para cada medida.

6.3 Evaluación de la Propuesta

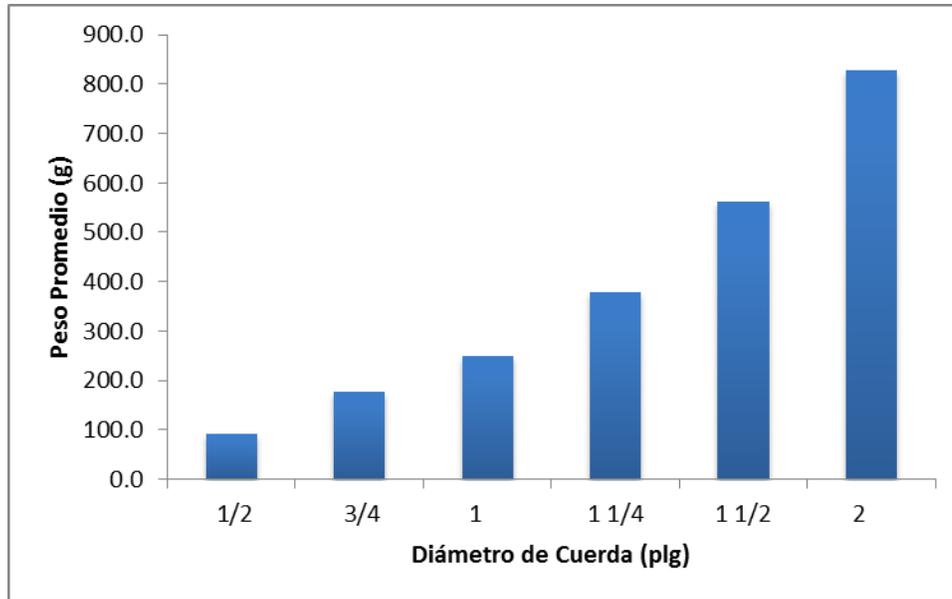


Figura 21. Gráfico de Barras para el peso promedio en corazones evaluados por la propuesta creada

En la figura 21 se muestran los resultados de pesos promedio correspondientes a la 3era etapa, la figura por sí misma solamente muestra los pesos promedio que se obtuvieron. Los pesos promedio se espera que sean menores debido a que se trabajó esta etapa acorde a una propuesta creada, en esta propuesta se mostraban tiempos para soplado, inversión, curado y carga, sin embargo de estos cuatro parámetros solo dos son los que se seleccionaron de manera meticulosa, como se ha mencionado con anterioridad inversión y curado son los parámetros clave, al seleccionar parámetro que aseguraban una reducción de peso.

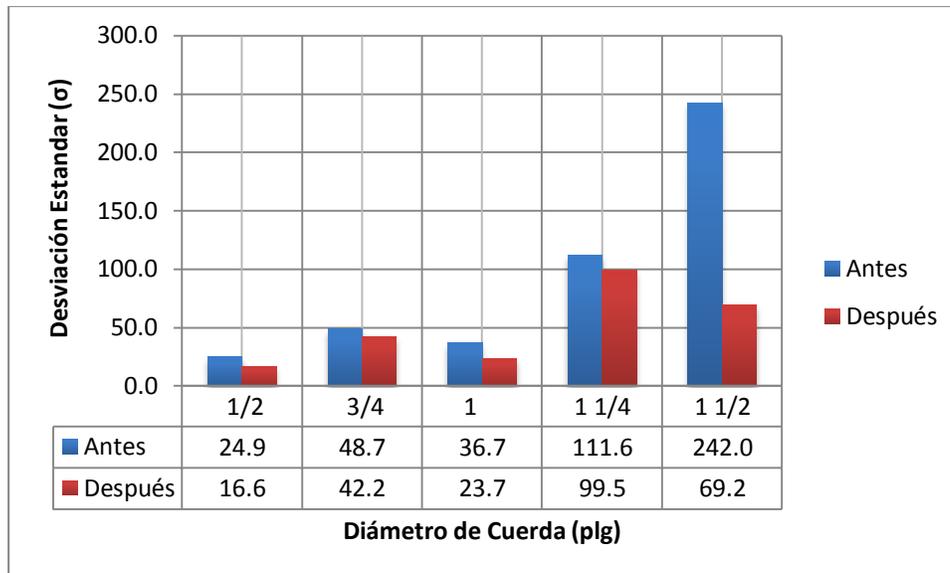


Figura 22. Comparación en las desviaciones estándar para los corazones, las desviaciones representan una variación en gramo para el peso

La variación típica del proceso puede notarse de dos formas ya sea por el cambio en los parámetros o el cambio en los pesos, en la figura 22 observamos que se hace una comparación entre datos de la 1era etapa y 3era etapa, el color azul corresponderá a la primera etapa y el color rojo a la tercera etapa.

Los resultados obtenidos son los deseados, esto se debe a la reducción en la desviación estándar de un estado anterior a uno posterior, esta reducción expresada en gramos nos ayuda a mantener un control estricto en el proceso, por lo tanto, debido a las condiciones en las que se obtuvieron los resultados para el estado posterior, es posible decir que la desviación estándar encontrada en la figura 22 para los diferentes diámetros de cuerda, corresponde una variación misma del proceso, sabiendo esto la reducción de la variación en peso es imposible llevarla a cero.

En la figura 22 se retiró el diámetro de cuerda correspondiente a 2 pulgadas debido a que poseía solamente una prueba.

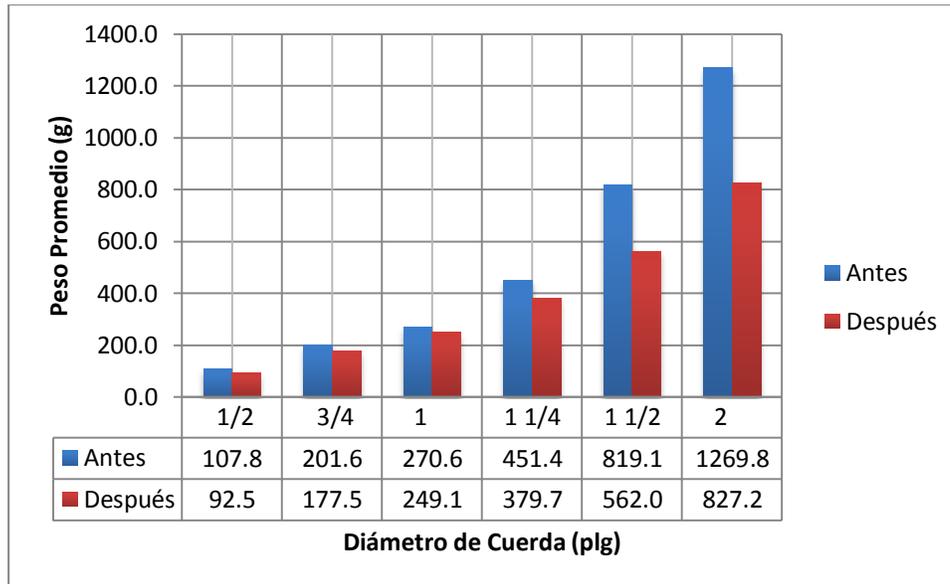


Figura 23. Comparación antes y después para los pesos promedio en cada diámetro de cuerda

Anteriormente ya se han presentado los pesos promedio para los corazones, en la figura 23 se encuentran los pesos promedio del estado anterior y el posterior. En este gráfico podemos observar que los pesos promedio en el estado anterior son mayores a los del estado posterior, tras ver estos resultados comparados es posible saber que se han llegado a cubrir dos objetivos de este trabajo, logrando encontrar el efecto de las variables en el proceso y proponer el trabajo óptimo de los parámetros.

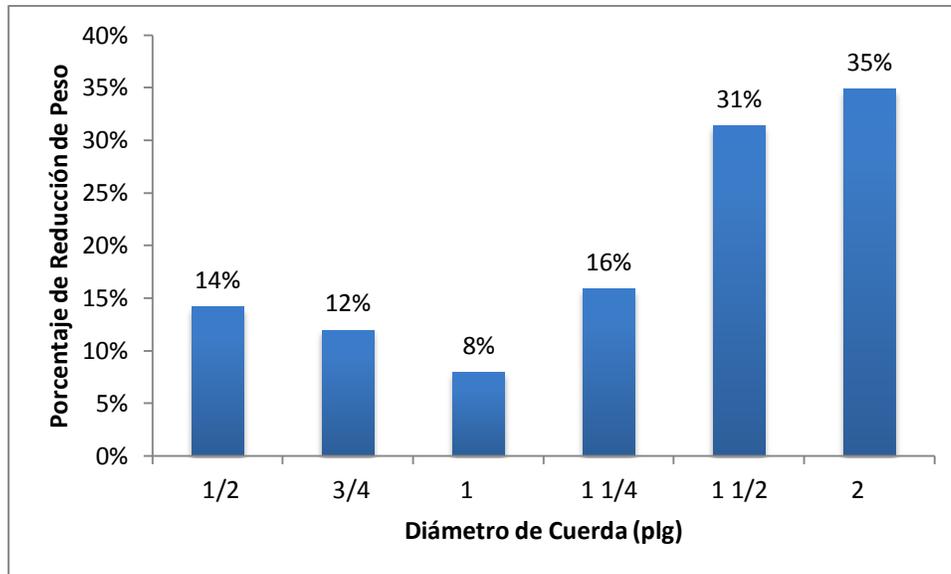


Figura 24. Gráfico de Barras para el porcentaje de reducción en peso

La figura 24 nos muestra un gráfico en donde podemos observar la reducción de peso en porcentaje, en este gráfico podemos observar que los corazones hasta $1 \frac{1}{4}$ de pulgada tienen una reducción promedio de 12%, siendo el diámetro de cuerda de una pulgada una excepción, esto nos quiere decir que las reducciones en peso a pesar de haberse logrado conseguir no son motivo de un cambio drástico, caso contrario a las medidas $1 \frac{1}{2}$ y 2 pulgadas en donde la reducción es de 30%. Porcentajes tan mínimos de reducción pueden estar haciendo referencias a que se está cerca de conseguir las condiciones mínimas para poseer un corazón útil para el proceso posterior.

Otra forma de ver a la figura 24 es por medio de tomar los valores como una medida de acercamiento al punto óptimo del proceso, cuanto menor sea la reducción es posible decir que nos estamos acercando a menores variaciones en el proceso, por lo que se puede decir también que se ha alcanzado un control óptimo del proceso, cuanto mayor sea el porcentaje de reducción servirá como un indicador de que la variación en el proceso es mayor, por lo tanto requiere de una mayor atención.

A diferencia de la desviación estándar este gráfico es una fuente de información indirecta sobre la variación y control del proceso.

6.4 Pruebas Complementarias

El rango es un intervalo que se encuentra entre el valor máximo y el valor mínimo, cuando el rango es grande se entiende que los datos se encuentran dispersos en el conjunto, mientras que si es pequeño la dispersión será menor.

Se considera la presentación de los resultados en gráficos I-MR (Individual-Movil Range/ Rango Móvil para datos Individuales) debido a que presentan un carácter individual, el rango móvil que nos presentan estos gráficos es debido a la variación de un dato respecto a otro de manera consecutiva, siendo que se reporta un rango móvil promedio para las mediciones

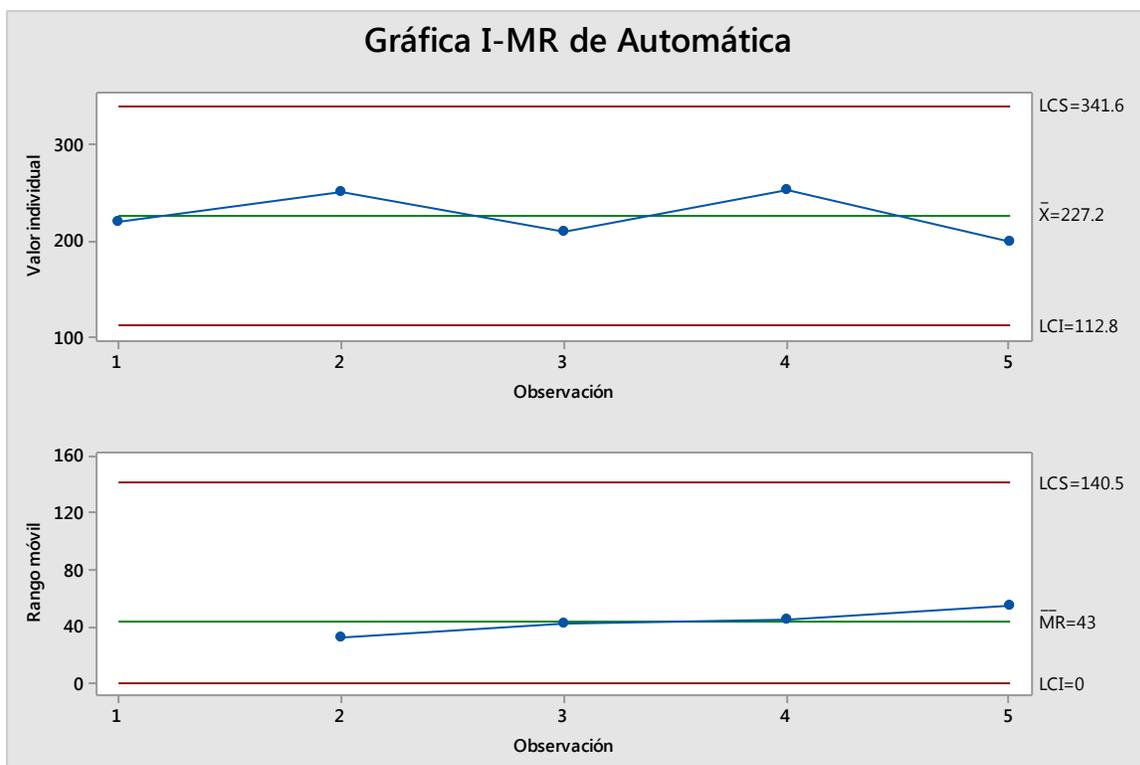


Figura 25. Gráfico I-MR para el ensayo de tracción en probetas de arena para corazones, los resultados corresponden a pruebas en frío efectuadas en máquina automática, las unidades para los valores son PSI.

Los ensayos de tracción en frío y caliente nos ayudan a conocer la fuerza necesaria para poder romper la arena.

Los resultados obtenidos para el ensayo en frío tienen un rango móvil de 40 a 43 PSI, lo que lleva a satisfacer que la variación se encuentra dentro de prácticamente el mismo rango (véase el MR en las figuras 25 y 26).

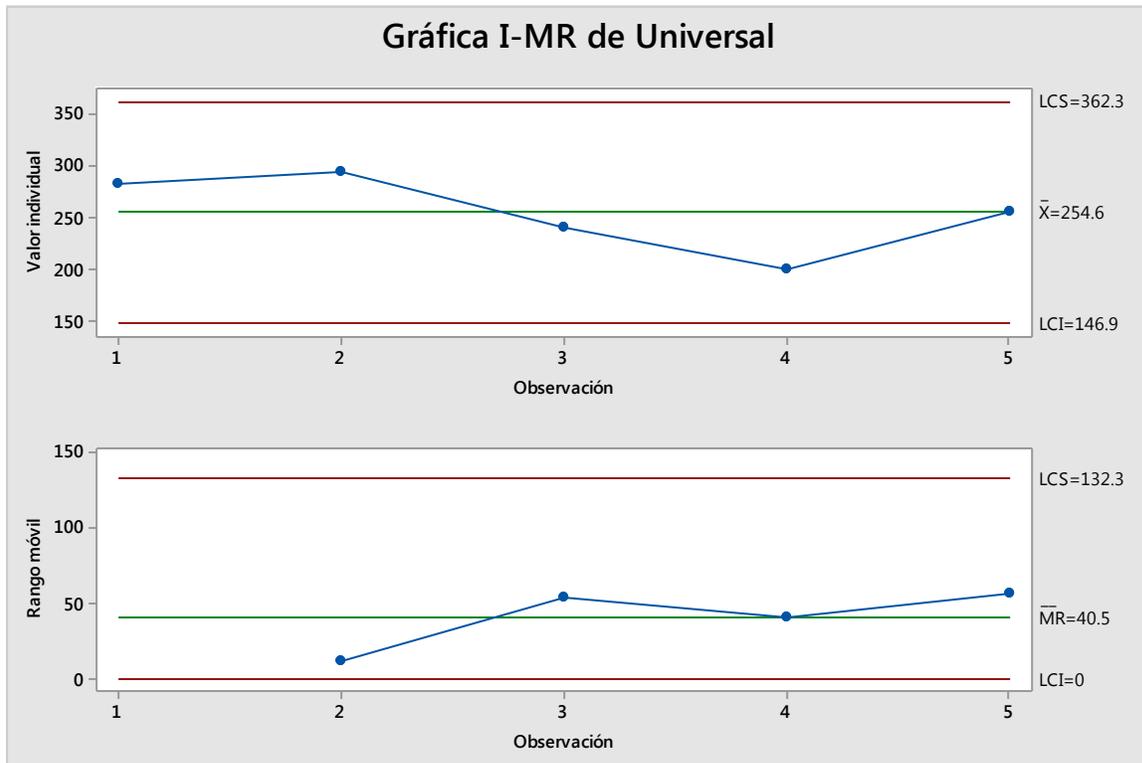


Figura 26. Gráfico I-MR para el ensayo de tracción en probetas de arena para corazones, los resultados corresponden a pruebas en frío efectuadas en una máquina universal para pruebas de arenas para la fundición, las unidades para los valores son PSI.

Los resultados de las figuras 26 y 25 nos indican que el rango posible de la arena ensayada es aproximadamente de 210 a 260 PSI de resistencia, la AFS hace una referencia en donde una arena con esta resistencia es útil para fundiciones de tamaño mediano en las que se requiere un acabado fino, sin embargo no se menciona el tamaño correspondiente a lo que se define como fundición mediana.

Para el material empleado en la obtención de piezas metálicas corresponde con la comparación que se hace respecto a la resistencia en frío

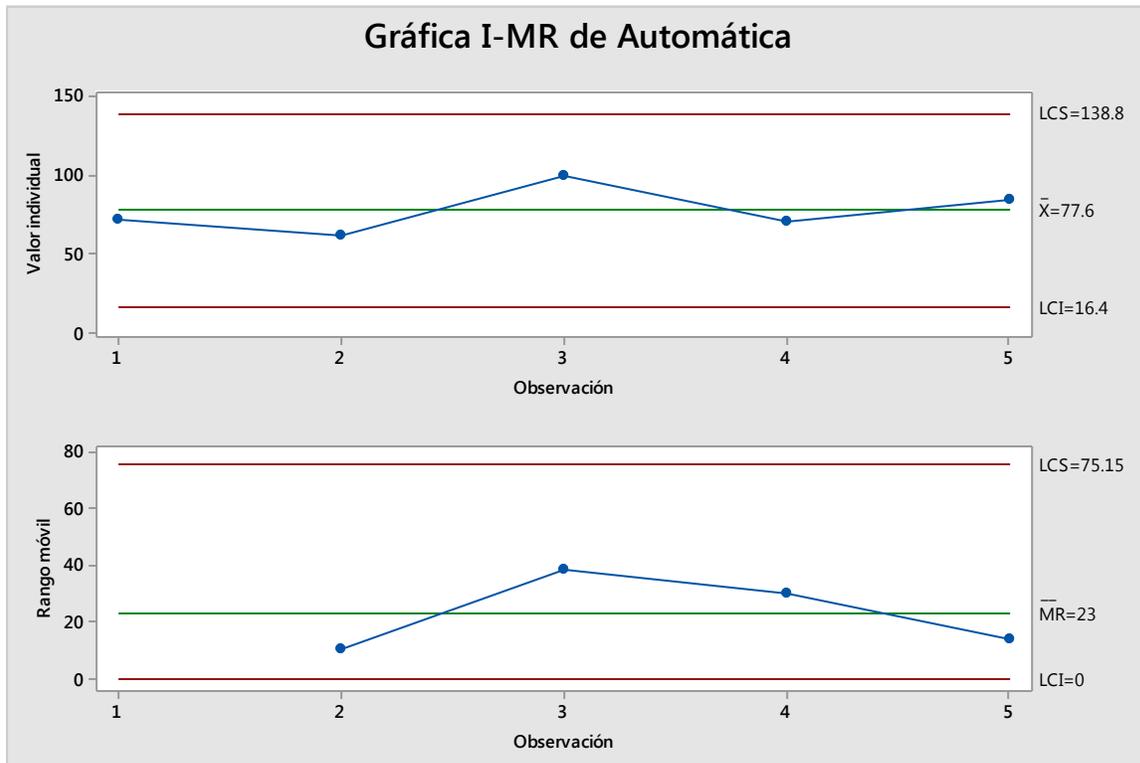


Figura 27. Gráfico I-MR para el ensayo de tracción en probetas de arena para corazones, los resultados corresponden a pruebas en caliente efectuadas en una máquina universal para pruebas de arenas para la fundición, las unidades para los valores son PSI.

Las figuras 27 y 28 nos muestran los resultados para las tracciones efectuadas en caliente, los resultados que nos muestran son diferentes a los que se tienen con las probetas en frío, la fuerza aplicada en las probetas en caliente es menor respecto a las probetas en frío (figuras 25 y 26).

Otro efecto particular es la variación del rango móvil a partir de los datos en frío, pasando de encontrarse en aprox. 40 PSI en frío a ser 20 PSI en caliente, por lo que la variación de datos es menor en las pruebas en caliente.

Se explica la diferencia entre caliente y en frío debido al tipo de resina, la cual podemos observar que es una resina la cual endurece conforme se va enfriando, siendo esta característica la que marca la diferencia en los resultados entre frío y caliente.

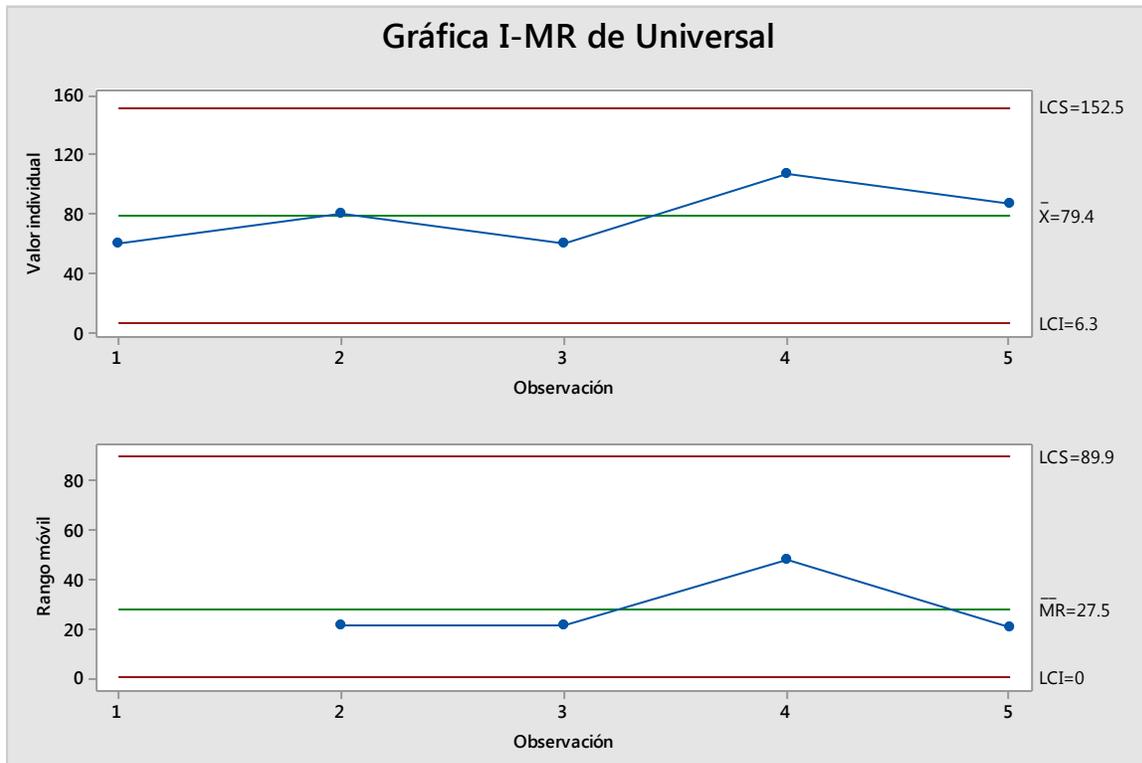


Figura 28. Gráfico I-MR para el ensayo de tracción en probetas de arena para corazones, los resultados corresponden a pruebas en caliente efectuadas en una máquina universal para pruebas de arenas para la fundición, las unidades para los valores son PSI.

Los resultados de resistencia tanto en caliente como en frío, corresponden a ciertas condiciones de preparación para la probeta, siempre y cuando la granulometría y el porcentaje de aglutinante sean los mismos.

Tabla 2
Tamaño de grano para la arena Shell Empleada

Resultado Granulometría	
# AFS	78.4

En cuanto al tamaño de grano la AFS en el libro Foundry Core Practice [4], nos dice que el tamaño de grano puede afectar el tiempo de cocción de un corazón, por lo que tamaños de grano más fino requieren un mayor tiempo; también no se ignora el efecto en la permeabilidad, la cual se ve afectada por el tamaño de grano.

Tabla 3

Resultado de la Prueba de Ignición

Prueba de Ignición	
%LOI	2.1

Por último la prueba de ignición nos muestra que el contenido volátil fue de 2.1%, este valor corresponde al contenido de material orgánico presente en la arena, entre el material orgánico se encuentra en mayor proporción el contenido de resina o aglutinantes empleados para recubrir a la arena.

En el proceso de fundición la adición de mayores contenidos de resina tendrán un efecto adverso, por lo que las piezas metálicas puede que presenten atrapamiento de gases, estos gases provendrán de los corazones; en caso de que el corazón no haya sido cocido adecuadamente en la etapa anterior, se tiene como posibilidad una activación de la resina para aglutinar la arena, formando de esta manera gases. Los sistemas de limpieza de aire y anticontaminantes también requieren información del contenido de resina para poder ser calculados a lo requerido [5].

Es necesario conocer la granulometría de la arena para corazones y el contenido de resina para poder tomar una decisión posterior al uso del corazón, el problema que sucede al uso de un corazón es la recuperación de la arena, en este paso se desea limpiar la arena que había estado recubierta. Existen diversos métodos en los cuales se pueden recuperar la arena para corazones, la más común es por volatilización de los componentes orgánicos, también se cuenta con una reducción de partícula y un lavado de grano con agentes químicos.

Conclusiones

- La variable Inversión tiene un efecto directo en el peso de los corazones y por lo tanto en el tamaño de la cascarilla.
- Pueden emplearse los parámetros de las tablas 8 y 9 en negritas como parámetros óptimos de proceso
- Las condiciones ideales se conseguirán cuando la variación promedio sea igual a la variación del proceso.
- La reproducibilidad del proceso es posible si el material y las condiciones de operación son las mismas.

Bibliografía

- [1]** Avendaño Héctor, De la Luz Martín, León Erika, Ramos Ricardo. (2008). Diseño y Fabricación de Modelos para fundición. Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. México.
- [2]** Barry Leonard. (1996). Metal Casting And Heat Treating Industry: Guide to Pollution Prevention. DIANE Publishing Company. USA.
- [3]** (1973) Shell Process Foundry Practice, 2nd Edition; American Foundrymen's Society: Des Plaines. USA.
- [4]** Harry W. Dietert. (1966). Foundry Core Practice. American Foundrymen's Society: Des Plaines. USA.
- [5]** (2002) Principles of the Shell Process; American Foundrymen's Society. USA.
- [6]** Twarog Daniel L.. (1993) Handbook on Investment Casting Process, American Foundrymen's Society, Des Plaines. USA.

Anexo 1 Información Obtenida para las diferentes Etapas Experimentales

Tabla 4

Resultados de la primera etapa desde la pieza 1 hasta pieza 9

Pieza	Diámetro de Cuerda (plg)	Soplado (s)	Inversión (s)	Curado (s)	Carga (s)	Peso Promedio Actual (g)
1	3/4	3	4	7	2	175.7
		3	2	7	2	156.3
	1	3	6	6	4	229.1
		5	6	8	4	222.9
2	3/4	3	5	13	4	496.9
3	1/2	7	10	7	4	541.1
		3	6	11	4	452.9
4	3/4	3	7	14	3	195.6
5	1/2	3	3	3	3	74.1
		4	3	6	3	78.4
		5	5	5	4	90.6
	3/4	3	4	4	4	143.6
		4	4	5	4	161.9
6	1/2	3	3	3	5	103.0
	3/4	3	4	7	5	134.4
7	3/4	4	8	5	5	196.0
	1	5	4	8	3	210.6
		2	8	10	12	252.8
8	3/4	4	3	5	3	213.3
		5	3	6	3	180.2
	1 1/2	3	20	10	3	1120
9	3/4	5	4	3	4	264.4
		6	3	3	3	275.0
		4	3	3	3	261.5
		5	4	3	3	275.0
		3	4	4	4	292.1
	1	5	3	6	3	304.3
		4	5	6	4	305.9
		3	4	8	4	320.9
	1 1/2	3	16	12	3	1170.0
	1 1/2	1	12	11	10	1066.7

Tabla 5

Resultados de la primera etapa desde la pieza 10 hasta pieza 11

Pieza	Diámetro de Cuerda (plg)	Soplado (s)	Inversión (s)	Curado (s)	Carga (s)	Peso Promedio Actual (g)
10	3/4	4	4	8	8	218.1
		5	3	6	9	245.7
		2	7	6	7	246.1
		2	3	7	8	238.3
		5	3	4	3	278.5
		3	3	5	4	269.8
	1	8	4	6	5	289.1
		4	7	6	1	342.4
	2	6	11	11	10	1254.0
11	1/2	4	5	5	7	93.4
		2	3	5	2	101.0
		3	3	8	3	101.8
		5	3	3	4	106.7
		5	3	5	3	95.5
		3	4	6	4	108.3
		3	2	4	7	110.7
	3/4	4	4	3	4	124.2
		3	4	8	3	145.7
		3	5	7	2	152.9
		5	4	4	5	144.9
		3	4	6	6	134.1
		3	2	7	4	140.8
		1	3	7	4	129.2
		5	3	8	5	126.9
		4	3	7	2	132.2
		3	3	4	3	142.1
		4	3	5	3	132.1
		4	3	4	2	128.6
		4	3	7	2	119.8
	1	4	4	4	3	258.7
		4	4	4	3	295.3
		4	4	4	3	270.5
		4	5	7	6	263.3
		2	4	5	14	262.2
		5	3	4	3	280.0
		3	6	6	4	291.9
		4	3	10	5	238.3

Tabla 6

Resultados de la primera etapa desde la pieza 11 hasta pieza 13

Pieza	Diámetro de Cuerda (plg)	Soplado (s)	Inversión (s)	Curado (s)	Carga (s)	Peso Promedio Actual (g)
11	1 1/2	2	14	20	2	651.2
	2	2	8	9	3	2710
		2	17	10	8	2873.3
		2	12	18	12	2590.0
12	1/2	2	5	7	4	93.3
		4	4	7	2	102.4
		2	3	8	11	118.2
		2	4	10	11	102.8
	3/4	4	5	9	3	145.3
		3	4	9	4	139.5
		3	5	7	4	147.5
		3	4	4	4	159.5
	1	5	3	10	3	213.2
		4	7	8	5	253.0
	1 1/4	7	7	8	8	345.3
		4	9	3	7	511.5
		3	10	7	3	448.6
		3	6	7	5	345.8
	1 1/2	8	18	22	100	668.9
	13	1/2	3	2	7	2
3/4		5	2	4	3	194.5
1		4	2	7	2	200.2
		3	4	5	2	266.2
		3	4	5	2	259.7
		3	8	12	4	265.0
		4	5	9	2	231.6
1 1/2		3	7	5	2	533.1
		4	9	3	7	511.5
		4	5	10	4	490.6
2		4	5	6	2	623.3
		4	6	5	2	627.6

Tabla 7

Resultados de la primera etapa desde la pieza 14 y pieza 15

Pieza	Diámetro de Cuerda (plg)	Soplado (s)	Inversión (s)	Curado (s)	Carga (s)	Peso Promedio Actual (g)	
14	1/2	3	1	6	2	118.0	
		3	3	6	2	120.3	
		3	4	8	2	121.8	
		3	5	12	4	107.7	
	3/4	2	4	4	4	187.1	
		3	3	1	4	187.2	
		4	4	6	8	195.3	
		3	4	7	7	196.7	
		3	4	8	7	173.4	
		3	5	8	6	184.0	
		1	5	6	2	177.5	
		3	5	6	3	207.1	
		2	6	5	3	179.8	
		2	4	5	2	179.0	
		3	4	4	3	193.7	
		3	3	4	3	181.6	
		2	5	9	2	214.2	
		3	4	5	2	214.4	
		1	3	7	9	4	282.2
			3	5	9	4	302.4
	3		5	12	4	333.0	
	3		6	10	4	275.7	
	3		5	8	4	278.2	
	1 1/4	2	11	8	6	605.8	
	1 1/2	1	18	27	2	839.1	
		1	18	12	2	836.1	
		1	13	10	5	739.5	
		2	18	15	2	926.7	
	2	3	10	8	30	880.0	
		4	15	13	5	1016.7	
		4	15	10	5	1000.2	
		1.1	13	18	10	963.3	
3		11	9	5	720.0		
3		26	6	4	1333.3		
2		18	20	4	1236.3		
15	3/4	3	4	10	4	250.2	

Tabla 8

Resultados tercera etapa, en negrita se encuentra la propuesta, debajo de la propuesta esta los resultados de la prueba (I).

Pieza	Diámetro de Cuerda (plg)	Soplado (s)	Inversión (s)	Curado (s)	Carga (s)	Peso Promedio (g)
1	3/4	3	4	7	2	175.7
		3	2	5	2	178.8
2	3/4	3	5	13	5	496
		2	6	12	5	484
3	3/4	7	10	7	4	541.1
		2	9	8	1	498.5
5	1/2	3	3	3	3	74.1
		3	4	6	2	77.5
	3/4	3	4	4	4	143.6
		3	4	4	2	144.8
4	4	5	3	141.6		
7	1	5	4	8	3	210.6
		4	5	9	6	224.4
9	3/4	4	3	3	3	261.5
		1	4	4	11	225.3
	1	5	3	6	3	304.3
		3	3	4	4	303.8
10	3/4	2	3	7	8	238.3
		2	2	3	5	256.2
		3	2	2	3	238.3
	1	4	7	6	1	342.4
		3	3	3	4	278.9
		3	2	2	3	297.4
11	1/2	2	3	5	2	101
		3	3	6	4	93.3
		2	1	6	4	108.9
	3/4	4	4	3	4	124.2
		2	3	2	3	134.6
		4	3	3	5	131.2
		2	3	4	8	120.9
	1	4	4	4	3	258.7
		3	3	5	2	221.5
		2	2	2	5	239.4
		5	3	5	4	245.6
		4	3	5	3	255.7
	1 1/2	2	14	20	2	651.2
1		12	15	3.5	507.9	
1		12	20	3.5	640	

Tabla 9

Resultados faltantes tercera etapa, en **negrita** se encuentra la propuesta, debajo de la propuesta esta los resultados de la prueba (II)

Pieza	Diámetro de Cuerda (plg)	Soplado (s)	Inversión (s)	Curado (s)	Carga (s)	Peso Promedio (g)
12	3/4	3	4	4	4	159.5
		3	3	5	5	147.4
		3	4	4	5	156.7
		3	3	7	4	135.4
	1	5	3	10	3	213.2
		1	3	9	6	223.3
		2	5	4	1	253.1
	1 1/4	3	6	7	5	345.8
		3	5	7	4	309.3
13	3/4	4	3	4	2	194.5
		2	4	4	1	161.5
		2	4	5	1	165.2
	1	3	4	5	2	266.2
		5	5	5	4	260.3
	1 1/2	4	5	10	4	533.1
		2	6	4	2	538.1
	1/2	3	3	6	2	120.3
		3	3	5	2	130.0
14	3/4	2	4	4	4	187.1
		4	3	7	3	171.3
		4	3	7	4	175.9
		4	2	7	3	160.1
		3	3	4	2	191.3
		3	4	4	2	185.6
	1	3	5	9	4	302.4
		3	4	10	2	240.2
	1 1/4	2	11	8	6	605.8
		3	6	6	4	450
	2	4	15	13	5	1016.7
		3	9	8	6	827.2
	15	3/4	3	4	10	4
3			5	11	6	259.9

Tabla 10

Resultados de las pruebas de tracción en frío y caliente para la arena shell

Frío	Automática	Universal	Caliente	Automática	Universal
	220	282		72	60
	252	294		62	81
	210	241		100	60
	254	200		70	108
	200	256		84	88
DESVEST	24.6	37.0	DESVEST	14.8	20.3
Rango Variable	43	40.5	Rango Variable	23	27.5

Tabla 11

Resultados para el análisis granulométrico

	# Malla	Retenido (g)	% Retenido	Factor Multiplicador	Producto
	6	0	0	3	0
	12	0	0	6	0
	20	0	0	10	0
	30	0	0	20	0
	40	0.851	0.754	30	22.628
	50	4.04	3.581	40	143.231
	70	20.8	18.436	50	921.782
	100	48.35	42.854	70	2999.778
	140	31.862	28.240	100	2824.019
	200	6.11	5.415	140	758.165
	270	0.492	0.436	200	87.215
	PAN	0.32	0.284	300	85.088
Total		112.825	100.000		7841.906