

**PROPUESTA DE UNA MEZCLA ALTERNATIVA PARA LA ARENA  
VERDE DE JCR FUNDICIONES**

**Sebastián Díaz Betancourt**

**Tesis de grado presentada como requisito para la obtención del título de  
Ingeniería Industrial**

**Quito, Marzo 2012**

© Derechos de autor

Sebastián Díaz Betancourt

2012

Universidad San Francisco de Quito  
Colegio de Ciencias e Ingeniería Politécnico

HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS

Propuesta de una mezcla alternativa para la arena verde de JCR Fundiciones

**Luis Sebastián Díaz Betancourt**

Ximena Córdova, Ph.D.

Director de Tesis

---

Daniel Merchán, M.Sc.

Miembro del Comité de Tesis

---

Verónica León , M.Sc.

Miembro del Comité de Tesis

---

Edison Bonifaz, Ph.D.

Miembro del Comité de Tesis

---

Santiago Gangotena, Ph.D.

Decano del Colegio de

Ciencias e Ingeniería

---

Quito, 2012

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecimiento especial para la Universidad San Francisco de Quito, por permitir la realización de este trabajo de investigación, en especial a Ximena Córdova, PhD, directora de Ingeniería Industrial, por su valiosa ayuda como directora de tesis, así como también a todo el personal académico de la universidad que ayudaron para la elaboración de este proyecto.

A la empresa JCR Fundiciones que brindó sus instalaciones para este proyecto, así como también la oportunidad laboral ofrecida para la realización e involucramiento a fondo en el proyecto.

Agradecimiento especial al Ing. Gustavo López, gerente de producción, y al Ing. Gustavo Vera, Gerente de Ingeniería, de JCR Fundiciones quienes fueron puntales principales para la estructuración, modificación y análisis de los resultados obtenidos de la investigación.

## **DEDICATORIA**

Este trabajo va dedicado a mi familia, especialmente a mis padres Enrique Díaz y Cecilia Betancourt, a mi hermana Gabriela Díaz y mi sobrina Camila Lozada, personas que son la razón de ser de mi vida, quienes me han impulsado a mi realización humana y profesional, quienes han estado en los momentos de alegría y dolor, y que simplemente son el horizonte para todas las actividades en las que deseo emprender. Dedicó finalmente a Dios por todas las fuerzas y la esperanza que siempre me prodigó a lo largo de mi carrera estudiantil y por haberme brindado a la mejor de las familias.

## RESUMEN

El presente trabajo establece una composición alternativa para la arena verde de moldeo de JCR Fundiciones, a través de la metodología de diseño de experimentos. Para este propósito se utilizó un diseño factorial fraccionado  $2^{k-p}$  y un modelo de optimización simultánea para variables de respuesta. En primer lugar, se realizó un análisis de la situación actual de la empresa, que incluye el método actual que utilizan para la preparación de la arena verde, luego se identificaron los factores o componentes críticos que intervienen en la preparación de la arena y que sugieren tener impacto sobre las propiedades de la misma. Luego se otorgó a cada factor, niveles apropiados y/o cantidades de dosificación. Posteriormente se realizaron pruebas experimentales con las distintas dosificaciones y se analizó su impacto sobre las propiedades de la arena verde. Con los resultados obtenidos, se construyeron modelos de regresión para predecir cada una de las propiedades de la arena, se las optimizó simultáneamente y se obtuvo una composición de arena verde con características deseables para los trabajos de moldeo y fundición. Finalmente, como apoyo al trabajo realizado, se incluyeron propuestas para el control y seguimiento de la composición alternativa, en este punto se usaron tablas de control para mediciones individuales que son parte de la metodología de control estadístico de la calidad.

## **ABSTRACT**

This work states an alternative composition for molding green sand JCR Foundries, through the design methodology of experiments. For this purpose was used a fractional factorial design 2k-p and a simultaneous optimization model for response variables. First, analysis was performed of the current situation of the company, including the current method used for the preparation of green sand, then identified the critical factors or components involved in the preparation of the sand and suggest have an impact on the properties thereof. Then was gave each factor, appropriate levels and/or dosage amounts. Later experimental test was conducted with different dosages and evaluating its impact on the properties of the green sand. With the results, regression models were constructed to predict each of the properties of the sand; they are optimized simultaneously and obtained a green sand composition with desirable characteristics for molding and casting work. Finally, in support of the work done included proposals for the control and monitoring of alternative composition, at this point were used control charts for individual measurements are part of the methodology of statistical control of quality.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>1. CAPÍTULO I: GENERALIDADES</b>	<b>Página</b>
1.1. Introducción.....	1
1.2. Objetivo General.....	2
1.3. Objetivos Específicos.....	2
1.4. Metas del proyecto.....	3
1.5. Descripción de actividades para la elaboración del proyecto.....	4
1.6. Descripción de la empresa.....	5
1.7. Definición del problema.....	6
1.8. Justificación del proyecto.....	7
<b>2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO</b>	
2.1. Diseño de experimentos.....	8
2.1.1. Definiciones básicas en el diseño de experimentos.....	8
2.1.2. Etapas para diseñar experimentos.....	10
2.2. Diseños factoriales.....	13
2.2.1. Principios básicos de diseños factoriales.....	13
2.3. Diseño factorial $2^k$ .....	14
2.3.1. Diseños factoriales fraccionados $2^k$ .....	16
2.3.2. Fracción un medio del diseño factorial $2^k$ .....	16
2.3.3. Fracción un cuarto del diseño factorial $2^k$ .....	19
2.3.4. Diseño factorial fraccionado $2^{k-p}$ .....	20
2.3.5. Resolución del diseño factorial $2^k$ fraccionado relacionado con su aleatorización.....	20
2.4. Verificación de la adecuación de un modelo de diseño de experimentos.....	21



2.4.1. El supuesto de normalidad.....	22
2.4.2. Gráfica de los residuales en secuencia en el tiempo.....	23
2.4.3. Gráfica de los residuales contra los valores ajustados.....	24
2.4.4. Transformaciones para mejorar la adecuación del modelo.....	25
2.5. Metodología de superficies de respuesta para optimización de procesos (MSR).....	26
2.5.1. MSR para variables de respuesta múltiples.....	26
2.5.2. Métodos de optimización de funciones con condición deseable.....	26
2.6. Control estadístico de procesos.....	28
2.6.1. Carta de control de Shewhart.....	29
2.6.2. Cartas de control para el promedio del proceso.....	30
2.6.2.1. Carta $\bar{x}$ .....	30
2.6.2.2. Fundamentos estadísticos de las cartas $\bar{x}$ .....	30
2.6.2.3. Cartas de control para mediciones individuales (IMR).....	32
2.6.2.4. Interpretación de las cartas de control $\bar{x}$ e IMR.....	34
2.7. Fundición o colado de metales.....	36
2.7.1. Procesos de fundición por colado.....	36
2.8. Fundición en arena verde.....	38
2.9. Modelo de fundición.....	39
2.10. Configuración base de moldes de arena verde.....	39
2.10.1. Componentes principales de los moldes de arena verde.....	40
2.10.2. Proceso de elaboración de moldes con arena verde.....	41
2.11. Composición de la arena verde.....	42
2.12. Preparación técnica de la arena verde.....	43
2.13. Características de la arena verde de moldeo.....	44
2.13.1. Clasificación de las arenas según el tamaño del grano.....	44
2.13.1.1. Medición del tamaño del grano.....	44

2.13.2. Clasificación de las arenas por la forma del grano.....	45
2.13.3. Propiedades de la arena verde.....	46
2.13.4. Valores típicos para las propiedades de la arena verde.....	50
2.14. Defectos en piezas fundidas en arena verde.....	51
2.14.1. Causas de defectos en piezas fundidas.....	51
2.14.2. Defectos en las piezas causados por la arena verde.....	52
2.15. Proyectos relacionados y/o complementarios para el estudio.....	56
2.16. Revisión literaria.....	59

### **3. CAPÍTULO III: ESTUDIO TÉCNICO**

3.1. Mapa de procesos de JCR Fundiciones.....	61
3.1.1. Nivel cero de los procesos de JCR Fundiciones.....	61
3.1.2. Nivel uno de los procesos de JCR Fundiciones.....	62
3.1.3. Nivel dos de los procesos de JCR Fundiciones.....	63
3.2. Cadena de valor de JCR Fundiciones.....	64
3.3. Proceso productivo: flujograma actual de la preparación de la arena verde de JCR Fundiciones.....	65

### **4. CAPÍTULO IV: MODELO EXPERIMENTAL Y EQUIPOS DE MEDICIÓN**

4.1. Delimitación del problema de estudio.....	66
4.1.1. Causas del problema y prioridades para el estudio experimental.....	66
4.2. Elección de factores para la composición de la arena verde.....	67
4.2.1. Análisis de la situación actual del sistema de arenas de JCR Fundiciones previo a la determinación de niveles para los factores de estudio.....	68
4.3. Determinación de niveles para los factores de la arena verde.....	71

4.4. Selección de las variables de respuesta para el estudio (propiedades de arena verde).....	73
4.5. Elección del diseño experimental.....	74
4.5.1. Estructura del diseño factorial fraccionado un octavo: $2_{III}^{6-3}$ .....	76
4.6. Tratamientos de arena verde a realizar.....	79
4.7. Pasos y consideraciones para la realización de los ocho tratamientos de arena verde.....	79
4.7.1. Equipos para la medición experimental de propiedades de la arena verde.....	80
4.7.1.1. Equipo de medición de resistencia a la compresión en verde de la arena.....	81
4.7.1.1.1. Equipo para la generación de probetas de arena verde.....	82
4.7.1.1.2. Pasos para la medición de resistencia de la arena verde.....	84
4.7.1.2. Equipo de medición de permeabilidad de arena verde.....	84
4.7.1.2.1. Pasos para la medición de permeabilidad de la arena verde.....	85
4.7.1.3. Equipo de medición de porcentaje de humedad de la arena verde.....	86
4.7.1.3.1. Pasos para la medición de porcentaje de humedad de la arena verde.....	88
4.7.1.3.2. Fórmula para el cálculo del porcentaje de humedad.....	88
4.7.2. Recolección de datos.....	89

## **5. CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL DESARROLLO EXPERIMENTAL Y PROPUESTA PARA LA COMPOSICIÓN DE LA ARENA VERDE**

5.1. Resultados de las propiedades de la arena verde una vez realizado los tratamientos del diseño experimental.....	91
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

5.2. Análisis de la varianza para la variable de respuesta: Permeabilidad.....	92
5.2.1. Análisis gráfico de los efectos principales para la permeabilidad.....	94
5.2.2. Análisis gráfico de Pareto para los efectos principales para la permeabilidad.....	95
5.2.3. Análisis gráfico de normalidad para los efectos principales de la permeabilidad.....	96
5.2.4. Análisis de la varianza para la permeabilidad con los factores significativos.....	97
5.2.5. Análisis de residuales para el modelo estandarizado para la permeabilidad.....	99
5.2.6. Análisis gráfico de Pareto de los efectos estandarizados para la permeabilidad.....	102
5.2.7. Análisis gráfico de normalidad para los efectos estandarizados para la permeabilidad.....	103
5.2.8. Análisis de interacciones sobre la permeabilidad.....	104
5.2.8.1. Análisis gráfico de las interacciones para la permeabilidad.....	104
5.2.9. Modelo de regresión para la variable Permeabilidad.....	106
5.3. Análisis de la varianza para la variable de respuesta: Resistencia en verde.....	107
5.3.1. Análisis gráfico de los efectos principales para la resistencia en verde.....	108
5.3.2. Análisis gráfico de Pareto para los efectos principales para la resistencia en verde.....	110
5.3.3. Análisis gráfico de normalidad para los efectos principales de la resistencia en verde.....	111
5.3.4. Análisis de la varianza para la resistencia en verde con los factores significativos.....	112
5.3.5. Análisis de residuales para el modelo estandarizado para la resistencia.....	113

5.3.6. Análisis gráfico de Pareto de los efectos estandarizados para la resistencia en verde.....	115
5.3.7. Análisis gráfico de normalidad para los efectos estandarizados para la resistencia en verde.....	116
5.3.8. Análisis de interacciones sobre la resistencia en verde.....	117
5.3.8.1. Análisis gráfico de las interacciones para la resistencia en verde.....	118
5.3.9. Modelo de regresión para la variable Resistencia en verde.....	119
5.4. Análisis de la varianza para la variable de respuesta: Porcentaje de Humedad.....	120
5.4.1. Análisis gráfico de los efectos principales para el Porcentaje de Humedad.....	121
5.4.2. Análisis gráfico de Pareto para los efectos principales para el Porcentaje de Humedad.....	122
5.4.3. Análisis gráfico de normalidad para los efectos principales para el Porcentaje de Humedad.....	123
5.4.4. Análisis de la varianza para el Porcentaje de Humedad con los factores significativos.....	124
5.4.5. Análisis de residuales para el modelo estandarizado para el Porcentaje de Humedad .....	126
5.4.6. Análisis gráfico de Pareto de los efectos estandarizados para el Porcentaje de Humedad.....	126
5.4.7. Análisis gráfico de normalidad para los efectos estandarizados para Porcentaje de Humedad.....	127
5.4.8. Análisis de interacciones sobre el Porcentaje de Humedad.....	128
5.4.8.1. Análisis gráfico de las interacciones para el Porcentaje de Humedad.....	129
5.4.9. Modelo de regresión para la variable Porcentaje de Humedad.....	130
5.5. Resumen de los modelos ajustados para predecir las variables de respuesta o propiedades de la arena verde.....	131

5.6. Optimización de las variables para la composición alternativa de la arena verde.....	132
5.6.1. Parámetros deseados para las propiedades de la arena verde.....	132
5.6.2. Optimización de las variables de respuesta para la obtención de la composición alternativa para la arena verde de JCR Fundiciones.....	133
5.6.3. Composición alternativa sugerida para la arena verde de JCR Fundiciones.....	135
<b>6. CAPITULO VI: PROPUESTAS PARA EL CONTROL Y SEGUIMIENTO DE LA ARENA VERDE</b>	
6.1. Propuestas adicionales a la composición alternativa de la arena verde.....	140
6.2. Propuesta para el seguimiento y control de los procesos de mezclado de arena verde.....	141
6.2.1. Carta de control de Shewhart para mediciones individuales de la permeabilidad de la arena verde de JCR Fundiciones.....	143
6.2.2. Carta de control de Shewhart para mediciones individuales de la resistencia en verde de la arena de JCR Fundiciones.....	144
6.2.3. Carta de control de Shewhart para mediciones individuales del porcentaje de humedad de la arena verde de JCR Fundiciones.....	146
<b>7. CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES, BIBLIOGRAFÍA</b>	
7.1. Conclusiones.....	148
7.2. Recomendaciones.....	151
7.3. Bibliografía.....	153
<b>8. CAPÍTULO VII: ANEXOS.....</b>	<b>156</b>

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla</b>	<b>Página</b>
Tabla N.1 Matriz del diseño 2 <sup>3</sup> .....	17
Tabla N.2 Resumen de procesos de colado.....	37
Tabla N.3 Valores típicos deseables en las propiedades de la arena verde de moldeo.....	50
Tabla N.4 Calificaciones de las causas que afectan a la composición de la arena verde de JCR Fundiciones.....	67
Tabla N.5 Resumen de la situación actual promedio de las propiedades de la arena verde en el periodo de Junio a Noviembre 2011.....	70
Tabla N.6 Valores actuales de carga de molino para la preparación de lotes de arena verde. Datos tomados de producción de JCR Fundiciones.....	72
Tabla N.7 Aproximaciones de niveles sugeridos para composiciones.....	72
Tabla N.8 Niveles propuestos para el modelo de diseño de experimentos.....	73
Tabla N.9.- Hoja de trabajo propuesta por Minitab 16 ® para la realización de los ocho tratamientos de composiciones de arena verde.....	79
Tabla N.10 Resultados de Permeabilidad obtenidos en cada uno de los ocho tratamientos realizados.....	91
Tabla N.11 Resultados de Resistencia a la compresión en verde, obtenidos en cada uno de los ocho tratamientos realizados.....	91
Tabla N.12 Resultados de Porcentaje de humedad obtenidos en cada uno de los ocho tratamientos realizados.....	92

Tabla N.13.- Resultados promedio de los ocho tratamientos de arena verde realizados.....	92
Tabla N.14.- Análisis de la varianza para la permeabilidad de la arena verde.....	93
Tabla N.15.- Análisis de la varianza estandarizado para la permeabilidad de la arena.....	98
Tabla N.16.- Análisis de la varianza estandarizado ajustado para la permeabilidad de la arena verde.....	102
Tabla N.17.- Análisis de la varianza para la resistencia de la arena verde.....	108
Tabla N.18.- Análisis de la varianza estandarizado para la resistencia de la arena.....	112
Tabla N.19.- Análisis de la varianza para el porcentaje de humedad de la arena verde.....	120
Tabla N.20.- Análisis de la varianza estandarizado para el porcentaje de humedad de la arena verde.....	124
Tabla N.21.- Resumen de los modelos ajustados para predecir las variables de la arena de fundición de JCR Fundiciones.....	132
Tabla N.22.- Parámetros deseados a cumplir por la composición de la arena verde de JCR Fundiciones.....	133
Tabla N.23.- Composición alternativa para la arena verde de moldeo de JCR Fundiciones.....	135
Tabla N.24.- Porcentajes de la composición alternativa de la arena verde de moldeo de JCR Fundiciones.....	136
Tabla N.25.- Costos de producción de lotes de arena con las composiciones revisadas.....	137



Tabla N.26.- Resultados de pruebas de producción de lotes de arena con la composición alternativa de 450kg de arena verde. Tomados en Febrero, 2012.....	138
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-----

# **1. CAPÍTULO I: GENERALIDADES**

## **1.1 INTRODUCCIÓN**

El presente trabajo busca encontrar una composición alternativa para la preparación de la arena verde de JCR Fundiciones, que apunte a mejorar las propiedades la arena, cumpla con los requerimientos de trabajo, y que además sugiera la reducción de defectos provocados por arena en las piezas finales.

Para alcanzarlo, primero se realizará un análisis de la situación actual del proceso de preparación de arena verde, y del estado promedio de las propiedades de la misma. Luego, se usará la metodología estadística de diseño de experimentos para identificar que factores o componentes críticos que intervienen en la preparación de la arena verde sugieren tener impacto sobre las propiedades de la misma. Para ello, se otorgará a cada factor de interés, niveles apropiados o cantidades de dosificación que luego serán ensayados en el molino de preparación de arena verde. De los distintos ensayos realizados se obtendrán muestras representativas para ser analizadas con la ayuda de equipos de laboratorio para el control de arena que miden sus propiedades.

Con los resultados obtenidos y bajo los lineamientos de la metodología de diseño de experimentos, se construirán modelos de regresión que servirán para predecir a cada una de las propiedades de la arena verde, y con estos modelos se realizará una optimización simultánea para cada una de ellas, que resulte en una composición de arena verde con características deseables para los trabajos de moldeo y fundición, y que por su naturaleza reduzcan los problemas de defectos por arena en las piezas finales.

De manera final, una vez que se alcance una composición alternativa para JCR Fundiciones, se incluirán propuestas para el seguimiento y control de dicha composición. Para ello se

realizará una propuesta de tablas de control para mediciones individuales que tendrán como objetivo, vigilar el estado del proceso en el tiempo, y que, si por alguna razón existen variaciones en el proceso se puedan tomar acciones correctivas para mantener bajo control al proceso propuesto.

Así, el presente proyecto estará enfocado a contribuir con la productividad de JCR Fundiciones, en su afán de ser competitivo, y para que sus procesos en la preparación de arena verde tiendan a ser más eficientes.

## **1.2 OBJETIVO GENERAL**

Proponer una formulación alternativa para la mezcla de la arena verde de moldeo de JCR Fundiciones, que sugiera mejorar las principales propiedades de la arena y que a su vez sugiera disminuir los problemas en la calidad del producto final.

## **1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analizar y contrastar con la literatura de fundición en arena verde, la situación actual de la arena de JCR Fundiciones, en cuanto a su preparación y a las propiedades obtenidas de la misma.
- Identificar las principales propiedades de la arena verde de moldeo que son de interés de JCR Fundiciones y que se esperan optimizar con una mezcla alternativa de la arena.
- Estructurar y preparar diferentes formulaciones de arena verde de moldeo para medir el impacto de los componentes dosificados sobre las propiedades de la arena.

- Establecer parámetros de trabajo aceptables para las propiedades de la arena verde de moldeo que se desean alcanzar con la fórmula de mezcla alternativa.
- Proponer una formulación alternativa para la arena verde de moldeo que demuestre propiedades sobresalientes < y que sugiera aportar la menor cantidad posible de defectos en el producto final.
- Proponer un plan de control y seguimiento para el proceso de preparación de la arena verde de moldeo, y que también ayude a mejorar los procesos de medición en los laboratorios de la empresa.

#### **1.4 METAS DEL PROYECTO**

- Documentar el estado actual de la arena verde de moldeo de JCR Fundiciones en cuanto a su preparación y a sus propiedades obtenidas, contrastándolo con la literatura de fundiciones.
- Preparar diferentes formulaciones de arena verde de moldeo de JCR Fundiciones, a través de un modelo matemático que permita medir el impacto de los componentes dosificados sobre las propiedades de la arena.
- Optimizar la fórmula de mezcla alternativa de la arena verde de moldeo de JCR Fundiciones bajo los parámetros de trabajo deseados.
- Proponer una fórmula de mezcla alternativa para la arena verde de moldeo que demuestre propiedades bajo parámetros de trabajo aceptables y sugieran menor cantidad de defectos en el producto final.

- Proponer un plan de control para los procesos de preparación de la arena verde de moldeo que permita monitorear la calidad de arena con la que se trabaja en el sistema y ayude a mejorar los procesos de medición en el laboratorio de JCR Fundiciones.

## **1.5 DESCRIPCIÓN DE ACTIVIDADES PARA LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO**

- Comprender las principales características de los procesos de fundición con arena verde, detallados en la literatura y los desarrollados en JCR Fundiciones. Buscar y analizar literatura relacionada con la preparación de arena verde de moldeo; utilizar la información de los procesos actuales de JCR Fundiciones y realizar una documentación del estado actual de la arena. Esto servirá para una posterior generación de lluvia de ideas con el personal involucrado y de mayor experiencia, para la generación de propuestas a llevarse a cabo para la realización de composiciones de arena verde.
- Estructurar un modelo matemático basado en la metodología estadística de diseño de experimentos. La metodología facilitará la estructuración y elaboración de diferentes composiciones de arena verde de moldeo y permitirá medir el impacto de los componentes de la mezcla sobre las propiedades de la misma.

Para realizar la experimentación, se necesitará de manera inicial, identificar los componentes o factores indispensables en la mezcla de la arena, así como también, determinar los niveles permitidos de cantidades para cada componente en la preparación.

Finalmente, a cada composición de arena verde preparada, se medirán y analizarán el impacto de los componentes de la mezcla sobre las principales propiedades de la arena. Con ello, se sabrá que componentes son significativos o influyentes sobre las

propiedades de la arena verde de moldeo. Estos resultados servirán para realizar acercamientos a formulaciones con cantidades de componentes que demuestren mejorar las propiedades de la arena verde de JCR Fundiciones.

- Con los resultados obtenidos del modelo matemático de diseño de experimentos, se realizará una optimización de las propiedades de la arena verde de moldeo mediante la metodología de superficie de respuesta. La metodología permitirá alcanzar valores óptimos para cada propiedad de la arena verde de moldeo, una vez que se conocen los componentes que influyen sobre cada una de ellas.

Para realizarlo, primero se necesitará establecer parámetros de trabajo deseables o aceptables para cada una de las propiedades. Se les otorgará una ponderación y un orden de importancia a cada propiedad.

Finalmente, se espera que la optimización ayude a obtener una composición de arena verde de moldeo con las dosificaciones de componentes ideales, que asegurarán alcanzar los valores óptimos para las propiedades de la arena verde de moldeo.

- Para controlar el proceso de preparación de arena de moldeo se propone realizar revisiones periódicas del estado de la arena del sistema, también se elaborará una estructura de tablas de control para llevar un control del proceso de preparación de la arena verde de moldeo y de las propiedades de la arena resultante.

Adicionalmente se realizarán recomendaciones para el uso de los equipos de laboratorio de la empresa y la toma de muestras con la finalidad de reducir errores de experimentación.

## **1.6 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA**

JCR Fundiciones nace en 1986, como un taller artesanal de fundiciones. En la actualidad es una empresa privada, especializada en el mercado y los procesos de fundición de metales ferrosos y no ferrosos.

La empresa ofrece productos de hierro nodular, hierro gris, aluminio, cobre, y bronce. El hierro nodular es su principal actividad productiva para la elaboración de productos, como: tapas de alcantarillas, rejillas de agua lluvias, tapas de medidores de agua potable, entre otros.

Sus principales clientes son los municipios, constructoras, y empresas privadas que se dedican a la dotación de alcantarillado y agua potable.

## **1.7 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

JCR Fundiciones, en la actualidad, según menciona el Gerente de producción, Ing. Gustavo López, ésta afronta varios inconvenientes a lo largo de sus procesos de producción. Una de las preocupaciones prioritarias se halla en los procesos de preparación de la arena verde de moldeo para la fabricación de piezas de hierro nodular. Esta arena preparada es utilizada para la creación de moldes que reciben el metal líquido o fundido y dan forma a un producto final. Por ello, el Gerente de producción menciona que el garantizar propiedades sobresalientes de la arena verde de moldeo es crucial para: el trabajo adecuado de moldeo en producción y para alcanzar un producto con la menor cantidad de defectos posibles producidos por arena.

A pesar de que la preparación actual de la arena verde de moldeo de JCR Fundiciones presenta propiedades aceptables, aun se registran piezas con defectos producidos por arena. Sin embargo, según el Gerente de producción se pueden reducir defectos producidos por arena, mejorando las propiedades de la arena verde de moldeo actual mediante composiciones sugeridas por la literatura y su experiencia en fundiciones con arena verde.

Para la preparación de la arena verde de moldeo intervienen elementos importantes como: arena de reciclaje o usada, arena nueva, bentonita, carbonilla, agua y el tiempo de mezcla. El Gerente de Ingeniería, Ing. Gustavo Vera, menciona que la reutilización de la arena de reciclaje, las condiciones del espacio del trabajo, la calidad de los elementos que se adhieren a una nueva preparación de arena verde de moldeo, entre otros, tiende a reducir con el tiempo las características o propiedades iniciales de la arena verde de moldeo, ya que se aumentan polvos finos o inservibles por la reutilización de la arena. Con ello se comienzan a tener defectos o imperfecciones en las piezas y además sugiere un mayor consumo de ingredientes nuevos.

Por tanto, JCR Fundiciones está interesada en encontrar una formulación alternativa para la preparación de su arena verde de moldeo. Una composición que garantice propiedades sobresalientes propondrá reducir problemas por defectos en las piezas finales, reducir de los costos de maquinado o reproceso de piezas defectuosas y con ello, se espera mejorar los procesos de preparación de arena verde de moldeo, los procesos de moldeo y los procesos de vaciado en ese orden.

## **1.8 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO**

El presente proyecto surge de la necesidad actual del departamento de Producción y de Ingeniería de JCR Fundiciones, en cuanto a determinar una mezcla alternativa para la arena verde de moldeo, y que sugiera propiedades sobresalientes para la misma.

De esta forma, el presente proyecto se justifica dada la necesidad actual, también porque coincide con las estrategias de mejoramiento continuo de JCR Fundiciones y porque el proyecto será un habilitante a futuro cuando se pretenda tecnificar aun más los procesos de preparación y tratamiento de la arena verde de moldeo.



## 2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### 2.1 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

El diseño de experimentos es una metodología estadística cuyo objetivo es averiguar si uno o varios factores influyen sobre una variable de interés, y si existe una influencia cuantificar la misma (Gutiérrez, 2008).

En el campo de la ingeniería el diseño de experimentos es vital para la toma de decisiones con la finalidad de desarrollar sistemas robustos que sean afectados de forma mínima por fuentes de variabilidad externa (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007).

Según Montgomery el diseño de experimentos deben cumplir con los siguientes requisitos:

- Debe comprobar una hipótesis de estudio, sin dejarse confundir por variables no controlables o errores.
- Debe revelar cualquier causa importante de variación
- Debe tener una alta confiabilidad en cuanto a las respuestas obtenidas
- Debe mantener los costos de experimentación a un nivel razonable.

#### 2.1.1 DEFINICIONES BÁSICAS EN EL DISEÑO DE EXPERIMENTOS

**Experimento.-** Es una prueba o serie de pruebas en las que se hacen cambios deliberados en las variables de entrada de un proceso o sistema para observar las razones de los cambios que pudieran observarse en la respuesta de salida (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007).

**VARIABLES DE RESPUESTA O DEPENDIENTE.-** Son las características o variables que miden el desempeño de un proceso. Los estudios experimentales se enfocan en hallar la forma de mejorar las variables de respuesta (Gutiérrez, 2008).

A través de las variables de respuesta se conoce el efecto de cada prueba experimental, por tanto, el experimentador debe tener la certeza de que esta variable proporciona la información útil acerca del proceso en estudio (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007).

**Factores.-** Son los elementos que pueden influir en el desempeño del proceso o la/s variable/s de respuesta. La participación de los factores en un experimento pueden clasificarse como: factores controlables, no controlables o de ruido. Los factores son variables independientes (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007).

**Factores controlables.-** Son variables de un proceso o sistema. Se los puede fijar en un nivel o rango y se los puede cambiar o manipular si se requiere. Esto facilita la posibilidad de experimentar con ellos (Gutiérrez, 2008).

**Factores no controlables o de ruido.-** Son variables que no se pueden medir o controlar durante el experimento o la operación normal del proceso. En el caso de que, el factor no controlable pueda medirse se puede usar análisis de covarianza para compensar este efecto (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007).

**Niveles.-** Son los diferentes valores que se asignan o pueden tomar los factores estudiados en un diseño experimental. La combinación de niveles de todos los factores estudiados se lo denomina tratamiento (Gutiérrez, 2008).

**Tratamiento.-** Son el conjunto de circunstancias creadas para el experimento. Es decir, una combinación de niveles tomado uno de cada factor (Díaz, 2009).

**Error aleatorio.-** Es la variabilidad observada que no se puede explicar por los factores estudiados, resulta del pequeño efecto de los factores no estudiados y del error experimental (Gutiérrez, 2008).

**Error experimental.-** Es un error que se origina por la variación que no está bajo control y que generalmente es inevitable (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007).

**Aleatorización.-** Es la técnica utilizada para disminuir el ruido o error experimental y reducir su influencia sobre los resultados del experimento. Consiste en asignar al azar el orden de los tratamientos (Díaz, 2009). Con ello se trata de prevenir sesgos, evitar la dependencia entre las observaciones, y ayuda a confirmar la adecuación de los procedimientos estadísticos para el análisis de resultados de los experimentos (Díaz, 2009).

**Análisis de la varianza.-** Es un resumen acerca de la variabilidad de las observaciones de un experimento en componentes independientes que sugieren asignarse por ciertas causas de variación (Hernández, 2001).

### **2.1.2 ETAPAS PARA DISEÑAR EXPERIMENTOS**

**Identificación y enunciación del problema.-** En esta etapa es primordial plantear el problema que requiere experimentación. Es importante tener ideas claras acerca de los

objetivos del proyecto y participación de las áreas y personas que tienen conocimiento del proceso o sistema (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007).

**Elección de los factores y niveles.-** En esta etapa el experimentador conoce los factores potenciales que influyen en el desempeño del sistema o proceso. En un experimento se espera que los factores no sean únicos para poder variarlos y así otorgarles niveles que conduzcan a una influencia sobre la variable de respuesta (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007).

**Selección de la variable de respuesta y verificación que se mide de manera confiable.-** El experimentador debe tener la certeza de que la/s variable/s proporciona información útil acerca del proceso en cuestión. En la mayoría de casos, el promedio o la desviación estándar evaluarán mejor a la/ variable/s de respuesta medida (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007).

Por otra parte, es importante tener confianza en que las mediciones que se obtengan sobre la/s variable/s de respuesta sean confiables. Es decir, se debe garantizar que los instrumentos o métodos de medición sean capaces de repetir una medición y garanticen precisión y la exactitud necesaria (Gutiérrez, 2008).

**Elección del diseño experimental.-** La elección del diseño implica la consideración del tamaño de la muestra, la selección de un orden de corridas adecuado para los ensayos experimentales y la determinación si entran en juego o no la formación de bloques u otras restricciones sobre la aleatorización (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007).

En la actualidad existen varios software estadísticos que soportan la parte de diseño experimental. Ingresando la información del número de factores, niveles se puede tener

a consideración una selección de diseños o recomendaciones en particular por parte del software (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007).

**Realización del experimento.-** En esta etapa se planea, se organiza y se ejecuta todo el trabajo experimental con base en el diseño seleccionado. Es recomendable identificar el grupo de trabajo, la forma y las actividades que se cumplirán en la realización del experimento (Gutiérrez, 2008).

Por otra parte, Montgomery sugiere que antes de llevar a cabo un experimento se realicen pruebas piloto a fin de tener en cuenta la consistencia del material de experimentación, una comprobación del sistema de medición y una idea aproximada del error experimental.

**Análisis estadístico de los datos.-** Para esta etapa se deben recurrir a métodos estadísticos inferenciables para ver si los efectos experimentales son lo suficientemente grandes para que garanticen diferencias poblacionales. La técnica estadística en el análisis de experimentos es el llamado análisis de varianza o ANOVA por sus siglas en inglés (Gutiérrez, 2008).

Si el experimento se ha diseñado correctamente y se ha llevado a cabo de acuerdo con el diseño, los métodos estadísticos necesarios no deben ser complicados y el análisis de resultados lo mismo. De esta manera se puede asegurar confiabilidad en los resultados y en la adecuada toma de decisiones (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007).

**Conclusiones y Recomendaciones.-** Después de analizados los datos, el experimentador puede sacar conclusiones prácticas acerca de los resultados. Los

métodos gráficos suelen ser útiles en esta etapa, en particular para presentar los resultados del experimento (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007).

En esta etapa es recomendable decidir qué medidas implementar para generalizar el resultado del estudio y para garantizar que las mejoras se mantengan (Gutiérrez, 2008).

## **2.2 DISEÑOS FACTORIALES**

Un diseño factorial es el que consta de dos o más factores, cada uno con distintos valores o niveles (Kuehl, 2001).

Son ampliamente usados en diseño de experimentos que incluyen varios factores, y cuando es necesario estudiar el efecto conjunto de los mismos sobre una o varias variables de respuesta (Gutiérrez, 2008).

Por diseño factorial se entiende que en cada ensayo o réplica completa del experimento, se investigan a todas las combinaciones posibles de los niveles de cada factor (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007).

Los diseños factoriales producen experimentos más eficientes, pues cada observación proporciona información sobre todos los factores y son muy útiles en la optimización de procesos (Kuehl, 2001).

### **2.2.1 PRINCIPIOS BÁSICOS DE DISEÑOS FACTORIALES**

**Efecto.-** Es un cambio en la variable de respuesta medida, ocasionado por un cambio en el nivel de un factor. Los dos efectos de interés en un experimento factorial son los: efectos principales y los de interacción (Kuehl, 2001).

**Efecto principal.-** Es la contribución de cada factor sobre la/s variable/s de respuesta después de medir el cambio producido en éstas (Kuehl, 2001).

**Efecto de interacción.-** Es la contribución de los factores que interactúan sobre la/s variable/s de respuesta después de medir el cambio producido en éstas (Kuehl, 2001).

### 2.3 DISEÑO FACTORIAL $2^k$

El más importante de los diseños factoriales es el de k factores, cada uno con sólo dos niveles. Estos niveles pueden ser cuantitativos como cualitativos. Una réplica de diseño factorial requiere  $2 \times 2 \times 2 \dots \times 2 = 2^k$  corridas de tratamientos (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007).

El modelo estadístico para un diseño  $2^k$  incluye:

$$\binom{k}{1} = k, \text{efectos principales} \quad (1)$$

$$\binom{k}{2} = \frac{k!}{2!(k-2)!} = \frac{k(k-1)}{2}, \text{interacciones dobles} \quad (2)$$

$$\binom{k}{3} = \frac{k!}{3!(k-3)!}, \text{interacciones triples} \quad (3)$$

$$\binom{k}{k} = 1 \text{ interacción de los } k \text{ factores} \quad (4)$$

Así por ejemplo, el diseño factorial  $2^5$  que comprende de 5 factores con 2 niveles, su modelo factorial completo tendría: 5 efectos principales, 10 interacciones dobles, 10 interacciones triples, 5 interacciones cuádruples, y una interacción quíntuple, lo cual da un total  $2^5 - 1 = 31$  efectos (Gutiérrez, 2008).

## Modelo de regresión

En un diseño factorial  $2^k$  es más práctico expresar los resultados del experimento en términos de un modelo de regresión o modelo de los efectos (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007).

A continuación, se presenta un ejemplo ilustrado en Montgomery, 2007, de un modelo de regresión en el que se contemplan dos factores A y B:

$$y_{ijk} = \mu + \tau_i + \beta_j + (\tau\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (5)$$

Donde:  $y_{ijk}$  es la variable de respuesta o variable dependiente del proceso,  $\mu$  es el efecto promedio global,  $\tau_i$  es el efecto del nivel  $i$ -ésimo del factor A,  $\beta_j$  es el efecto del nivel  $j$ -ésimo del factor B,  $(\tau\beta)_{ij}$  es el efecto de la interacción entre  $\tau_i$  y  $\beta_j$ , y  $\varepsilon_{ijk}$  es el componente del error aleatorio.

Así, un modelo de regresión se compondrá de los factores que sean representativos o significativos sobre una variable de respuesta. Sus valores respectivos serán el resultado del análisis de la varianza realizado para el experimento (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007).



### **2.3.1 DISEÑOS FACTORIALES FRACCIONADOS $2^k$**

Los diseños factoriales fraccionados proponen la realización de experimentos que utilizan solo una fracción del arreglo factorial. Es decir que, solo se realiza una parte o fracción de un diseño factorial completo (Kuehl, 2001).

Estos diseños son de utilidad cuando el número de tratamientos necesarios excede los recursos experimentación: presupuesto, materiales, mano de obra, equipos de medición, etc. (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007).

También son usados cuando se requiere información sobre los efectos principales y las interacciones, cuando se necesitan estudios exploratorios para muchos factores y cuando se hace la suposición de que solo unos cuantos efectos son importantes (Kuehl, 2001).

### **2.3.2 FRACCIÓN UN MEDIO DEL DISEÑO FACTORIAL $2^k$**

El diseño factorial un medio  $2^k$  es un modelo en el que se analiza solo una media fracción del modelo completo. Es de gran utilidad para optimizar recursos de experimentación cuando se tienen varios factores en estudio (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007).

En Kuehl, 2001, el diseño  $2^k$  con una fracción de un medio se la denota como: diseño factorial fraccionado  $2^{k-1}$ , esto debido a que:

$$\frac{1}{2}2^k = 2^{k-1} \quad (6)$$

La ecuación 6 indica que el diseño incluye k factores, cada uno en dos niveles que usan sólo  $2^{k-1}$  unidades experimentales.

Por ejemplo, un experimento completo con tres factores y dos niveles necesita de  $2^3=8$  corridas de tratamientos. Sin embargo, por optimizar recursos de experimentación solo se realizan 4 corridas o media fracción del diseño completo. Entonces, el diseño tendría  $2^{3-1}=4$  combinaciones de tratamientos (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007).

Así la matriz de diseño completo para este ejemplo, se presenta en la Tabla N.1:

Combinaciones de tratamientos	Efecto Factorial							
	I	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
a	+	+	-	-	-	-	+	+
b	+	-	+	-	-	+	-	+
c	+	-	-	+	+	-	-	+
abc	+	+	+	+	+	+	+	+
ab	+	+	+	-	+	-	-	-
ac	+	+	-	+	-	+	-	-
bc	+	-	+	+	-	-	+	-
1	+	-	-	-	+	+	+	-

**Tabla N.1 Matriz del diseño  $2^3$ , Adaptado de (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007).**

Es este caso, si el experimentador decide seleccionar solo a las cuatro combinaciones de tratamientos a, b, c y abc, como la fracción un medio con la que se trabajará, se estaría seleccionando sólo las combinaciones de tratamientos que tienen signo positivo en la columna ABC. Esto según Montgomery, determina que ABC sea el generador de esta fracción. De igual manera, la columna I ó identidad también es positiva, por lo que:

$$I=ABC \quad (7)$$

A éste, se lo de denomina relación de definición del diseño. "En general la relación de definición de un diseño factorial fraccionado será siempre el conjunto de todas las columnas que son iguales a la columna identidad" (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007).

### Estimación de los efectos principales:

Del ejemplo, se observan las siguientes combinaciones lineales para estimar los efectos principales de A, B, y C:

$$l_A = \frac{1}{2}(a - b - c + abc)$$

$$l_B = \frac{1}{2}(-a + b - c + abc)$$

$$l_C = \frac{1}{2}(-a - b + c + abc)$$

Para las combinaciones lineales para las interacciones de dos niveles serán:

$$l_{BC} = \frac{1}{2}(a - b - c + abc)$$

$$l_{AC} = \frac{1}{2}(-a + b - c + abc)$$

$$l_{AB} = \frac{1}{2}(-a - b + c + abc)$$

Por lo tanto:

$$l_A = l_{BC}, l_B = l_{AC}, l_C = l_{AB}$$

Esto demuestra que, es imposible diferenciar entre A y BC, entre B y AC, y entre C y AB.

Entonces, cuando se estiman A, B, y C se está estimando en realidad A +AB, B+AC, y C+AB. Por tanto, a estos efectos se los denomina alias o efectos confundidos porque no se pueden estimar por separado, y no se puede saber cuál es el responsable del efecto (Box, Hunter, & Hunter, 2008).

En el ejemplo, en el caso de que se decidiera elegir la otra fracción un medio, es decir, las combinaciones de tratamientos de la Tabla N.1 asociadas con los signos negativos de la columna ABC. Se lo denominará fracción alterna o complementaria, lo que tendría a las corridas 1, ab, ac, y bc, con su relación de definición

$$I = -ABC$$

De las combinaciones lineales de las observaciones, por ejemplo,  $l_A$ ,  $l_B$ ,  $l_C$ , de la fracción alterna se obtiene:

$$l_A \rightarrow A - BC$$

$$l_B \rightarrow B - AC$$

$$l_C \rightarrow C - AB$$

Por tanto, cuando se estiman A, B y C con esta fracción, en realidad se están estimando A-BC, B-AC y C-AB (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007).

En realidad, en la práctica no importa cuál de las fracciones se usa de los diseños experimentales. En este caso ambas fracciones pertenecen a la misma familia y proporcionan información válida de los factores sobre la variable de respuesta de interés (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007).

### **2.3.3 FRACCIÓN UN CUARTO DEL DISEÑO FACTORIAL $2^k$**

Este modelo es útil cuando se tiene un número moderadamente grande de factores y se requiere optimizar recursos de experimentación. Este diseño contiene  $2^{k-2}$  corridas o tratamientos (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007). Así, por ejemplo un cuarto de réplica de un diseño  $2^6$ , es un fraccionado  $2^{6-2}$  que requiere realizar solo 16 de los 64 tratamientos del diseño completo  $2^6$  (Kuehl, 2001).

Una fracción un cuarto del diseño  $2^k$  tiene dos generadores, los cuales construyen los cuatro bloques del diseño completo (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007).

### **2.3.4 DISEÑO FACTORIAL FRACCIÓNADO $2^{k-p}$**

Cuando se desea trabajar con fracciones más amplias de un modelo factorial completo por razones de optimización de recursos y primeros acercamientos a un diseño factorial completo, se usan los diseños  $2^{k-p}$  (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007).

Para definir la estructura de diseños  $2^{k-p}$  se deben seguir los siguientes pasos:

- Decidir que fracción del diseño completo va a utilizarse, sea fracción un medio, un cuarto, un octavo, etc. Es decir, tiene que escogerse el valor de  $p$  (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007).
- Seleccionan  $p$  generadores independientes para los diseños factoriales fraccionados  $2^{k-p}$  los cuales estarán confundidos con la columna identidad (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007).
- De preferencia se deberán confundir a las interacciones de orden alto, ya que se sabe que sus valores de significancia tienden a ser bajos o insignificativos (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007).

### **2.3.5 RESOLUCIÓN DEL DISEÑO FACTORIAL FRACCIONADO RELACIONADA CON SU ALEATORIZACIÓN**

Los diseños factoriales fraccionados se agrupan en clases de acuerdo con sus relaciones de aleatorización. Estos grupos se identifican por su resolución. Los más comunes son aquellos con resolución III, IV y V (Kuehl, 2001).

***Resolución III:***

Es el diseño en el que ningún efecto principal se confunde con otro efecto principal, pero se confunden o son alias con interacciones de dos factores, algunas interacciones de dos factores pueden ser alias entre si (Kuehl, 2001).

***Resolución IV:***

Diseño en el que ningún efecto principal se confunde con otro efecto principal o con una interacción de dos factores, pero las interacciones de dos factores son alias entre si (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007).

***Resolución V:***

Diseño en el que ningún efecto principal ni interacción de dos factores son alias de otro efecto principal o interacción de dos factores, pero las interacciones de dos factores son alias de las interacciones de tres factores (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007).

## **2.4 VERIFICACIÓN DE LA ADECUACIÓN DE UN MODELO DE DISEÑO DE EXPERIMENTOS**

Para determinar que un modelo experimental ha sido bien estructurado se debe realizar un análisis de varianza que medirá la variabilidad presente en las observaciones. Con ello, se

puede medir la calidad de los supuestos planteados por el experimentador (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007).

A continuación se presentan los distintos análisis que se realizan para verificación de la consistencia del modelo y de los supuestos planteados por el experimentador.

### 2.4.1 EL SUPUESTO DE NORMALIDAD

La verificación del supuesto de normalidad es realizada graficando una línea de tendencia para los residuales. Se espera que los errores sigan una distribución normal e independiente con media cero y varianza  $\sigma^2$  constante pero desconocida (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007).

A continuación se presenta una gráfica de probabilidad normal:

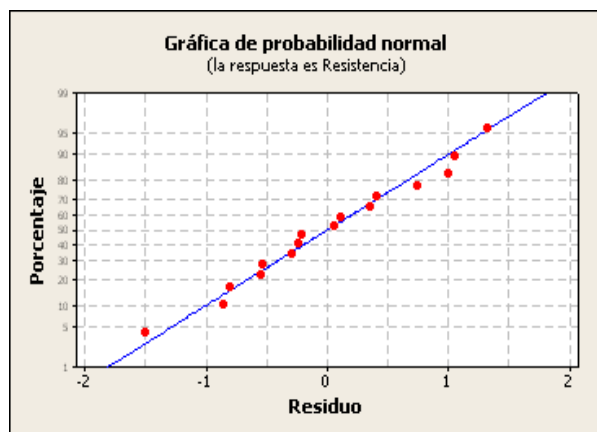


Figura N.-1 Gráfica de probabilidad Normal para los residuales. (Ejemplo tomado de la guía de ayuda de Minitab 16 ®).

Si la distribución de los errores es normal, la gráfica tiene apariencia de línea recta como la mostrada en la Figura N.1, y sugiere una adecuación apropiada del modelo si

los residuales se ajustan o tienden a ajustarse a la línea de tendencia (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007).

Una anomalía que se puede manifestar, es la presencia de puntos atípicos, que sugieren que un residual es mucho más grande que cualquier otro. Esto ocurre generalmente por error de cálculos, codificación, o circunstancias de una corrida particular, pero se debe tener cuidado de no rechazar una observación atípica a menos que se tengan razones estadísticas de peso para hacerlo (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007).

#### 2.4.2 GRÁFICA DE LOS RESIDUALES EN SECUENCIA EN EL TIEMPO

La gráfica de residuales en el orden temporal de la recolección de los datos es útil para detectar correlaciones entre los residuales. Es una forma de observar independencia de los datos colectados en el tiempo (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007).

A continuación se presenta en la Figura N.2, una gráfica de residuales contra el orden de los datos en el tiempo:

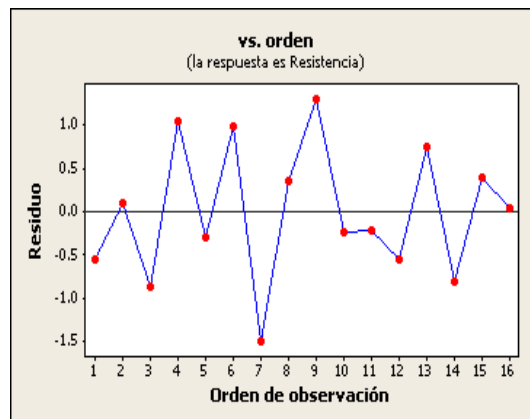


Figura N.-2 Gráfica de residuales contra el tiempo. (Ejemplo tomado de la guía de ayuda de Minitab 16®).



La gráfica es útil cuando el orden de las observaciones influye en los resultados. Los residuos deberán fluctuar en un patrón aleatorio alrededor de la línea central (Guía de ayuda de Minitab 16 ®).

Si se detectan tendencias marcadas ascendentes o descendentes de los residuales quiere decir que, se violan los supuestos de independencia y puede ser indicador de problemas con la adecuación del modelo experimental (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007).

### 2.4.3 GRÁFICA DE LOS RESIDUALES CONTRA LOS VALORES AJUSTADOS

Esta gráfica sirve para verificar que los residuales no están relacionados con ninguna otra variable, incluyendo la respuesta predicha (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007).

A continuación se presenta en la Figura N.3 una gráfica de residuales contra los valores ajustados:

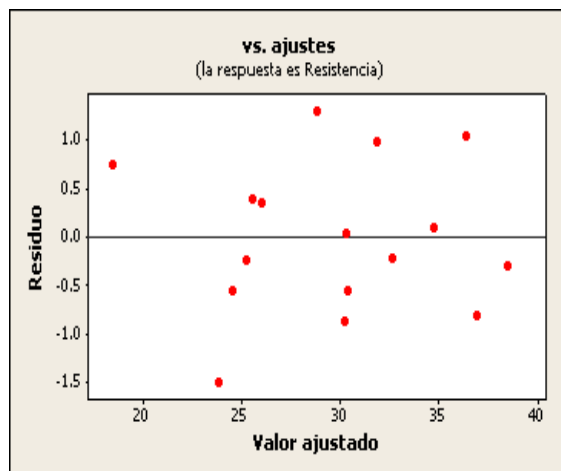


Figura N.-3 Gráfica de residuales vs Valores ajustados. (Ejemplo tomado de la guía de ayuda de Minitab 16).

En la gráfica de residuales contra valores ajustados se debe observar que, no existan patrones de tendencia (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007).

Para hablar de una buena adecuación del modelo los residuos deben estar dispersos aleatoriamente alrededor de cero similar a la Figura N.3 (Guía de ayuda de Minitab 16 ®).

#### **2.4.4 TRANSFORMACIONES PARA MEJORAR LA ADECUACIÓN DEL MODELO**

Cuando se tengan problemas con alguno los supuestos antes mencionados. Una solución usual es realizar una transformación para estabilizar la varianza para correr después el análisis de la varianza en los datos transformados, (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007).

Si se conoce la distribución teórica de las observaciones se puede usar dicha distribución para transformarla. A continuación se presentan transformaciones típicas para sobrellevar este inconveniente:

- Transformación de la raíz cuadrada  $y_{ij}^* = \sqrt{y_{ij}}$  si la distribución es de Poisson
- Transformación logarítmica  $y_{ij}^* = \log y_{ij}$  si la distribución es Lognormal
- Transformación arcsen  $y_{ij}^* = \arcsen \sqrt{y_{ij}}$  si la distribución es de binomial

Cuando no haya una transformación adecuada, se puede hacer una búsqueda empírica. En Montgomery, 2007 se muestran transformaciones de este tipo

- Raíz cuadrada
- Log
- Raíz cuadrada recíproca
- Recíproco de la respuesta

En la práctica se selecciona la transformación probando varias alternativas, y se observa el efecto de cada transformación que produce la gráfica de residuales más satisfactoria (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007).

## **2.5 METODOLOGÍA DE SUPERFICIES DE RESPUESTA PARA OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS (MSR)**

La metodología de superficies de respuesta, o MSR, es una colección de técnicas matemáticas y estadísticas útiles en el análisis de problemas en los que la respuesta de interés recibe influencia de diversas variables y donde el objetivo es optimizar a la misma (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007).

### **2.5.1 MSR PARA VARIABLES DE RESPUESTA MÚLTIPES**

Cuando se consideran varias respuestas múltiples en un proceso y se requieren optimizar, existen varios procedimientos matemáticos para alcanzarlo. Según Montgomery, 2007, es necesario primero construir un modelo de superficie de respuesta apropiado para cada respuesta, esto se lo consigue una vez concluido el diseño experimental para dicha respuesta. Con el modelo obtenido del anterior estudio, se intenta luego encontrar un conjunto de condiciones para optimizar todas las respuestas, o que al menos las mantenga en los rangos deseados.

### **2.5.2 MÉTODO DE OPTIMIZACIÓN DE FUNCIONES CON CONDICIÓN DESEABLE**

Es un enfoque de optimización simultánea para respuestas múltiples presentado en Montgomery, 2007. Su procedimiento es el siguiente:

- Convertir cada variable de respuesta en una función con condición deseable  $d_i$  que varía en el rango  $0 \leq d_i \leq 1$ . Donde si la respuesta esta fuera de una región aceptable es  $d_i = 0$  y si la respuesta esta cerca a la meta u objetivo deseado  $d_i = 1$
- Después, las variables del diseño elegidas se usan para maximizar la condición deseable global  $D = (d_1 \cdot d_2 \cdot \dots \cdot d_m)^{1/m}$  donde hay m respuestas o variables de respuestas.
- Se escogen las funciones de condición deseable que más se ajustan para los fines de optimización
- Se obtienen respuestas optimizadas con sus variables independientes

**Estructura de la funciones con condición deseable:**

Donde:

$y$  = variable de respuesta,

$T$  = valor objetivo que se desea obtener de la variable de respuesta

$L$  = limite inferior permitido para la variable de respuesta

$U$  = limite superior permitido para la variable de respuesta

$r$  = Ponderación sugerida para cada variable de respuesta. Cuando  $r = 1$  la función de condición deseable es lineal. Cuando  $r > 1$  se pone mas interés en estar más cerca del valor objetivo y  $0 \leq r \leq 1$ .

(Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007)

Cuando el objetivo sea maximizar la variable de respuesta:

$$d = \begin{cases} 1 & y < L \\ \left(\frac{y-L}{T-L}\right)^r & L \leq y \leq T \\ 1 & y > T \end{cases} \quad (8)$$

Cuando el objetivo sea minimizar la variable de respuesta:

$$d = \begin{cases} 1 & y < T \\ \left(\frac{U-y}{U-T}\right)^r & T \leq y \leq U \\ 0 & y > U \end{cases} \quad (9)$$

Cuando el objetivo sea que la variable de respuesta este tan cerca como sea posible en las especificaciones:

$$d = \begin{cases} 0 & y < L \\ \left(\frac{y-L}{T-L}\right)^{r1} & L \leq y \leq T \\ \left(\frac{U-y}{U-T}\right)^{r2} & T \leq y \leq U \\ 0 & y > U \end{cases} \quad (10)$$

(Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007)

## 2.6 CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESOS

El control estadístico de procesos es un conjunto de herramientas destinadas para resolver problemas de variabilidad en los procesos. Su finalidad consiste en dar seguimiento y estabilidad a los procesos a través de la reducción de la variabilidad (Montgomery, Control Estadístico de la Calidad, 2004).

El control estadístico de los procesos puede aplicarse a cualquier proceso en el que existan intereses por reducir su variabilidad. Cuenta con siete herramientas destinadas a este fin, ellas son (Montgomery, Control Estadístico de la Calidad, 2004):

- Histogramas

- La hoja de verificación
- La gráfica de Pareto
- El diagrama de causa y efecto
- El diagrama de concentración de defectos
- El diagrama de dispersión
- La carta de control

### **2.6.1 CARTA DE CONTROL DE SHEWHART**

La carta de control de Shewhart es una representación gráfica que ayuda a medir y controlar una o varias características de la calidad de los procesos. Una característica medible de la calidad, puede ser por ejemplo el: peso, temperatura, permeabilidad, resistencia, etc. (Montgomery, Control Estadístico de la Calidad, 2004).

Se usan cartas de control cuando se necesita monitorear el valor promedio o la variabilidad de una característica de la calidad (Montgomery, Control Estadístico de la Calidad, 2004). Su finalidad será, la de monitorear la constancia del proceso y si éste se hallará en estado fuera de control tomar acciones correctivas o realizar los ajustes del caso para regresar al proceso a un estado bajo control (Anderson, 2008).

Existen varios tipos de cartas de control, entre las más importantes están: El control promedio del proceso mediante el uso de cartas de control para las medias, o carta  $\bar{x}$ ; el control para variabilidad del proceso mediante una carta de control para la desviación estándar, o carta  $S$ , o bien una carta de control para el rango, llamada carta  $R$  (Montgomery, Control Estadístico de la Calidad, 2004).

## 2.6.2 CARTAS DE CONTROL PARA EL PROMEDIO DEL PROCESO

### 2.6.2.1 CARTA $\bar{X}$

La carta  $\bar{x}$  mide el estado promedio de la característica de la calidad en estudio (Montgomery, Control Estadístico de la Calidad, 2004).

Para la construcción de una carta  $\bar{x}$  deben estimarse a partir de muestras o subgrupos preliminares tomados cuando se considera que el proceso se encuentra bajo control. Estas estimaciones deberán basarse en al menos 20 o 25 muestras (Montgomery, Control Estadístico de la Calidad, 2004).

### 2.6.2.2 FUNDAMENTOS ESTADÍSTICOS DE LAS CARTAS $\bar{X}$

En el supuesto que una característica de la calidad tiene una distribución normal con media  $\mu$  y desviación estándar  $\sigma$ , donde tanto  $\mu$  como  $\sigma$  son conocidas. Si  $x_1, x_2, x_3, x_n$  es una muestra de tamaño  $n$ , entonces el promedio de la muestra es:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} \quad (11)$$

Y se sabe que  $\bar{x}$  sigue una distribución normal con media  $\mu$  y desviación estándar  $\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ . Además, la probabilidad es de  $1 - \alpha$  para que cualquier media muestral se localice entre:

$$\mu + Z_{\frac{\alpha}{2}} \sigma_{\bar{x}} = \mu + Z_{\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad y \quad \mu - Z_{\frac{\alpha}{2}} \sigma_{\bar{x}} = \mu - Z_{\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (12)$$

Por tanto, si  $\mu$  y  $\sigma$  son conocidas, las ecuaciones anteriores podrían usarse como límites de control superior e inferior en una carta de control para las medias muestrales (Montgomery, Control Estadístico de la Calidad, 2004).

En la práctica, generalmente no se conocen los valores de  $\mu$  y  $\sigma$ . Por lo tanto deben estimarse a partir de muestras o subgrupos tomados cuando se considera que el proceso se encuentra estable o bajo control (Montgomery, Control Estadístico de la Calidad, 2004).

### **Límites de control para la carta $\bar{x}$**

Si se cuenta con  $m$  muestras, cada una de las cuales contiene  $n$  observaciones de la característica de la calidad.  $n$  con frecuencia puede ser entre 4, 5 o 6 (Montgomery, Control Estadístico de la Calidad, 2004).

Ahora, sean  $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \dots, \bar{x}_n$  los promedios de cada muestra. Entonces el mejor estimador de  $\mu$ , el promedio del proceso, es el gran promedio; por ejemplo:

$$\bar{\bar{x}} = \frac{\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \bar{x}_3 \dots + \bar{x}_n}{m} \quad (13)$$

Así,  $\bar{\bar{x}}$  se usaría como la línea central en la carta  $\bar{x}$ .

Para construir los límites, también es necesaria la estimación de  $\sigma$  que puede obtenerse también de las desviaciones estándar de las muestras o bien de los rangos de la  $m$  muestras (Montgomery, Control Estadístico de la Calidad, 2004).



Con el método del rango, si  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$  es una muestra de tamaño  $n$ , entonces el rango de la muestra es la diferencia entre las observaciones menor y mayor:

$$R = x_{max} - x_{min} \quad (14)$$

Si  $R_1, R_2, \dots, R_n$  son los rangos de las  $m$  muestras, el rango promedio será:

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_n}{m} \quad (15)$$

Con las anteriores fórmulas ya se pueden construir los límites de la carta de control  $\bar{x}$ , y se ven de la siguiente manera:

$$\text{Límite central superior} = \bar{\bar{x}} + A_2 \bar{R}$$

$$\text{Límite central} = \bar{\bar{x}}$$

$$\text{Límite central inferior} = \bar{\bar{x}} - A_2 \bar{R}$$

(Montgomery, Control Estadístico de la Calidad, 2004).

$A_2$  es una constante para varios tamaños de muestra dados.

### 2.6.2.3 CARTAS DE CONTROL PARA MEDICIONES INDIVIDUALES (IMR)

Estas cartas son útiles cuando el tamaño de la muestra es solo una unidad individual, es decir, el tamaño de la muestra es  $n=1$ . A continuación, se muestran algunos ejemplos de cuando usar estas cartas de control según Montgomery:

- Cuando la velocidad de producción es muy lenta, y no es conveniente dejar que se acumulen tamaños de muestra mayores que 1. El largo intervalo

entre las observaciones ocasiona problemas si se hicieran subgrupos racionales

- Cuando las mediciones repetidas del proceso difieren únicamente por el error de laboratorio o de análisis. Como puede ser el caso de composiciones, procesos químicos, etc.

### **Límites para la carta de control para mediciones individuales:**

Los límites para esta carta de control se construyen con el rango móvil y el promedio de las observaciones, donde:

RM = Rango Móvil

$x_i$  = Observaciones individuales

$\bar{x}$  = promedio de las observaciones individuales

$\overline{RM}$  = Rango Móvil promedio

$d_2$  = Constante, factor para la línea central (1,128)

Con lo anterior ya se pueden construir los límites de la carta de control para mediciones individuales, y se ven de la siguiente manera:

$$\text{Límite central superior} = \bar{x} + 3 \frac{\overline{MR}}{d_2}$$

$$\text{Límite central} = \bar{x}$$

$$\text{Límite central inferior} = \bar{x} - 3 \frac{\overline{MR}}{d_2}$$

#### 2.6.2.4 INTERPRETACIÓN DE LAS CARTAS DE CONTROL $\bar{x}$ E IMR

Las cartas de control para ser validadas necesitan indicar que el proceso, no sigue patrones de comportamiento no aleatorios o sistemáticos (Montgomery, Control Estadístico de la Calidad, 2004). Por tanto, las cartas de control no deberán indicar los siguientes patrones:

- **Patrones cíclicos:** Cuando los puntos graficados tienden a crear ciclos ascendentes o descendentes con varios de sus puntos. Suelen ser causados por la fatiga del operador, cambios de temperaturas, voltaje, o alguna variable del equipo de producción
- **Mezcla:** Cuando los puntos graficados tienden a localizarse cerca o ligeramente afuera de los límites de control y con una cantidad mínima de puntos alrededor de la línea central.
- **Corrimiento en el nivel del proceso:** Cuando hay un cambio repentino en la aleatoriedad de los datos graficados. Puede ser causado por la introducción de nuevos operadores, métodos, materias primas o máquinas.
- **Tendencia:** Cuando varios puntos graficados presentan un movimiento continuo en una sola dirección. Pueden ser ascendentes o descendentes. Pueden ser causados por el desgaste gradual de una herramienta o algún componente del proceso.
- **Estratificación:** Cuando los puntos graficados en la carta de control, tienden a agruparse artificialmente alrededor de la línea central. Puede ser causado por un mal cálculo de la construcción en los límites de control.

Adicionalmente en, (Montgomery, Control Estadístico de la Calidad, 2004) para aceptar la construcción de una carta de control se espera no tener los siguientes casos:

- Uno o más puntos graficados fuera de los límites de control
- Dos de tres puntos consecutivos fuera de los límites de advertencia dos sigma pero aún dentro de los límites de control
- Cuatro de cinco puntos consecutivos fuera de los límites una sigma
- Una corrida de ocho puntos consecutivos en el mismo lado de la línea central
- Seis puntos seguidos que se incrementan o se decrementan de manera sostenida
- Quince puntos seguidos abajo o arriba de la línea central
- Catorce puntos seguidos alternándose arriba y abajo
- Ocho puntos seguidos en ambos lados de la línea central
- Un patrón inusual o no aleatorio de los datos
- Uno o más puntos cerca de un límite de control

La carta de control deberá estar exenta de todos los patrones y problemas antes mencionados. Garantizar lo anterior asegurará un mejor control del proceso y verificación de su comportamiento (Montgomery, Control Estadístico de la Calidad, 2004)

## **2.7 FUNDICIÓN O COLADO DE METALES**

La fundición, es el proceso por el cual, se derriten o se licuan metales sólidos para la producción de piezas con formas definidas (Kalpakjian & Schmid, 2002).

El proceso consiste simplemente en colar o llenar un molde con metal fundido, y esperar a que el metal tome la forma del molde al solidificarse (Borrás & Ferrer, 2000).

Este proceso es posible porque los metales en estado líquido tienen una buena fluidez, elevada densidad y son buenos conductores de calor (Rodríguez, Castro, & Del real, 2006).

### **2.7.1 PROCESOS DE FUNDICIÓN POR COLADO**

En el tiempo, se han desarrollado y mejorado las técnicas de fundición y colado para la obtención de distintos productos requeridos por el hombre. Así, en la actualidad, la fundición de metales por colado es conseguida bajo diversos procesos. En (Kalpakjian & Schmid, 2002) se mencionan algunos de ellos:

- Fundición en molde de arena verde
- Moldeo en cascara
- Modelo consumible
- Fundición en molde de yeso
- Fundición en molde cerámico
- Fundición por revestimiento
- Fundición en molde permanente
- Fundición en Troquel

- Fundición Centrifuga

A continuación se presenta en la Tabla N.2, un resumen de las ventajas y limitaciones de cada uno de estos procesos antes mencionados.

PROCESO	VENTAJAS	LIMITACIONES
<u>Arena verde</u>	Se puede colar cualquier metal: no hay límite de tamaño, forma o peso; proceso económico, costos bajos de herramental	Se requiere procesos de acabado; se tiene un acabado algo áspero.
<u>Moldeo en cáscara</u>	Buena precisión dimensional y acabado superficial; alta velocidad de producción	Restricciones en el tamaño de la pieza; se requieren modelos y equipos costos.
<u>Modelo consumible</u>	Se pueden fundir varios metales; se pueden obtener formas complejas	Los modelos tienen baja resistencia y puede ser costosos para pequeñas cantidades
<u>Molde de yeso</u>	Ayuda a obtener precisión dimensional; buenos acabados; porosidad baja	Limitado a metales no ferrosos, de tamaño y volumen de producción limitados; tiempo de fabricación del molde relativamente largo.
<u>Molde cerámico</u>	Ayuda con un excelente acabado superficial: ayuda a obtener piezas con tolerancias estrechas	Tamaño de la pieza limitado
<u>Fundición por revestimiento</u>	Precisión de acabados: se puede fundir cualquier metal; ayuda para obtener piezas complejas	El tamaño de la pieza es limitado; modelos, moldes y mano de obra costosos.
<u>Molde Permanente</u>	Ofrece buen acabado dimensional; disminuye la porosidad; y tiene una velocidad de producción alta	Costo del molde es elevado; forma y complejidad limitados; no adecuado para metales de alto punto de fusión.
<u>Troquel</u>	Precisión dimensional y acabado superficial excelente; velocidad de producción alta	El costo de la matriz es alto; el tamaño de la pieza es limitado; por lo general limitado a metales no ferrosos; tiempo de entrega largo.
<u>Centrífugo</u>	Excelente para obtención de piezas cilíndricas grandes de alta calidad; tiene velocidad alta de producción	El equipo es costoso; la forma de la pieza es limitada.

Tabla N2. Resumen de procesos de colado, Adaptado de (Kalpakjian & Schmid, 2002). Elaboración propia.

El proceso de fundición en arena verde es uno de los métodos más utilizados en la industria y es de vital utilidad para JCR Fundiciones, por tanto será de particular interés en los siguientes capítulos.

## **2.8 FUNDICIÓN EN ARENA VERDE**

Arena verde lleva su nombre porque en su mezcla utilizada para moldear contiene un cierto grado de humedad (Groover, 1997).

La arena de fundición es el sílice  $\text{SiO}_2$ , y es usada en fundición por sus propiedades refractarias, expresadas como la capacidad para resistir altas temperaturas, sin fundirse o degradarse (Groover, 1997).

Esta arena está formada por un conjunto desordenado de granos de diversa forma y composición mineral, sus tamaños están comprendidos entre 0,02 y 5mm (Crespo, 2003).

La arena sílice  $\text{SiO}_2$  para ser utilizada en fundición se mezcla con porciones de componentes como: arcilla aglutinante o también llamada bentonita, carbonilla, y agua (Groover, 1997).

En (Kalpakjian & Schmid, 2002) se compila los pasos que realiza la industria para llevar a cabo los procesos de fundición en arena verde, estos son:

- Construcción de un modelo con la forma de la pieza deseada
- Incorporar un sistema de alimentación de metal líquido al modelo
- Preparar arena verde de moldeo
- Elaborar un molde robusto con arena verde que cubra al modelo en su totalidad
- Llenar el molde o cavidad resultante con el metal fundido
- Esperar que el metal del molde se enfríe y solidifique

- Romper el molde de arena y retirar la pieza fundida.

(Kalpakjian & Schmid, 2002)

## 2.9 MODELO DE FUNDICIÓN

La fundición en arena verde requiere un modelo del objeto o pieza que se desea obtener. Los modelos generalmente se construyen en madera, plástico, o metal. La selección del material depende de la cantidad de fundiciones a producir con el modelo (Groover, 1997).

Hay varios tipos de modelos: modelo sólido, modelos divididos, moldes con placa de acoplamiento y moldes de doble cara superior e inferior (Groover, 1997).

En la Figura N.4 se presenta una ilustración de los diferentes tipos de modelos.

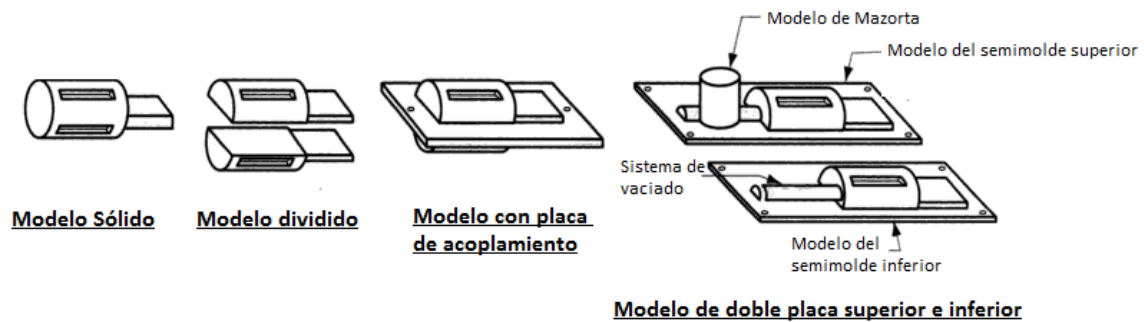


Figura N.4 Tipos de modelos para moldes fundición. Adaptado y modificado de (Groover, 1997).

## 2.10 CONFIGURACIÓN BASE DE MOLDES DE ARENA VERDE

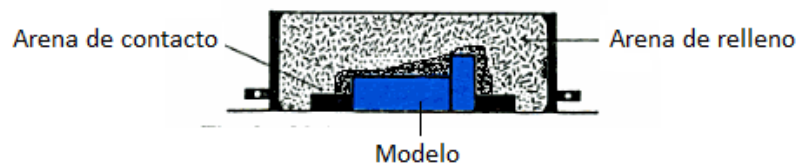
En (Gerling, 1979), se presenta la configuración básica para la elaboración de moldes de arena verde utilizada en la industria:

- *Modelo:* Pieza que imprime internamente al objeto o pieza final en el molde



- *Arena de contacto*: Es la arena verde de fundición limpia, zarandeada y recién mezclada que entra en contacto directo con el modelo de la pieza a fundir. Suele ser una capa de espesor de entre 10 y 30mm.
- *Arena de relleno*: Es arena verde de fundición con las mismas propiedades que la de contacto, pero puede ser usada sin zarandear y no necesariamente puede estar recién preparada.

En la Figura N.5 se muestra la configuración básica de elementos del molde de arena verde



**Figura N.5 Molde de arena, configuración básica. Elaboración propia**

### 2.10.1 COMPONENTES PRINCIPALES DE LOS MOLDES DE ARENA VERDE

En (Kalpakjian & Schmid, 2002), se presenta los componentes principales de los moldes de arena verde utilizada en la industria:

- *Caja de moldeo*: Cumple la función de retener la arena del molde y soportar la presión del metal líquido cuando se cola en el molde.

Los moldes de dos piezas están formados por moldes superior e inferior. Las cajas de moldeo pueden soportar a cada una de ellas. Si es una sola cara se puede utilizar una caja única y no dividida.

- *Copa de vaciado*: Es el lugar por donde se vacía al metal fundido.
- *Bebedero*: Cavidad por donde el metal líquido fluye hacia abajo.

- *Sistema de alimentadores*: Son canales que llevan el metal líquido desde la mazorta a la cavidad del molde. Los ataques son las entradas a la cavidad del molde.
- *Mazortas*: Suministran el metal adicional a la fundición conforme ésta se contrae durante la solidificación.
- *Corazón o Macho*: Son insertos hechos de arena. Se colocan en el molde para formar oquedades o de alguna forma definir la superficie interior de la fundición.
- *Respiradores*: Se colocan en los moldes para extraer los gases producidos cuando el metal fundido entra en contacto con la arena. También deja salir el aire de la cavidad del molde conforme el metal fundido fluye dentro del mismo

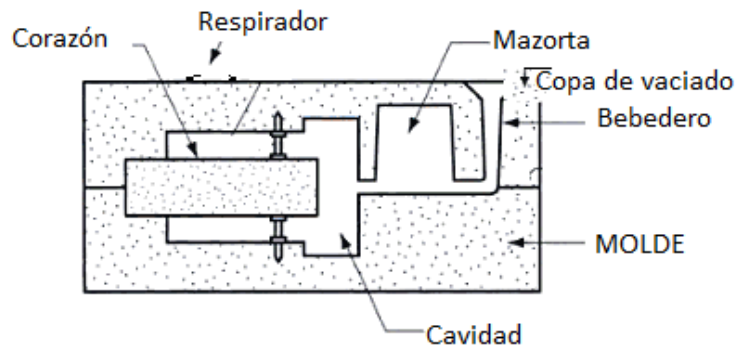


Figura N.6 Componentes principales de un molde de arena verde. Adaptado y modificado de (Groover, 1997)

## 2.10.2 PROCESO DE ELABORACIÓN DE MOLDES CON ARENA VERDE

Para la elaboración de un molde de arena verde se realizan los siguientes pasos:

- Se coloca al modelo en una caja de moldeo, luego se compacta arena verde de contacto alrededor del modelo, en la parte superior e inferior del mismo (Groover, 1997).

- Se llena a la caja de moldeo con arena verde o arena de relleno. El moldeo es el realizado a mano o en máquinas. Se compacta totalmente a la caja de moldeo hasta que ésta haya adaptado a la forma del modelo (Morral, Jimeno, Molera, & P, 2004)
- Se retira al modelo del molde, luego se limpian restos de la arena verde por donde se va a colar el metal, y finalmente se colocan pesos sobre el moldes para evitar que estos se revienten o se rompan al momento de colar (Morral, Jimeno, Molera, & P, 2004).

## 2.11 COMPOSICIÓN DE LA ARENA VERDE

La arena verde incluye a los siguientes componentes en su estructura:

- ***Arena Reciclada:***

Es la arena verde de moldeo recuperada después de una fundición y que puede ser reutilizada (Gerling, 1979).

- ***Arena Nueva:***

Es arena sílice  $\text{SiO}_2$  nueva que puede ser traída de ríos, mar o arena mineral de canteras (Groover, 1997).

- ***Carbonilla:***

Es un material extraído de minas carboníferas y se utiliza en forma pulverizada o granulada. Su función principal es la de proveer un acabado o tersura superficial de la pieza (Ramirez, 2006).

Ayuda a reducir la ocurrencia de penetración de metal y proporciona permeabilidad (Ramirez, 2006).

- **Bentonita:**

Es un componente indispensable para aglutinar la mezcla de la arena verde. Proporciona resistencia, moldabilidad y plasticidad a la mezcla de la arena verde (Ramirez, 2006).

- **Agua:**

Es un componente fundamental para la activación de la bentonita, también permite cohesionar a todos los elementos en mezcla la arena verde (Ramirez, 2006).

En la preparación de arena verde el agua debe ser cuidadosamente controlada, ya que niveles bajos de la misma no otorgará resistencia, plasticidad ni cohesión de los demás componentes. Excesivas cantidades en cambio pueden hacer una arena demasiado plástica y humedad afectando la resistencia (Ramirez, 2006).

## 2.12 PREPARACIÓN TÉCNICA DE LA ARENA VERDE

Una vez conocidos los principales componentes que son utilizados para la mezcla de la arena verde. A continuación se detalla su proceso de preparación.

- Se toma arena de reciclaje, se eliminan los grumos o impurezas que resultan de la cohesión de la arena, se zarandea a la misma con una malla para eliminar residuos metálicos grandes y piedras (Ramirez, 2006).
- Se coloca la arena reciclada limpia y zarandeadada en la cantidad deseada sobre el suelo en un espacio amplio, o simplemente sobre molinos de mezclado (Ramirez, 2006)

- Se agregan porciones de arena nueva, bentonita y de carbonilla sobre la arena reciclada, finalmente se coloca una porción de agua dependiendo de las cantidades de otros componentes utilizados. Se mezcla cuidadosamente a la arena hasta otorgar plasticidad y ligera humedad a la mezcla. (Ramirez, 2006).
- Finalmente verificar el aglutinamiento de la mezcla y si es apto o no para ser utilizada como arena verde de moldeo (Ramirez, 2006).

## **2.13 CARACTERÍSTICAS DE LA ARENA VERDE DE MOLDEO**

### **2.13.1 CLASIFICACIÓN DE LAS ARENAS SEGÚN EL TAMAÑO DEL GRANO**

Dentro de las arenas utilizadas en procesos de moldeo, se clasifica al tamaño del grano de la arena en rangos de apreciación. Mientras más fino sea el grano de arena, más fino será el resultado de las piezas fundidas pero puede no garantizar propiedades adecuadas para la arena verde (Morral, Jimeno, Molera, & P, 2004).

A continuación se presenta el rango para clasificar a las arenas por su tamaño de grano, tomado de (Morral, Jimeno, Molera, & P, 2004):

Muy gruesa	(1-2mm)
Gruesa	(0.5-1mm)
Media	(0.25-0.5mm)
Fina	(0.1-0.25mm)
Muy fina	(<0.1mm)

#### **2.13.1.1 MEDICIÓN DEL TAMAÑO DEL GRANO DE ARENA**

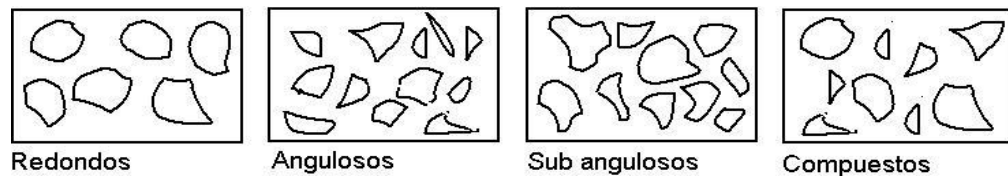
Para determinar el tamaño promedio del grano de una arena, es necesario realizar un ensayo de finura de arena. A continuación, se presenta el procedimiento estándar propuesto por la Sociedad Americana de Fundidores y citado en (Ramirez, 2006):

- Colocar una serie de once tamices de diferentes tamaños o números de espacios por pulgada lineal, con una tapa en la parte superior y una charola en la parte inferior.
- Colocar una muestra de 50 a 100gr aproximadamente y hacerla vibrar por 15 minutos en un vibrador o máquina Ro-Tap.
- Seguidamente pesar la arena retenida en cada malla o tamiz,
- Realizar una multiplicación por un factor predeterminado para cada tamiz, luego sumar los productos obtenidos y dividir entre el peso total de la muestra. Así, se obtiene el tamaño promedio del grano bajo norma AFS, por sus siglas en inglés.
- El tamaño promedio del grano se expresa también como el número de grado de finesa de grano "gfn". Generalmente se acepta que la mejor arena para usar en el proceso de moldeo, deberá tener un mínimo del 10% de arena retenida en cuatro cribas o mallas contiguas. Cuando los resultados de la distribución son trazados, deberán formar una curva de distribución normal.

### **2.13.2 CLASIFICACIÓN DE LAS ARENAS POR LA FORMA DEL GRANO**

Como se mencionó, las arenas son conjuntos desordenados de granos y formas. Pero también son clasificables según su forma. Las arenas se clasifican en cuatro grupos por su forma de grano (Morrall, Jimeno, Molera, & P, 2004).

A continuación, se presenta en la Figura N.7 la representación de cada una de las formas en las que se pueden hallar los granos de arena en la naturaleza.



**Figura N.7 Formas de los granos de arena. Tomado de (Morrall, Jimeno, Molera, & P, 2004).**

Los granos de arena angulares son los mejores, ya que facilitan el proceso de apisonado, presentan mayor permeabilidad, resistencia, disminuyen propiedades abrasivas, y ofrecen la oportunidad de reducir defectos en las piezas fundidas (Morrall, Jimeno, Molera, & P, 2004).

Los granos de arena redondos, demuestran mejor plasticidad y permeabilidad que los angulares pero tienen mayor tendencia a trabarse produciendo brumos no deseables (Fundidores, 2010).

Los granos compuestos en cambio requieren de mayores cantidades de aglomerante y tienden a quebrarse cuando son sometidos a energía mecánica o térmica, por tanto son los menos recomendables (Fundidores, 2010).

### **2.13.3 PROPIEDADES DE LA ARENA VERDE**

#### **Resistencia a la compresión en verde:**

Es la capacidad de las arenas de moldeo para resistir los esfuerzos generados en la preparación del molde, y también para contrarrestar la presión del metal líquido durante la colada (Abril, 1956).

La resistencia depende de la humedad de la arena, del contenido y tipo de bentonita, del tamaño y forma del grano de arena y de la aglutinación que ha sido sometida la arena (Abril, 1956).

El porcentaje de humedad en la arena de moldeo, hasta un cierto valor, hace aumentar la resistencia de la misma. Abril referencia que, la humedad de hasta un 7% es normal, pero al seguir en aumento, la arena de moldeo pierde resistencia mecánica. Por otra parte, se dice que, el contenido de arcilla o bentonita aumenta proporcionalmente la resistencia mecánica de las arenas de moldeo. Lo que puede afectar a la resistencia de la arena son las características de las arcillas, en este caso puede afectar: la capacidad de absorción del agua ya que depende de la granulometría de la arcilla, su composición química y su estructura.

Realizar pruebas de resistencia es común en la mayoría de fundidoras, ya que es una de las propiedades de mayor interés para garantizar buena calidad de la arena verde que se usa en moldeo (Fundidores, 2010)

### **Permeabilidad:**

Es la propiedad de la arena de moldeo que permite evacuar los gases de la colada a través del molde sin dañar su estructura interna (Ramirez, 2006).

Esta propiedad es importante para evitar los poros internos en las piezas. La permeabilidad puede depender del tamaño y forma de los granos de arena, la cantidad de bentonita y la intensidad del apisonado (Ramirez, 2006).



Arenas con alta permeabilidad están sujetas a problemas de terminado tales como sobre quemado, vitrificación o defectos de expansión. Sin embargo permeabilidades bajas también pueden sugerir problemas en el terminado de piezas (Fundidores, 2010).

La permeabilidad como prueba indicará la medida de la facilidad con la que los gases del molde o de los corazones se escapan (Fundidores, 2010).

### **Humedad:**

La humedad es una de las propiedades más importantes para la arena verde de moldeo. El agua afecta a cada una de las propiedades físicas de la arena de moldeo, resistencia a la compresión en verde, permeabilidad, expansión, dureza (Fundidores, 2010).

El agua desempeña la función básica de transformar la arcilla en un material plástico, lo que permite que se adhiera a los granos de arena y a si misma cuando se le aplica la fuerza de compactación (Fundidores, 2010).

Las pruebas de humedad por si solas no son relevantes, las son cuando se evalúan en relación a las demás pruebas de arena verde (Fundidores, 2010).

### **Compactibilidad:**

La compactibilidad es una de las pruebas primarias más fáciles e informativas. Indica el excesivo o incompleto temple de la arena verde (Fundidores, 2010).

Una arena bien mezclada con niveles apropiados de humedad, presentara un número de compactibilidad equivalente de 9 a 12 veces el número de porcentaje humedad (Fundidores, 2010).

**Temperatura:**

Según la Sociedad Americana de Fundidores, 2010, la temperatura es una propiedad y una prueba importante en fundidoras que trabajan con arena verde. Mencionan que, se deben realizar mediciones periódicas y controlar que la arena no sobrepase los 38°C, ya que de existir aumentos de temperatura se pueden reducir las propiedades de la arena, se necesitarán mayores tiempos de mezclado y se puede tener moldes quebradizos.

**Propiedades Refractarias:**

Comportamiento de la arena de moldeo frente a la acción de temperaturas elevadas. Este comportamiento depende principalmente de la pureza del cuarzo o arena y de las características de la arcilla (Abril, 1956).

La falta de propiedades refractarias en las arenas de moldeo origina que los moldes se deformen bajo la acción de la temperatura del metal líquido, y también de la arena, lo que puede originar reblandecimientos, adhesiones de arena en la pieza, y formaciones excesivas de rebabas<sup>1</sup> (Abril, 1956).

**Deformación:**

Es la propiedad que tienen las arenas de moldeo para deformarse, una vez compactadas, bajo la acción de cargas mecánicas (Groover, 1997).

Una buena propiedad de deformación de las arenas de moldeo es conveniente para facilitar la extracción de los modelos sin romper el molde. En el caso contrario, donde la

---

<sup>1</sup> Rebabas: Son montículos o vuelos finos de [metal](#) que se forma a los lados de una pieza de [fundición](#), en donde estaban las [junturas](#) del [molde](#), por lo general son de forma triangular (Kalpakjian & Schmid, 2002).

deformación es excesiva se puede tener complicaciones con el molde a causa de la presión que soporte el molde cuando se vierte el metal líquido (Abril, 1956).

#### **2.13.4 VALORES TÍPICOS PARA LAS PROPIEDADES DE LA ARENA VERDE DE MOLDEO**

A continuación se presenta en la Tabla N.3 una aproximación típica deseable de las características que debe tener la arena verde para fundiciones de hierro nodular y gris, presentada en (Erazo, Flores, & Monroy, 2005). Esta aproximación es sugerida en el objetivo de disminuir la cantidad de errores o defectos en la las piezas fundidas causadas por la arena verde.

METAL	TAMAÑO DE PIEZAS	HUMEDAD %	PERMEABILIDAD A.F.S	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN VERDE	NÚMERO DE FINURA A.F.S	ARCILLA AFS %	TIEMPO DE MEZCLA (min)
HIERRO GRIS - HIERRO NODULAR	Grandes >200Kg	3,7 - 6	100-150	14 a 16	50 - 65	13 - 17	3 a 5
	Medianas 40-200Kg			13 a 16	60 - 80		
	Pequeñas < 40 Kg			8 a 16	95 - 120		

**Tabla N.3 Valores típicos deseables en las propiedades de la arena verde de moldeo. Tomado y modificado de (Erazo, Flores, & Monroy, 2005). Elaboración propia**

Los valores presentados en la Tabla N.3 dependen en gran medida de la calidad de cada uno de los componentes con las que se trabaje en la preparación de arena verde, sin embargo son valores aproximados que sugieren solucionar problemas de piezas defectuosas y formulaciones de la arena verde de moldeo.

Cabe indicar que los porcentajes de arcilla que presenta el autor se deben evitar y es esencial que los sistemas de arena tengan la menor cantidad posible de arcilla en la arena del sistema según lo menciona el Ing. Gustavo López, Gerente de producción de JCR Fundiciones.

## **2.14 DEFECTOS EN PIEZAS FUNDIDAS EN ARENA VERDE**

En la fundición de metales existen varias causas generadoras de defectos en las piezas finales. Los defectos son identificables y pueden ser controlados mejorando las condiciones de operación en donde se puedan estar generando (Fundidores, 2010)

A continuación se presentan las principales causas generadoras de defectos en piezas fundidas en arena verde, presentados en (Fundidores, 2010), (Ramirez, 2006):

### **2.14.1 CAUSAS DE DEFECTOS EN PIEZAS FUNDIDAS**

#### ***Causas debidas al equipo de moldeo utilizado durante el proceso:***

- Errores en la fabricación de los modelos, diseños de alimentadores, mazortas, etc.
- Mal estado de las cajas de moldeo y herramental pequeño
- Mal estado de máquinas de moldeo, apisonadores, etc.

#### ***Causas debidas al cambio de estado líquido del metal al estado sólido:***

- Bajas o elevadas temperaturas del metal líquido al momento de colar
- Errores en la preparación de aleaciones de metal fundido
- Las contracciones o disminuciones de volumen violentas de las aleaciones

#### ***Causas debidas a las operaciones y a los materiales utilizados durante el proceso***

- La arena verde no garantiza propiedades sobresalientes para elaborar moldes.
- Mal estado de molinos de mezclado de arena

- Falta de experiencia de los moldeadores
- Falta de tratamiento de la arena usada y nueva

#### 2.14.2 DEFECTOS EN LAS PIEZAS CAUSADOS POR LA ARENA VERDE

En la fundición en arena verde o seca se producen ciertos defectos que son originados por el uso de arena preparada con propiedades deficientes o por la baja calidad de sus componentes.

A continuación se presentan los defectos más comunes causados por la arena verde:

##### **Sopladuras:**

Son defectos caracterizados por una cavidad de gas en forma de pelota. Se originan por un escape de gases del molde durante el vaciado. Ocurre generalmente en la parte superior de la fundición.

Causas: Baja permeabilidad, limitados escapes de gases, y alto contenido de humedad de la arena, arena procesada demasiado caliente (Fundidores, 2010)

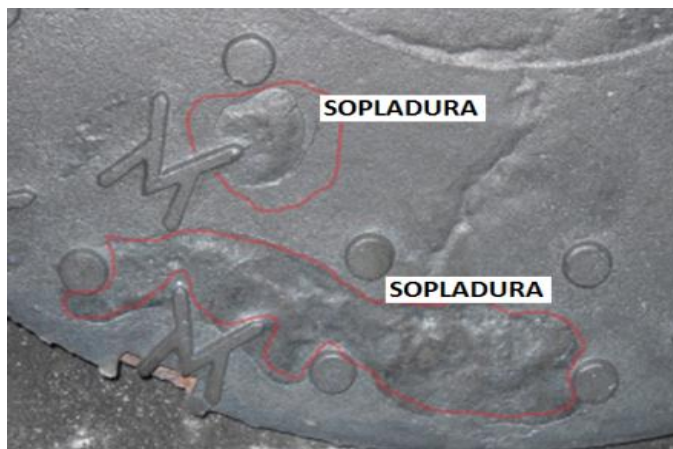


Figura N.8 Defecto: Sopladuras. Fotografía propiedad de JCR Fundiciones. Modificación propia.

### **Puntos de alfiler:**

Es un defecto similar al de las sopladuras y comparten las mismas causas. Sin embargo, en este defecto se generan numerosas cavidades de bolas de gas de menor tamaño que las sopladuras. Este defecto se genera en la parte superior de la fundición (Fundidores, 2010)



**Figura N.9 Defecto: Puntos de alfiler. Fotografía y modificación propia.**

### **Caídas de arena:**

Defecto que provoca una irregularidad en la superficie de fundición. Es el resultado de la erosión del molde de arena durante el vaciado. En este caso el contorno de la erosión se imprime en la superficie de la pieza final (Ramirez, 2006).

Causas: arena con deficiente humedad, inadecuados dispositivos de colado, arena caliente, apisonado o moldeado inadecuado (Fundidores, 2010)



**Figura N.10 Defecto: Caídas de arena. Fotografía propiedad de JCR Fundiciones. Modificación propia.**

#### **Incrustaciones de arena o costras:**

Son áreas rugosas que se generan producto del desprendimiento de arena de la superficie del molde que se deshacen durante la solidificación y quedan adheridas a la superficie de la pieza final (Ramirez, 2006).

Las incrustaciones de arena son acontecimientos que resultan del desprendimiento de pequeñas o grandes cantidades de arena del molde de fundición al momento en que ingresa el metal líquido dentro del molde y se convierten en una fuente de contaminación para las piezas terminadas (Ramirez, 2006).

Causas: arena con exceso de humedad, inadecuados dispositivos de colado, apisonado o moldeado inadecuado, insuficiente adición de arena nueva (Fundidores, 2010).

**Rugosidad superficial:**

Es un defecto que se genera cuando existen mezclas del metal con la arena del molde fundición. Se presenta cuando la fluidez del metal es muy alta y existe una inadecuada compactación del molde (Erazo, Flores, & Monroy, 2005)

La rugosidad superficial es el conjunto de las irregularidades superficiales correspondiente a las huellas dejadas en la superficie real por el procedimiento de elaboración (Álvarez, 2011)

La importancia de investigar la rugosidad superficial va en el orden de la creciente demanda de producto mecanizado para diversas industrias quienes exigen piezas con el mejor acabado (Correa, Ramirez, & Rodriguez, 20006).

**Molde agrietado:**

Es un defecto que puede dañar la forma total de una pieza de fundición. El molde de arena puede agrietarse o romperse si no presenta una buena resistencia o no se encuentra adecuadamente pesado como para soportar la presión (Ramirez, 2006).

Causas: arena con exceso de humedad, excesos de bentonita, moldes excesivamente duros, incorrecta química del material (Fundidores, 2010).



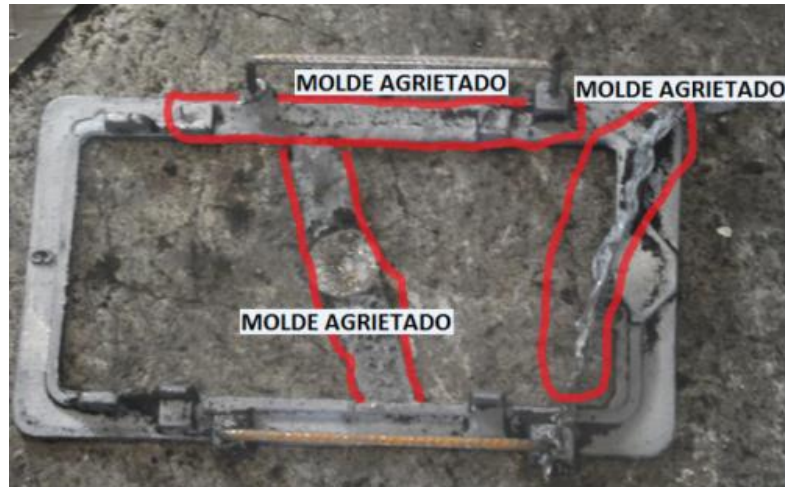


Figura N.-11 Defecto: Molde agrietado. Fotografía propiedad de JCR Fundiciones. Modificación propia.

## 2.15 PROYECTOS RELACIONADOS Y/O COMPLEMENTARIOS PARA EL ESTUDIO:

*Proyectos Complementarios:*

**Proyecto 1: “Determinación de la composición óptima de la arena de fundición empleada para fabricar piezas de hierro y evaluación de sus propiedades”**

*Autores:* Carlos Erazo, Salvador Flores, y Ángel Monroy

*Descripción del proyecto:* Este estudio determina la composición óptima de la arena verde empleada para fabricar piezas de hierro, así como también evaluar sus propiedades mecánicas. En este estudio se presentan las condiciones actuales de preparación de las arenas, se describen los procedimientos y los criterios de preparación utilizados por los operarios. En un segundo alcance se obtiene una fórmula óptima, que sugiere brindar mejores

acabados en las superficies de las piezas. Para determinar la composición óptima de las arenas se utiliza un método estadístico de análisis de experimentos.

*Ideas útiles para el estudio:*

- Recomendaciones para la estructuración de análisis de experimentos a nivel de las arenas de fundición: Proporciona factores claves de estudio y su influencia en los resultados de las piezas de hierro fundido finales.
- El proyecto aporta con formas para realizar mediciones y análisis a nivel de laboratorios y en software computacionales acerca de las piezas obtenidas para cada experimento

## **Proyecto 2: “Ensayos de arenas y arcillas para fundición”**

*Autor:* Gerardo Coello

*Descripción del proyecto:* En este trabajo se describen diferentes tipos de arenas que se pueden obtener en el Ecuador, específicamente en la región costa y sierra. Finalmente en dicho proyecto se presentan recomendaciones para la utilización de estas arenas en los procesos de fundición de metales en moldes de arena.

*Ideas útiles para el estudio:*

- Propuestas para la utilización de la arena de moldes de fundición. Esto favorecerá a la generación de ideas para la estructuración de experimentos ya que puede aportar ideas para incluir a otros factores en el análisis.

### **Proyecto 3: “Formulaciones detergentes biodegradables: Ensayos de lavado”**

Autor: Deisei Altmajer Vaz

*Descripción del proyecto:* Se desarrolla un diseño experimental para el estudio del proceso de lavado de superficies duras. El objetivo del proyecto fue simular el funcionamiento de sistemas industriales de lavado. Con ello se desarrollan distintas formulaciones detergentes que son sensibles a variables del proceso, como lo son: temperatura, caudal de circulación, concentración de detergente, suciedad, etc.

Las distintas formulaciones detergentes fueron creadas a partir del uso de una metodología de diseño de experimentos. Con ello, se desarrolló un mínimo de experimentos para analizar el impacto de las distintas variables sobre la detergencia. Los resultados obtenidos pueden ser utilizados para el desarrollo de modelos matemáticos adecuados que predicen la detergencia dentro del dominio experimental investigado.

*Ideas útiles para el estudio:*

- Estructuración y construcción de un modelo de diseño de experimentos.
- Permite visualizar y optimizar la técnica de experimentación a través de un diseño general hasta una estructuración de modelos factoriales
- Comprobación de bondad de los modelos de experimentación
- Análisis de resultados experimentales.

## **Proyecto 4: “Defectología”**

Autor: Ricardo Echeverría

*Descripción de la guía:* Presenta un listado de los defectos superficiales que pueden sufrir las piezas producto del proceso al que es sometido y que puede sufrir por causas inherentes al mismo. Aquí se detallan las posibles causas y la clasificación de los distintos defectos y discontinuidades.

*Ideas útiles para el estudio:*

- De particular interés la información acerca de los errores, defectos o discontinuidades que pueden sufrir las piezas de fundición generadas por el efecto de la arena verde de fundición.

### **2.16 REVISIÓN LITERARIA:**

En la industria de la fundición de metales por procesos de arena verde, el análisis de la mezcla de la arena es prioritario debido a que, su reutilización tiende a empobrecerse paulatinamente en arcilla y sobrecargándose de polvos [28]. No solo su reutilización es causa de preocupación, sino también la calidad de los materiales y equipos con los que se trabaja [29]. La preparación de arena verde no solo sirve para reactivarla, sino que es útil para obtener una mezcla con características moldeables, deberá presentar una humedad de temple, una resistencia apreciable, una permeabilidad adecuada para las piezas que se desean obtener,

una compactación apropiada [19]. De no cumplir con las características deseables será muy recurrente la aparición de piezas rechazadas o con defectos producidos por la arena verde mal preparada o con deficientes propiedades [28-29-19].

La mezcla de arena verde no tiene una composición definida o estándar, debido a los materiales y equipos con los que se trabaja en cada fundidora [22], sin embargo garantizar propiedades adecuadas para uso único son importantes. Una vez alcanzadas propiedades requeridas se torna indispensable el control de todo el sistema de arenas [28-29]. Se volverá necesaria la realización de pruebas al momento de recibir la materia prima para mezcla de arena, pruebas de la calidad de la arena preparada en el sistema y pruebas de seguimiento del estado de la arena verde que esta siendo reutilizada constantemente [29-22].

Para el estudio de composiciones de arena verde se han utilizado varias técnicas de estudio, no solo enfocadas a obtener una mezcla apropiada, sino mas bien a analizar los diferentes efectos de la arena sobre el metal que es fundido [19], así se destacan técnicas estadísticas [2], pruebas gráficas [12], pruebas con ensayos no destructivos [11-12], etc., cada uno con un objetivos distintos, pero todas apuntan a la necesidad específica que se requiera en cuanto a la arena verde de fundición.

Por tanto, la composición de la arena verde fundición no tiene una composición universal, sino que la composición dependerá de los materiales, equipos, y necesidades de producción que tenga cada fundidora [12].

### 3. CAPÍTULO III: ESTUDIO TÉCNICO

#### 3.1 MAPA DE PROCESOS JCR Fundiciones

En este capítulo se presentan los diferentes mapas de procesos de JCR Fundiciones partiendo de niveles generales hasta terminar en el nivel productivo que será de interés de estudio, la preparación de la arena verde.

Los mapas de proceso fueron estructurados con la información de JCR Fundiciones e información de los departamentos de compras, y contabilidad.

##### 3.1.1 NIVEL CERO DE LOS PROCESOS DE JCR Fundiciones

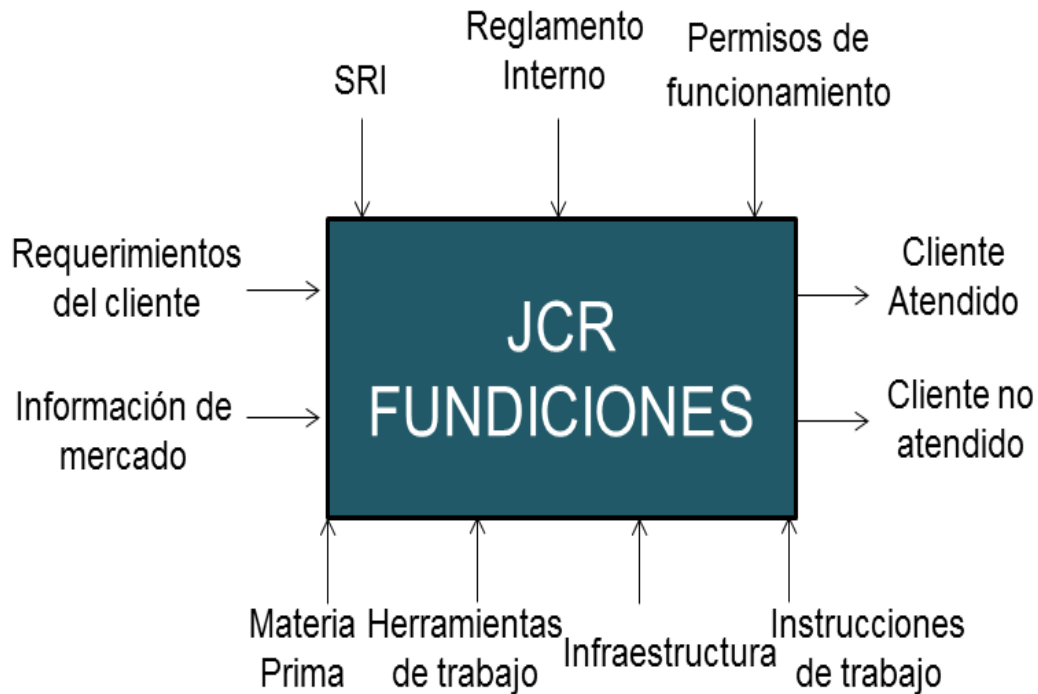


Figura N.-12: Nivel cero de los procesos de JCR Fundiciones

### 3.1.2 NIVEL UNO DE LOS PROCESOS DE JCR Fundiciones

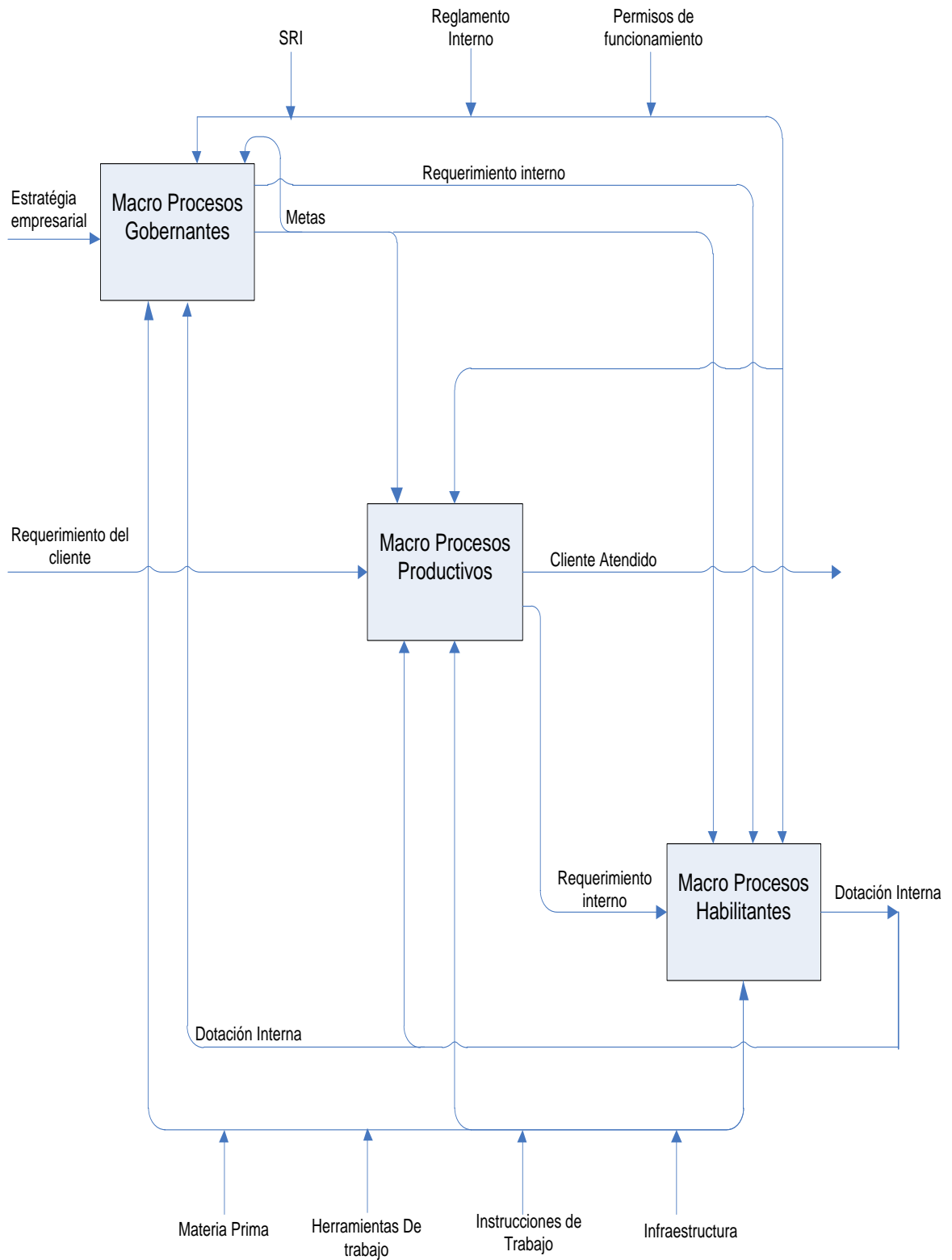


Figura N.-13: Nivel uno de los procesos de JCR Fundiciones

### 3.1.3 NIVEL DOS DE LOS PROCESOS DE JCR FUNDICIONES

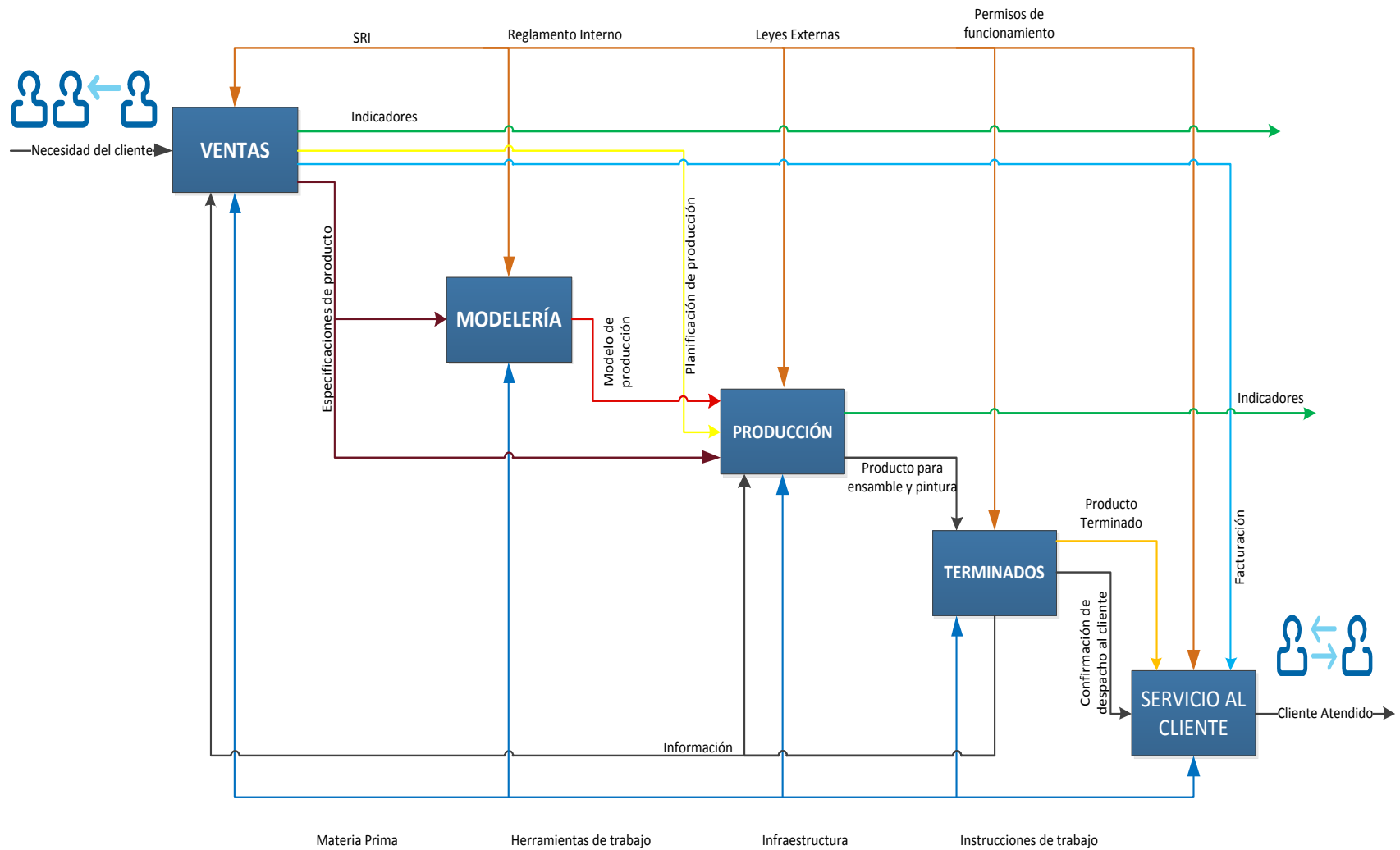


Figura N.-14: Nivel dos de los procesos de JCR Fundiciones



### 3.2 CADENA DE VALOR DE JCR Fundiciones

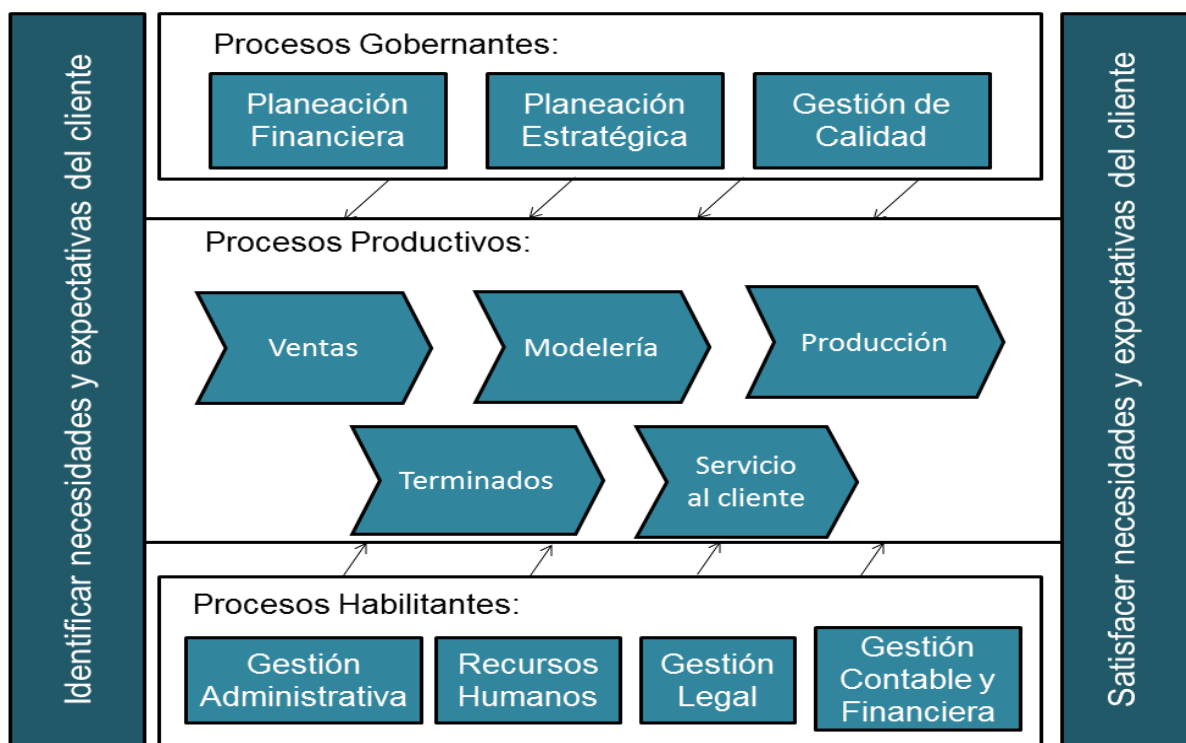


Figura N.-15: Cadena de valor de JCR Fundiciones

### 3.3 PROCESO PRODUCTIVO: FLUJOGRAMA ACTUAL DE LA PREPARACIÓN DE LA ARENA VERDE DE MOLDEO DE JCR FUNDICIONES

OBJETIVO: PREPARACIÓN DE ARENA VERDE DE MOLDEO

INICIO: CARGA DE ZARANDA CON ARENA DE RECICLAJE

FIN: REALIZAR LIMPIEZA DEL MOLINO

FECHA DE ELABORACIÓN: 07/10/2011

ELABORADO POR: SEBASTIÁN DÍAZ

REVISADO POR: GUSTAVO LOPEZ

APROBADO POR: GUSTAVO LOPEZ

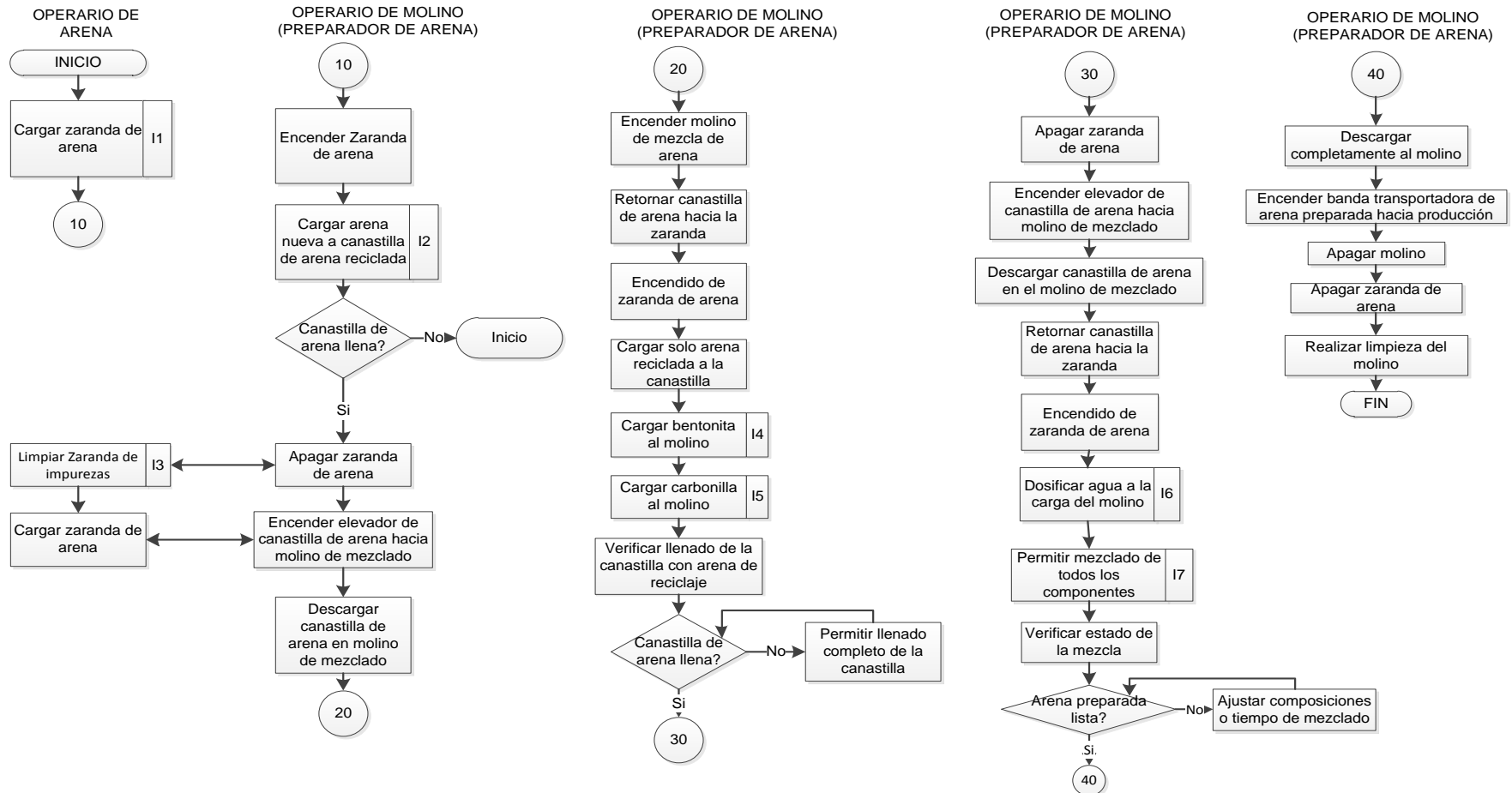


Figura N.16: Flujoograma del procesos de preparación de arena verde de JCR Fundiciones

Las instrucciones I# correspondientes a la figura N.16, se presentan en el Anexo N.1.

## 4. CAPÍTULO IV: MODELO EXPERIMENTAL Y EQUIPOS DE MEDICIÓN

### 4.1 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

“Proponer una mezcla alternativa para la arena verde de moldeo de JCR Fundiciones que otorgue mejores propiedades a la misma, y que sugiera reducir los defectos por arena en las piezas finales”.

#### 4.1.1 CAUSAS DEL PROBLEMA Y PRIORIDADES PARA EL ESTUDIO EXPERIMENTAL

Se realizaron reuniones con operarios, los gerentes de producción, y de ingeniería para identificar las causas que impactan actualmente sobre la composición de la arena verde de JCR Fundiciones. A continuación, se presenta en la Figura N. 17 un diagrama causa efecto del problema. Se construyó como resultado de la colaboración del personal que conoce el proceso.

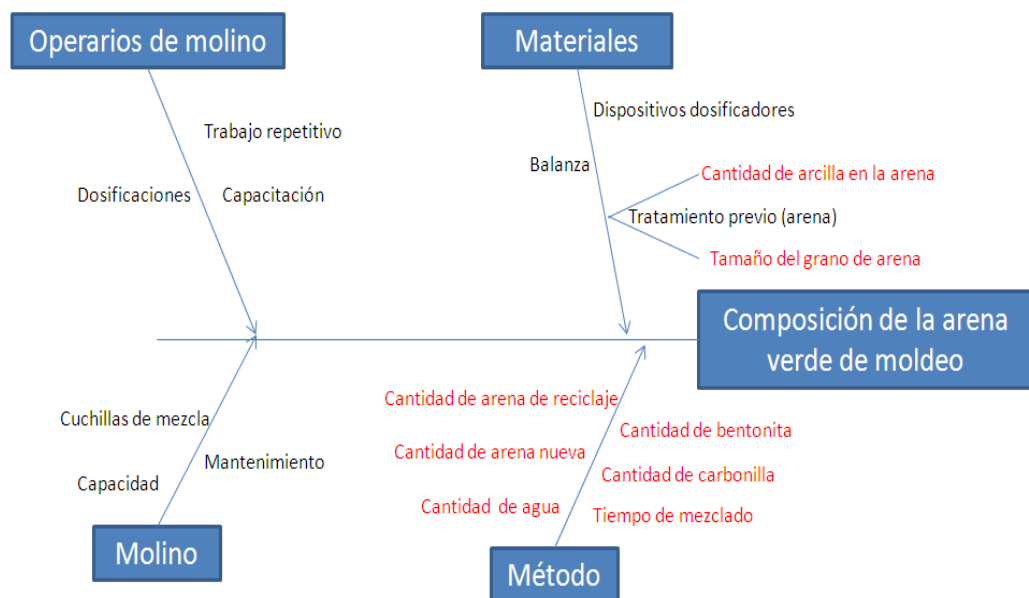


Figura. N.17 Diagrama Causa Efecto de la composición de la arena verde de fundición. Elaboración Propia.

De la Figura N.- 17, diagrama Causa Efecto, se han escrito en color rojo a las causas más importantes que sugieren revisar los operarios y los gerentes de la empresa.

Una vez planteadas las causas que sugieren impactar sobre la composición de la arena verde, se procedió a realizar una ponderación de las causas, con la finalidad de tomar en cuenta a las principales y justificar un análisis experimental. Para ello, se realizó un esquema de calificación con escala del uno al cinco, siendo cinco, el valor más alto de importancia. Se obtuvieron los siguientes resultados presentados en la Tabla N.4:

CAUSAS	CONSULTADOS						TOTAL
	1	2	3	4	5	6	
<i>Método</i>	4	4	5	5	5	5	28
<i>Materiales</i>	4	3	4	3	3	3	20
<i>Molino</i>	2	3	3	3	3	3	17
<i>Operadores de molino</i>	2	2	3	2	2	2	13

**Tabla N.4 Calificaciones de las causas que afectan a la composición de la arena verde de JCR Fundiciones**

Una vez confirmado que, el factor método y factor materiales son las causas prioritarias de estudio para el problema de la composición de la arena de moldeo, se sugiere por parte de JCR Fundiciones tomarlos en cuenta para el desarrollo experimental y medir su impacto sobre las características de la arena preparada.

## **4.2 ELECCIÓN DE FACTORES PARA LA COMPOSICIÓN DE LA ARENA VERDE**

De acuerdo con los criterios del literal anterior, ahora se seleccionan a los factores que serán estudiados durante la realización del modelo experimental.

Para ello, el Jefe de Producción Ing. Gustavo López, sugiere tomar en cuenta a los siguientes factores:

- Cantidad de arena reciclada
- Cantidad de arena nueva
- Cantidad de Bentonita
- Cantidad de Carbón Carbonilla
- Cantidad de Agua
- Tiempo de mezclado

Sin embargo, de manera inicial, antes de establecer los niveles para cada factor mencionado, se sugiere por parte del Gerente de Ingeniería, Ing. Gustavo Vera, analizar las condiciones actuales de los contenidos de arcilla y el tamaño del grano de la arena que se encuentra en el sistema (Arena de reciclaje) y de la misma forma un análisis para la arena nueva. Por otra parte, también propone realizar un análisis de las condiciones promedio de las propiedades de la arena verde de moldeo, ayudado de la información registrada del control de calidad de la arena que es llevada por parte de los supervisores de producción de JCR Fundiciones desde el mes de Julio 2011.

Así, con los resultados de la situación actual de las arenas del sistema y de sus propiedades, se podrán determinar niveles más adecuados para el análisis de experimental.

#### **4.2.1 ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL DEL SISTEMA DE ARENAS DE JCR FUNDICIONES PREVIO A LA DETERMINACIÓN DE NIVELES DE PARA LOS FACTORES DE ESTUDIO**

##### **Situación actual de la arena nueva y arena de reciclaje:**

Para el análisis de la situación actual de las arenas en el sistema, se requiere de un estudio del tamaño del grano de la arena así como también sus contenidos de arcilla. Este procedimiento es realizado en un laboratorio bajo las normas de la Sociedad Americana de Fundidores, como se mencionó en el literal 2.13.1.1.

Para el análisis granulométrico y de arcillas, se tomaron del sistema de JCR Fundiciones, muestras de 1000 gr de las arenas de reciclaje y arena nueva respectivamente.

Las muestras recogidas se enviaron para el análisis requerido a los laboratorios de suelos de la Universidad Politécnica del Ejército, ESPE. Los resultados del estudio se muestran en Anexo 2a. Los resultados finales del estudio se muestran en Anexo 2b., (elaboración propia).

De esta forma, las conclusiones de la situación actual son:

- La arena de reciclaje de JCR Fundiciones tiene un tamaño de grano fino y un contenido de arcilla del 15%. Esto sugiere, un porcentaje alto de impurezas, polvos y/o partículas finas en la estructura de la arena, que deberían ser reducidos en la mayor cantidad posible para mantener una mejor calidad de la arena verde en el sistema.
- La arena nueva o blanca tiene un tamaño de grano medio y con contenido de arcilla del 1%. Lo que sugiere que, es una arena adecuada para fundiciones de hierro nodular y que además puede funcionar como diluyente de arena, esto significa que, en ciertas cantidades puede ayudar a la limpieza de la arcilla o finos presentes en la arena de reciclaje o arena negra.

- Por otro lado, se debe tener en cuenta que la arena nueva que ingresa al sistema por parte de los proveedores viene mojada.

**Situación actual promedio de las propiedades de la arena verde:**

Para el análisis promedio actual de las propiedades de la arena verde de JCR Fundiciones, se recopilaron los datos recogidos por parte de los supervisores de producción de la planta, desde Junio del 2011 hasta el mes de Noviembre 2011. De estos datos se estableció un promedio para tener una referencia de las condiciones del sistema de arenas en cuanto a sus principales propiedades permeabilidad, resistencia y humedad.

En Anexo N.3 se presentan los datos recogidos de las propiedades de la arena verde de moldeo desde Junio hasta Noviembre del 2011.

A continuación, en la Tabla N.5 se presenta un resumen del promedio de los datos recolectados del Anexo N.3:

	PERMEABILIDAD (AFS)	RESISTENCIA	% HUMEDAD
PARÁMETROS DE TRABAJO	Mayor a 80	12-14 PSI	4-6%
SITUACIÓN ACTUAL	71,17	12,81	4,61

**Tabla N.5 Resumen de la situación actual promedio de las propiedades de la arena verde en el periodo de Junio a Noviembre 2011.**

Con los resultados obtenidos se concluye que:

Actualmente, existen bajos niveles de permeabilidad, mientras que, la resistencia a la compresión en verde al igual que la humedad están en niveles relativamente aceptables.

Estos resultados demuestran una ligera limitación de las propiedades de la arena verde, y pueden ser producto de los altos niveles de polvos o finos de

arcilla presentes en la arena de reciclaje que se están registrando en el sistema.

#### **4.3 DETERMINACIÓN DE NIVELES PARA LOS FACTORES DE LA ARENA VERDE**

Una vez que se conoce la situación actual de la arena del sistema, ya se puede proponer niveles más apropiados para los factores en estudio.

Así, para la determinación de los niveles para cada factor, el departamento de producción sugiere tomar como una referencia inicial, las cantidades de los componentes con los que se trabaja actualmente en la preparación de lotes de arena verde y realizar aumentos de arena nueva. Por tanto, se considerarán composiciones entre 530Kg hasta un máximo de 550Kg, peso equivalente a un lote de producción, y peso que tolera el molino de mezclado sin trabarse

De esta forma, sugieren realizar aproximaciones con aumentos de arena nueva entre el 8% y 10%. Para compensar el aumento de arena nueva se sugiere adicionar el 15% de Bentonita y el 2% de Carbonilla del total del 8% y 10% de la arena nueva. Finalmente, propone adicionar entre el 2,5% y 3% de agua al total de la mezcla; y que se intente probar el comportamiento de la mezcla entre cuatro y cinco minutos en el molino de mezclado.

Para obtener los valores en pesos de las aproximaciones sugeridas, primero se presenta en la Tabla N.6, los valores actuales con los que se carga al molino de mezcla de arena verde y que de ellos saldrán las aproximaciones respectivas.



Factor	Valor
Arena reciclada (Kilos)	500 aprox.
Arena nueva (Kilos)	10 aprox.
Bentonita (Kilos)	6 aprox.
Carbón Marino (Kilos)	3 aprox.
Agua (Its = Kilos)	11 aprox.
Tiempo de mezcla (min)	5 aprox.
<b>Peso total del lote (Kilos)</b>	<b>530 aprox.</b>

**Tabla N.6.- Valores actuales de carga de molino para la preparación de lotes de arena verde. Datos tomados de producción de JCR Fundiciones**

Con referencia a los valores de la Tabla N.6, a continuación se presenta en la Tabla N.7 los valores respectivos a las aproximaciones sugeridas para las composiciones.

		APROXIMACIONES	
		Al 8% de arena nueva de 530 Kg	Al 10% de arena nueva
		15% de Bentonita del 8% de a. nueva	15% de Bentonita del 10% de a. nueva
		2% de Carbón del 8% de a. nueva	2% de Carbón del 10% de a. nueva
Factor	Valor	2,5% de Agua del total de la mezcla	3% de agua del total de la mezcla
Arena reciclada (Kilos)	500 aprox.	$530 - 62,9 = 467,1$	$530 - 77,91 = 452,1$
Arena nueva (Kilos)	10 aprox.	$530 * 0,08 = 42,4$	$530 * 0,1 = 53$
Bentonita (Kilos)	6 aprox.	$42,4 * 0,15 = 6,36$	$53 * 0,15 = 7,95$
Carbón Marino (Kilos)	3 aprox.	$42,4 * 0,02 = 0,848$	$53 * 0,02 = 1,06$
Agua (litros) = (Kilos)	11 aprox.	$530 * 0,025 = 13,25$	$530 * 0,03 = 15,9$
Tiempo de mezcla (min)	5 aprox.		
<b>Peso total del lote (Kilos)</b>	<b>530 aprox.</b>		

**Tabla N.7.- Aproximaciones de niveles sugeridos para composiciones**

Con los valores de la Tabla N.7, ya se tiene los niveles propuestos para el modelo de diseño de experimentos. Estos se muestran en la Tabla N.8:

Factor	Niveles	
	Bajo	Alto
Arena reciclada (Kilos)	452,1	467,1
Arena nueva (Kilos)	42,4	53
Bentonita (Kilos)	6,36	7,95
Carbón Marino (Kilos)	0,848	1,06
Agua (Litros = Kilos)	13,25	15,9
Tiempo de mezcla (min)	4	5

Tabla N.8.- Niveles propuestos para el modelo de diseño de experimentos.

#### 4.4 SELECCIÓN DE LAS VARIABLES DE RESPUESTA PARA EL ESTUDIO (PROPIEDADES DE ARENA VERDE)

El departamento de producción de JCR Fundiciones propone analizar como variables de respuesta, a las propiedades que pueden ser medidas con la ayuda de los equipos disponibles en la empresa para el control de calidad de la arena verde, estas son:

- Resistencia a la compresión en verde
- Permeabilidad
- % Humedad

De esta forma, se están contemplando tres variables de respuesta que se obtendrán del diseño experimental realizado con los distintos factores y sus distintos niveles.

Al final, se intentará optimizar en lo posible a cada una de estas propiedades o variables de respuesta y se podrá obtener una composición alternativa para la arena verde.

#### 4.5 ELECCIÓN DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

El procedimiento que se propone realizar para estudiar una composición alternativa para la arena verde es en una prueba experimental conocida como: Diseño factorial fraccionado un octavo  $2^k$  explicado en el capítulo I,

##### **Justificación para la utilización de este modelo:**

- Como se explicó en literal 2.2, el uso de diseños factoriales facilita analizar el impacto de los factores sobre una o varias variables de respuesta. Por tanto, en la composición de la arena verde pueden ayudar a identificar que componentes o factores son realmente representativos sobre cada una de las propiedades de la arena verde que son de interés.

- En el literal 2.3.3 se mencionó que, los diseños factoriales fraccionados permiten optimizar el uso de los recursos con los que se va a trabajar.

En este caso, para analizar una composición alternativa para la arena verde es necesario economizar recursos de experimentación, ya que cada tratamiento de prueba necesitaría aproximadamente de la intervención de 530 kilos de mezcla que equivale a un lote de producción y que además se adicionarán mayor cantidad de componentes nuevos que un lote común.

De esta forma si se realizará un modelo completo, un medio o un cuarto de fracción del mismo se tendría un número de tratamientos relativamente grande "64", "32", y "16" tratamientos respectivamente". Mientras que, en un octavo de modelo solo serán necesarios realizar "8 tratamientos" que optimizarán significativamente los recursos de experimentación y medición de resultados.

- Realizar una octava parte del modelo completo, permitirá también evitar que se produzcan variaciones de impacto sobre la producción, ya que, los tratamientos o mezclas a experimentar las recibirán el grupo de moldeadores en cada una de las estaciones de trabajo de JCR Fundiciones.
- Con excepción de la arena de reciclaje, no se cuenta con un dosificador de precisión para el resto de los componentes que ingresan al molino de mezclado. Esto implica que, para cada una de los tratamientos a realizar, se tendrán que medir en una balanza electrónica, las cantidades de arena nueva, bentonita, carbonilla y agua. Dados los pesos de cada una de estas cantidades también justifica el uso de un octavo del modelo completo, ya que se tendrían que hacer innumerables mediciones y poco ergonómicas si se realizara el modelo completo.

**Desventaja del diseño factorial fraccionado a usar:**

- Al realizar solo una fracción de un modelo factorial completo se presenta la problemática de pérdida de información, ya que solo se llevan a cabo un número determinado de tratamientos de factores y niveles, lo que desemboca en pérdida de efectos, es decir, pérdida de impactos de las interacciones de factores. Por tanto, la realización de modelos fraccionados son considerados como estudios exploratorios o estudios tentativos, y aunque no presenten toda la información completa acerca de un problema de estudio, son totalmente válidos para obtener conclusiones previas y realizar optimizaciones, e inclusive sirven de base para estudios que se realicen en el futuro para el mismo proceso (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007).

#### 4.5.1 ESTRUCTURA DEL DISEÑO FACTORIAL FRACCIONADO UN OCTAVO: $2_{III}^{6-3}$

El modelo completo para este diseño factorial de seis factores y dos niveles, es:

$$2^k = 2^6 = 64 \text{ combinaciones de tratamientos posibles}$$

Sin embargo, al realizar un diseño experimental corriendo un octavo de fracción del mismo, se tiene:

$$2^{k-p} = 2^{6-3} = 8 \text{ combinaciones de tratamientos posibles}$$

Un octavo del modelo completo resulta de ocho corridas o tratamientos a realizarse.

El modelo a realizar es por tanto de resolución III, como se mencionó en el literal 2.3.5, donde sus efectos principales se confundirán con algunas interacciones de segundo orden pero no con otros efectos principales. Por tanto es un modelo  $2_{III}^{6-3}$

#### **Notación de factores en el modelo experimental $2_{III}^{6-3}$ :**

A: Cantidad de arena de reciclaje

B: Cantidad de arena nueva

C: Cantidad de bentonita

D: Cantidad de carbonilla

E: Cantidad de agua

F: Tiempo de mezcla

Para los niveles de cada factor se denotaran con un signo menos (-) para el nivel bajo y un signo positivo (+) para el nivel alto.

**Diseño factorial  $2_{III}^{6-3}$  en Minitab 16®:**

Contemplados ya, todos los factores y niveles en el diseño experimental. Se utilizó el programa Minitab 16® para la generación y estructuración del diseño.

Para ello, se tomó en cuenta el octavo de fracción del modelo completo, un solo bloque de estudio, y sin puntos centrales.

La estructura completa del diseño generado por el programa Minitab 16 ® se presenta en Anexo N. 4.

**Generadores del diseño  $2_{III}^{6-3}$  propuestos por Minitab 16®:**

$$D = AB \quad E = AC \quad F = BC$$

**Relación de definición del modelo  $2_{III}^{6-3}$  generado por Minitab 16®:**

$$I = ABD = ACE = BCF = BCDE = ACDF = ABEF = DEF$$

**Estructura de alias del modelo  $2_{III}^{6-3}$  generado por Minitab 16®:**

$$A = \underline{BD = CE = BEF = CDF = ABCF = ADEF = ABCDE}$$

$$B = \underline{AD = CF = AEF = CDE = ABCE = BDEF = ABCDF}$$

$$C = \underline{AE = BF = ADF = BDE = ABCD = CDEF = ABCEF}$$

$$D = \underline{AB = EF = ACF = BCE = ACDE = BCDF = ABDEF}$$

$$E = \underline{AC = DF = ABF = BCD = ABDE = BCEF = ACDEF}$$

$$F = \underline{BC = DE = ABE = ACD = ABDF = ACEF = BCDEF}$$

Los efectos principales son los factores:  $A, B, C, D, E$ , y  $F$ .

Así, el diseño cuenta con siete grados de libertad y pueden usarse para estimar los efectos principales. Cada uno de estos efectos tienen siete alias como se demuestra en la estructura de los alias generados por Minitab 16®. En este contexto se supondrá que, las interacciones de tres o más factores son insignificantes para simplificar la estructura de los alias. De esta forma, las combinaciones lineales asociadas a los seis efectos principales de este diseño serán: una estimación del efecto principal y dos interacciones de dos factores como se muestran a continuación.

$$l_A = A + BD + CE$$

$$l_B = B + AD + CF$$

$$l_C = C + AE + BF$$

$$l_D = D + AB + EF$$

$$l_E = E + AC + DF$$

$$l_F = F + BC + DE$$

#### **Hoja de trabajo de tratamientos a realizar generados por Minitab 16®**

En la Tabla N.9, se presenta la hoja de trabajo propuesta por Minitab 16® con las ocho tratamientos a realizarse, ordenados de manera aleatoria.

Orden Estándar	OrdenCorrida aleatorizada	Cantidad Arena de Reciclaje	Cantidad Arena Nueva	Cantidad de Bentonita	Cantidad de Carbonilla	Cantidad de Agua	Tiempo de mezcla
6	1	467,1	42,4	7,95	0,848	15,9	4
5	2	452,1	42,4	7,95	1,06	13,25	4
7	3	452,1	53	7,95	0,848	13,25	5
3	4	452,1	53	6,36	0,848	15,9	4
1	5	452,1	42,4	6,36	1,06	15,9	5
4	6	467,1	53	6,36	1,06	13,25	4
8	7	467,1	53	7,95	1,06	15,9	5
2	8	467,1	42,4	6,36	0,848	13,25	5

**Tabla N.9.- Hoja de trabajo propuesta por Minitab 16 ® para la realización de los ocho tratamientos de composiciones de arena verde.**

#### **4.6 TRATAMIENTOS DE ARENA VERDE A REALIZAR**

Para la realización de los ocho tratamientos sugeridos por Minitab 16 ®, primero se presentan los pasos a seguir para realizar los mismos, seguidamente, se muestran los equipos de medición usados para la obtención de resultados de cada variable de respuesta, y finalmente se presenta la forma en la que se recogieron los datos para tener valores representativos de cada muestra analizada.

#### **4.7. PASOS Y CONSIDERACIONES PARA REALIZAR LAS OCHO MEZCLAS DE ARENA VERDE MOLDEO**

- Se pesaron en recipientes individuales a cada uno de los componentes añadidos a cada mezcla: Cantidad de arena nueva, cantidad de bentonita, cantidad de carbonilla, y cantidad de agua.

Cada uno de estos componentes se pesó individualmente en balanza electrónica de precisión. Cuando se pesó cada componente, se procuró limpiar la balanza para evitar cualquier error en la medición.



La arena de reciclaje no fue necesario pesar ya que el recipiente que lleva la misma hacia el molino se le agregaron marcas de llenado específico con pesos predeterminados para los ocho tratamientos.

- Primero se colocan en el molino de mezclado las arenas de reciclaje zarandeada y la arena nueva, seguidamente se enciende el molino, se añade la bentonita y la carbonilla juntas y finalmente se agrega agua a la mezcla.
- El tiempo de mezclado se toma una vez que se añadió el agua a la mezcla ya ingresada en el molino.
- De la preparación de arena verde resultante, se tomaron muestras de arena por cuarteo, es decir, cantidades aleatorias del molino una vez terminada la mezcla. Se tomaron aproximadamente entre 10 y 20 kilos por cada lote de arena experimentada para la realización de las distintas pruebas de laboratorio.
- Se realizaron varias mediciones de las variables de respuesta en los equipos laboratorio. Es decir, se realizaron repeticiones dentro de cada tratamiento, y se ha tomado al promedio de las repeticiones como la variable de respuesta final. Este procedimiento del promedio se realizó para que el modelo explique el error del experimentador y de los equipos de medición. En el caso de mediciones repetidas o duplicadas (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007) sugiere el uso del promedio como variable de respuesta lógica.

#### **4.7.1 EQUIPOS PARA MEDICIÓN EXPERIMENTAL DE LAS VARIABLES DE RESPUESTA**

En esta sección se presenta una breve descripción y el uso de los equipos que se utilizarán para la evaluación de las propiedades que intervienen en la mezcla de la arena verde. Con estos equipos se obtendrán las mediciones respectivas para las de variables de respuesta de los distintos tratamientos a realizar.

Las formas de uso de cada uno de los equipos están tomadas del manual de uso de equipo de la (Fundidores, 2010).

#### **4.7.1 EQUIPOS PARA LA MEDICIÓN EXPERIMENTAL DE PROPIEDADES DE LA ARENA VERDE**

##### **4.7.1.1 EQUIPO DE MEDICIÓN DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN VERDE DE LA ARENA**

Para la medición de la resistencia se hará uso de la Máquina universal de fuerza de Arena N# 400



Figura N.18 Máquina universal de fuerza de Arena N# 400. Fotografía propia, permitida por JCR Fundiciones

Este equipo es parte de los equipos de laboratorio de JCR Fundiciones, usado para la medición de resistencia a la compresión en verde de la arena.

Para el uso de este equipo es necesaria la creación de una muestra o probeta experimental de arena verde de moldeo que es obtenida mediante el uso de los siguientes equipos de laboratorio:

Cernidor, Apisonador, tubos para probetas, determinador de compactibilidad.

#### 4.7.1.1 EQUIPO PARA LA GENERACIÓN DE PROBETAS DE ARENA VERDE DE MOLDEO

A continuación, se presenta en la Figura N.19 el equipo de laboratorio que se utilizará para la generación de probetas de arena verde de moldeo. Éstas servirán para el análisis de resistencia en el aparato Máquina universal de fuerza de Arena N# 400, y también para el análisis de permeabilidad que se hablará en el literal 4.7.1.2.



Figura. N.19. Equipo para generación de muestras o probetas de arena verde de moldeo. Fotografía propia permitida por JCR Fundiciones

**Cernidor.-** Es un dispositivo que permite realizar el tamizado de arena verde de moldeo recién preparada.

El objetivo del cernidor será la de permitir el paso de arena sin grumos o formaciones granosas en exceso que pueden venir en la arena recientemente preparada.

**Tubo para probeta.-** Es el dispositivo que recibirá la muestra de arena recién zarandeada proveniente del cernidor.

El objetivo del tubo para probeta es la de servir de modelo para la creación de muestras o probetas de arena verde de moldeo.

**Determinador de compactibilidad.-** Es el dispositivo que da la forma final a la probeta o muestra de arena verde de moldeo. Esto se consigue mediante la utilización de su apisonador. El apisonador a ser manipulado por el experimentador ayudará a compactar la arena zarandeada dentro del tubo probeta.

Una vez que se ha compactado la probeta o muestra de arena verde de moldeo dentro del tubo probeta, se procede a retirar la muestra con la ayuda del pistón del tubo probeta. Se debe tener en cuenta que se deben obtener probetas de no más de 5,5 cm de largo para reducir errores de medición en todas las muestras.

La probeta que se obtendrá será similar al presentado en la Figura N.20. La probeta deberá medir 5 cm  $\pm$  0,1cm de longitud: Valores especificados por el fabricante y para confiabilidad de los resultados.



**Figura N. 20** Probeta de arena verde. Fotografía propia

#### **4.7.1.1.2 PASOS PARA LA MEDICIÓN DE RESISTENCIA DE LA ARENA VERDE**

- Obtener una probeta o muestra de arena verde de moldeo
- Tomar la probeta e insertarla en brazo de apoyo de la Máquina universal de fuerza de Arena N# 400.
- Ajustar el marcador para medir resistencia a la compresión en verde de la probeta
- Encender el Máquina universal de fuerza de Arena N# 400 en velocidad media
- Esperar el desmoronamiento de la probeta de muestra
- Registrar el valor de resistencia marcado por el Máquina universal de fuerza de Arena N# 400. Las resistencias están dadas en libras por pulgada cuadrada o psi por sus siglas en inglés.

#### **4.7.1.2 EQUIPO DE MEDICIÓN DE PERMEABILIDAD DE ARENA VERDE**

Para la medición de humedad se hará uso del equipo Permeámetro Eléctrico #338B como se muestra en la Figura N.21



**Figura N.21. Equipo Permeámetro Eléctrico #338B. Fotografía propia permitida por JCR Fundiciones**

Este equipo es parte de los equipos de laboratorio de JCR Fundiciones, usado para la medición de la permeabilidad de la arena verde de moldeo.

Este equipo emplea el método de caída de presión por orificios. Estos orificios son sensibles, ya que tienen 127mm de diámetro y mide en unidades de permeabilidad de AFS. El medidor dispone de 3 colores de escalas, uno para valores superiores a 50 de permeabilidad, uno para valores menores a 50 de permeabilidad y un tercero para medir la presión.

Presenta un sello hermético para cerrar a una probeta de muestras de arena verde de moldeo. Este sello permite mantener una presión constante de 10 cm de agua y esta se mantiene por un ventilador de alta velocidad.

#### **4.7.1.2.1 PASOS PARA LA MEDICIÓN DE PERMEABILIDAD DE ARENA VERDE MOLDEO**

- Obtener una probeta o muestra de arena verde de moldeo como lo explicado en el literal 4.7.2.1.1.1. Pero en este caso la probeta no es sacada del tubo para probetas.
- Se coloca el orificio de permeabilidad que se desea registrar. Puede ser orificio grande u orificio pequeño. Para el caso de estudio, el departamento de producción sugirió trabajar con el orificio pequeño.
- Se coloca al tubo de probetas en la base del medidor de permeabilidad
- Se ajusta el sello hermético
- Se baja palanca de liberación de presión y se espera hasta que la medición otorgada por el dispositivo sea constante
- Registrar el valor de permeabilidad registrado de la probeta en unidades AFS

#### **4.7.1.3 EQUIPO DE MEDICIÓN DE PORCENTAJE DE HUMEDAD DE LA ARENA VERDE**

Para la medición de humedad se hará uso del equipo Descriptor de humedad #276 como se muestra en la Figura N.22



**Figura N.22. Descriptor de humedad #276. Fotografía propia permitida por JCR Fundiciones**

Este equipo es parte de los equipos de laboratorio de JCR Fundiciones, usado para la medición de humedad de la arena verde de moldeo.

El dispositivo cuenta con un ventilador que impulsa aire caliente sobre la muestra de arena verde de moldeo permitiendo una rápida acción de secado. Se pueden secar 50 gr de arena en 10 min (Foundry, 2011).

El Descriptor de humedad #276 solo permite el secado de la muestra de la arena. Por tanto, para la medición del porcentaje de humedad se hará uso de la balanza electrónica para verificar el peso perdido de la muestra, ver Figura N.23



**Figura N.23: Equipo balanza electrónica: Fotografía propia permitida por JCR Fundiciones**



#### **4.7.1.3.1 PASOS PARA LA MEDICIÓN DEL % DE HUMEDAD DE ARENA VERDE**

Para la medición del porcentaje de humedad de cada muestra se seguirán los siguientes pasos:

- Pesar en la balanza electrónica una muestra de 50 gr de arena verde de moldeo. Este valor será el Peso Inicial "Pi".
- Colocar la muestra de 50 gr en el plato de tratamiento del Descriptor de humedad #276
- Colocar plato de tratamiento en el Descriptor de humedad #276
- Encender temporizador del Descriptor de humedad #276 para 10 min de operación (secado de muestra)
- Retirar plato de tratamiento del Descriptor de humedad #276
- Registrar nuevo valor de peso de la muestra en la balanza electrónica. Este será el Peso Final "Pf"

#### **4.7.1.3.2 FÓRMULA PARA EL CÁLCULO DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD**

Obtenidos los valores de los pesos iniciales y finales de la muestra, la forma de cálculo para el porcentaje de humedad es:

$$\% \text{ de humedad} = \frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso final}}{\text{Peso inicial}} * 100\% = \frac{Pi - Pf}{Pi} * 100\% \quad (16)$$

#### 4.7.2 RECOLECCIÓN DE DATOS

Para obtener resultados representativos y confiables de las propiedades de los distintos tratamientos de arena verde, se sugiere por el manual de ensayos de moldeo de la Sociedad Americana de fundidores, 2010 que, en el caso de las mediciones de permeabilidad, resistencia a la compresión en verde en los que se necesita obtener una probeta de arena verde de moldeo para sus análisis, se tomen por lo menos seis muestras y se obtenga el promedio de las mismas, para tener un valor representativo de una muestra de arena, y así disminuir la incidencia de errores por parte del experimentador y dada la confiabilidad de los equipos con los que se trabaja.

En el caso de la medición de porcentaje de humedad, en el que no se requiere la utilización de probetas, se tomarán igualmente seis subgrupos de una muestra, para de ella obtener un valor promedio el cual sea un valor representativo para la variable de respuesta.

Como se explicó en el literal 4.7.1, tomar al promedio como la variable de respuesta final para cada propiedad, se justifica si se tiene la oportunidad de realizar varias mediciones o repeticiones dentro de un mismo tratamiento que tiene las mismas condiciones. Al realizar mediciones repetidas para la variable de respuesta, según (Montgomery, Diseño y Análisis de Experimentos, 2007), el promedio es la forma lógica de que se debería utilizar como variable de respuesta, ya que, también ayuda a explicar el error generado por el experimentador y por los equipos con el que se realizaron las mediciones.

## **5. CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL DESARROLLO EXPERIMENTAL**

En este capítulo, se presentan los análisis de los datos obtenidos de los ocho tratamientos o pruebas para la arena verde. Los ocho tratamientos fueron presentados en la tabla N. 9 y se los realizaron considerando todos los parámetros de trabajo detallados a lo largo del literal 4.7, con la finalidad de conseguir resultados confiables y que aseguren la menor incidencia de error por parte del experimentador y de los equipos de medición utilizados.

Los análisis de los resultados buscan de manera previa observar que factores influyen sobre las propiedades de la arena verde ó variables de respuesta. Para ello, se realizó el análisis de la varianza respectivo para cada variable de respuesta y se obtuvieron modelos representativos para predecir el comportamiento de las mismas. Con estos modelos de predicción para las variables de respuesta, se los optimizó simultáneamente con parámetros de trabajo deseados y se obtuvo como resultado una combinación apropiada de los distintos componentes que son usados para la elaboración de la mezcla arena verde de JCR Fundiciones.

## 5.1 RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES DE LA ARENA VERDE CORRIDOS LOS OCHO TRATAMIENTOS DEL DISEÑO EXPERIMENTAL

En las Tablas N.10-12, se presentan los resultados obtenidos de cada tratamiento realizado para medir las propiedades de la arena verde: permeabilidad, resistencia y porcentaje de humedad.

Nótese que, para cada variable de respuesta se tomaron seis mediciones o repeticiones dentro de cada tratamiento realizado y el resultado de la variable de respuesta será el promedio, esto se lo justificó en el literal 4.7.3.

TRATAMIENTO N.	PERMEABILIDAD (AFS)						PROMEDIO
	1	2	3	4	5	6	
1	135	136	136,4	136,9	135,8	135,9	136,0
2	129,7	132,5	130,6	131,6	130,6	132,8	131,3
3	157,5	158,6	157,9	160	157,7	158,1	158,3
4	175,2	173	175,7	176,3	175,7	175	175,2
5	155	158	159	156,4	159,5	159,5	157,9
6	125,5	125	125	126	126,5	125,4	125,6
7	148,5	149	148	147,9	149	149,5	148,7
8	117,5	118	117,5	116,5	118	117,5	117,5

Tabla N.10 Resultados de Permeabilidad obtenidos en cada uno de los ocho tratamientos realizados

TRATAMIENTO N.	RESULTADOS: RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN VERDE (Psi)						PROMEDIO
	1	2	3	4	5	6	
1	15,5	16,1	14,9	15,2	15,6	14,8	15,4
2	14,3	15,8	16,01	16,1	14,7	14,2	15,2
3	15,7	15,8	16,8	15	16,2	14,9	15,7
4	14,4	15	13,5	15	14,8	15,4	14,7
5	14,4	15	14,8	15,7	15,8	15,1	15,1
6	14,8	14,1	14,7	15,6	14,7	14,85	14,8
7	15,9	14,8	16,8	16,5	14,7	15,4	15,7
8	14,8	14,8	15,3	14,8	16,3	15,7	15,3

Tabla N.11 Resultados de Resistencia a la compresión en verde, obtenidos en cada uno de los ocho tratamientos realizados

TRATAMIENTO N.	RESULTADOS: PORCENTAJE DE HUMEDAD						PROMEDIO
	1	2	3	4	5	6	
1	5,3	5,02	5,24	5,48	5,5	5,34	5,31
2	5,48	5,16	4,9	4,96	4,82	4,54	4,98
3	5,2	5,16	5,14	5,2	5,23	5,19	5,19
4	6	6,3	5,95	6,3	6,2	5,8	6,09
5	5,83	5,73	5,82	5,53	5,77	5,79	5,75
6	4,7	5,02	4,82	4,81	4,83	4,94	4,85
7	5,48	5,4	5,53	5,49	5,39	5,56	5,48
8	4,45	4,6	4,51	4,47	4,43	4,46	4,49

Tabla N.12 Resultados de Porcentaje de humedad obtenidos en cada uno de los ocho tratamientos realizados

A continuación, en la Tabla N.13 se presentan en consolidado los promedios de cada variable de respuesta mostrados en las tablas N.10-12. Estos promedios serán utilizados como datos de variables de respuesta.

N.	TRATAMIENTOS						VARIABLES DE RESPUESTA		
	Cantidad de Arena Reciclaje (Kg)	Cantidad de Arena Nueva (Kg)	Cantidad de Bentonita (Kg)	Cantidad de Carbonilla (Kg)	Cantidad de Agua (Kg)	Tiempo de mezcla (min)	PERMEABILIDAD (AFS)	RESISTENCIA (psi)	% HUMEDAD
1	467	42,4	7,95	0,848	15,9	4	136	15,4	5,31
2	452	42,4	7,95	1,06	13,25	4	131,3	15,2	4,98
3	452	53	7,95	0,848	13,25	5	158,3	15,7	5,19
4	452	53	6,36	0,848	15,9	4	175,2	14,7	6,09
5	452	42,4	6,36	1,06	15,9	5	157,9	15,1	5,75
6	467	53	6,36	1,06	13,25	4	125,6	14,8	4,85
7	467	53	7,95	1,06	14,29	5	148,7	15,7	5,48
8	467	42,5	6,36	0,972	14,29	5	117,5	15,3	4,49

Tabla N.13.- Resultados promedio de los ocho tratamientos de arena verde realizados.

## 5.2. ANÁLISIS DE LA VARIANZA PARA LA VARIABLE DE RESPUESTA PERMEABILIDAD

Como se mencionó en el literal 4.6.1, por el momento el modelo experimental solo puede analizar los efectos principales de los factores pero no de sus

interacciones, ya que solo se cuenta con siete grados de libertad para los ocho tratamientos realizados. Por lo tanto, los resultados del estudio serán tentativos y no ofrecerán información completa de otros efectos. Sin embargo, su análisis es válido para generar conclusiones y optimizaciones previas que serán de información útil para estudios posteriores que se deseen realizar con la composición de la arena verde.

Conocidos los antecedentes, de manera inicial se corre en Minitab 16 ® el modelo experimental, contemplando todos los factores predeterminados por el software, en este caso los factores principales.

En la Tabla N.14 se presenta el análisis de la varianza resultante para la variable Permeabilidad bajo estas condiciones.

<b>ANÁLISIS DE LA VARIANZA PARA LA PERMEABILIDAD</b>					
<b>Fuente</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrado Medio</b>	<b>F</b>	<b>p</b>
Cantidad de arena de reciclaje	1	1126,15	1126,15	353,27	0,034
Cantidad de arena nueva	1	527,85	527,85	165,59	0,049
Cantidad de Bentonita	1	0,48	0,48	0,15	0,765
Cantidad de carbonilla	1	68,74	68,74	21,56	0,135
Cantidad de agua	1	904,9	904,9	283,86	0,038
Tiempo de mezcla	1	25,15	25,15	7,89	0,218
Error residual	1	3,19	3,19		
Total	7	2656,44			

R cuadrado	99,88%
R cuadrado predicción	72,32%
R cuadrado ajustado	99,16%

**Tabla N.14.- Análisis de la varianza para la permeabilidad de la arena verde. (Elaboración propia).**

Los resultados previos indican que, los factores: cantidad de arena de reciclaje, arena nueva y agua son estadísticamente significativos en el nivel de  $\alpha = 0,05$  ya que, sus valores p son menores que  $\alpha$  y presentan valores altos de prueba F respectivamente. Sin embargo, se debe realizar una estandarización del modelo para mejorar las condiciones de R cuadrado de predicción.

De manera pareja también se analizan los resultados gráficos correspondientes a este estudio antes de realizar un modelo estándar final y tener las conclusiones acerca de la permeabilidad en la composición de la arena verde.

### 5.2.1 ANÁLISIS GRÁFICO DE LOS EFECTOS PRINCIPALES PARA LA PERMEABILIDAD DE LA ARENA VERDE

Se presenta en la Figura N.24, la representación de los efectos principales sobre la variable de respuesta permeabilidad.

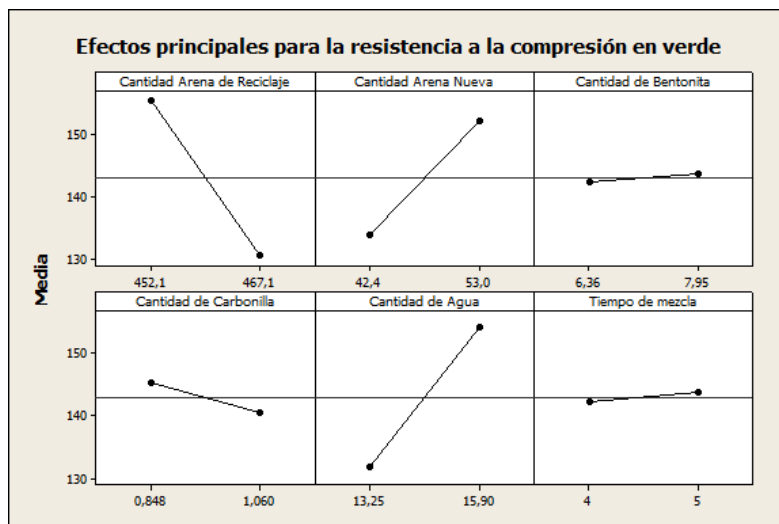


Figura N.24.- Gráfica de efectos principales para la permeabilidad una vez corridos los ocho tratamientos experimentales. (Elaboración propia).

De la Figura N.24, las pendientes pronunciadas de los factores cantidad de arena de reciclaje, agua y arena nueva, demuestran efectos significativos importantes sobre la permeabilidad. En el caso del factor arena de reciclaje cuando aumenta a su nivel alto de 467 Kg, la permeabilidad tiende a disminuir considerablemente. Caso

contrario sucede con los factores cantidad de arena nueva y cantidad de agua ya que, a un nivel alto de sus factores determinan valores más altos de permeabilidad.

Por tanto, los tres factores anteriores se muestran como significativos en la forma gráfica y confirman los resultados del análisis de la varianza detallado en la tabla N. 14.

Por otro lado se aprecia que, un nivel alto del factor cantidad de carbonilla tiende a disminuir la permeabilidad pero al parecer este factor no tiene un efecto significativo como los anteriores factores antes mencionados.

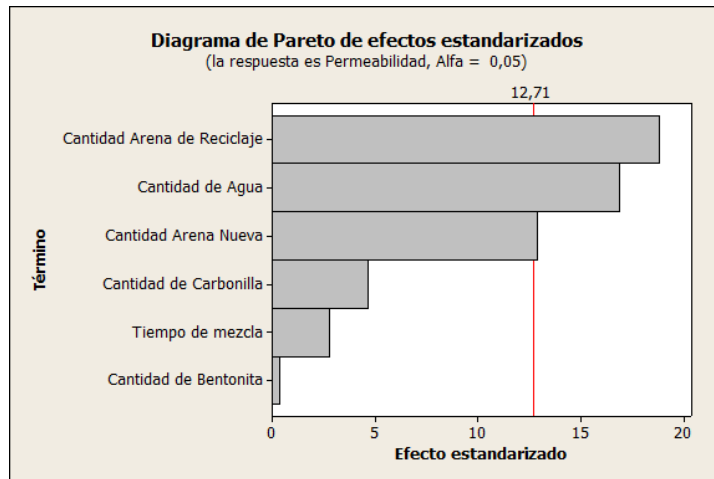
También se aprecia que, los factores cantidad de bentonita y tiempo de mezcla, no son significativos sobre la permeabilidad ya que se ajustan a la línea del eje x y no presentan un pronunciamiento de pendiente como el de los factores significativos.

Por tanto se concluye que, los factores cantidad de arena de reciclaje, cantidad de arena nueva, cantidad de agua, son significativos sobre la permeabilidad, en la forma gráfica de efectos principales y corroboran lo obtenido en el análisis de la varianza de la tabla N. 14.

### **5.2.2 ANÁLISIS GRÁFICO DE PARETO PARA LOS EFECTOS PRINCIPALES PARA LA PERMEABILIDAD DE LA ARENA VERDE**

A continuación se presenta en la Figura N.25 la representación gráfica de Pareto para los efectos principales sobre la variable de respuesta permeabilidad.



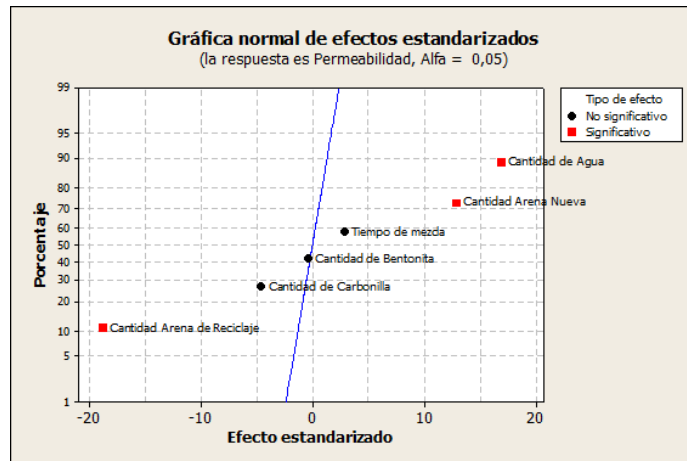


**Figura N.25.- Diagrama de Pareto para los efectos principales sobre la variable permeabilidad una vez corridos los ocho tratamientos experimentales. (Elaboración propia).**

De la Figura N.25 y trabajando con un nivel de alfa = 0,05, el diagrama de Pareto sugiere que son significativos, los factores: cantidad de arena de reciclaje, cantidad de agua y cantidad de arena nueva, y sugieren tener incidencia sobre la permeabilidad de la arena verde ya que son las barras que se hallan dentro de la línea crítica de significancia. Esto se comprueba con lo revisando en la gráfica de efectos principales y análisis de la varianza de la tabla N.14.

### **5.2.3 ANÁLISIS GRÁFICO DE NORMALIDAD PARA LOS EFECTOS PRINCIPALES SOBRE LA PERMEABILIDAD DE LA ARENA VERDE**

Se presenta en la Figura N.26 la representación gráfica normal para los efectos principales sobre la variable de respuesta permeabilidad.



**Figura N.26.- Gráfica normal para los efectos principales sobre la permeabilidad una vez corridos los ocho tratamientos experimentales (elaboración propia).**

La Figura N.26 sugiere como factores significativos sobre la permeabilidad a: la cantidad de arena de reciclaje, cantidad de agua y cantidad de arena nueva, ya que se hallan pronunciadamente alejados de la línea de tendencia normal.

Por tanto, una vez analizados los métodos gráficos de efectos principales, gráfico de Pareto, y de normalidad de los efectos, se confirman los resultados del análisis de la varianza de la tabla N.14.

De esta forma, con estos resultados, se vuelve a correr el modelo experimental en Minitab 16 ®, pero esta ocasión solo con los factores significativos sobre la permeabilidad.

#### **5.2.4 ANÁLISIS DE LA VARIANZA PARA LA PERMEABILIDAD CON LOS FACTORES SIGNIFICATIVOS**

Una vez conocidos los factores que tienen significancia sobre la variable permeabilidad, se los corrieron nuevamente en Minitab 16®, considerando  $\alpha=0,05$ . A continuación se muestra en la Tabla N. 15 el análisis de la varianza y de los efectos respectivos una vez modificado el modelo experimental.

<b>ANÁLISIS DE LA VARIANZA ESTANDARIZADO PARA LA PERMEABILIDAD</b>					
<b>Fuente</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrado Medio</b>	<b>F</b>	<b>p</b>
Cantidad de arena de reciclaje	1	1126,15	1126,15	46,18	0,002
Cantidad de arena nueva	1	527,85	527,85	21,65	0,01
Cantidad de agua	1	904,9	904,9	37,11	0,004
Error residual	4	97,55	24,39		
Total	7	2987,4			

R cuadrado	96,33%
R cuadrado predicción	85,31%
R cuadrado ajustado	93,57%

<b>Coefficientes estimados</b>	
Constante	578,42
Cantidad de arena de reciclaje	-1,33987
Cantidad de arena nueva	1,53263
Cantidad de agua	8,02673

**Tabla N.15.- Análisis de la varianza estandarizado para la permeabilidad de la arena verde (Elaboración propia).**

Del análisis presentado en la Tabla N.15 se observa que, los factores: cantidad de arena de reciclaje, nueva, carbonilla y agua son significativos en un nivel  $\alpha=0,05$ . Siendo el factor cantidad de arena de reciclaje el de mayor incidencia sobre la permeabilidad.

Así con un modelo estandarizado se obtuvieron los valores de R cuadrado= 96,33%, R cuadrado predicción=85,31%, y el R cuadrado ajustado=93,57% que sugieren un ajuste adecuado y asegurará mayor eficiencia para predecir de nuevos datos de permeabilidad.

Una vez realizado el análisis de la varianza estandarizado, se presenta a continuación los resultados gráficos para confirmar la adecuación del modelo para la permeabilidad de la arena verde.

### 5.2.5 ANÁLISIS DE RESIDUALES PARA EL MODELO ESTANDARIZADO PARA LA PERMEABILIDAD DE LA ARENA VERDE

A continuación se presenta en la Figura N.27. El análisis gráfico con respecto a los residuales para la verificación de la adecuación del modelo experimental.

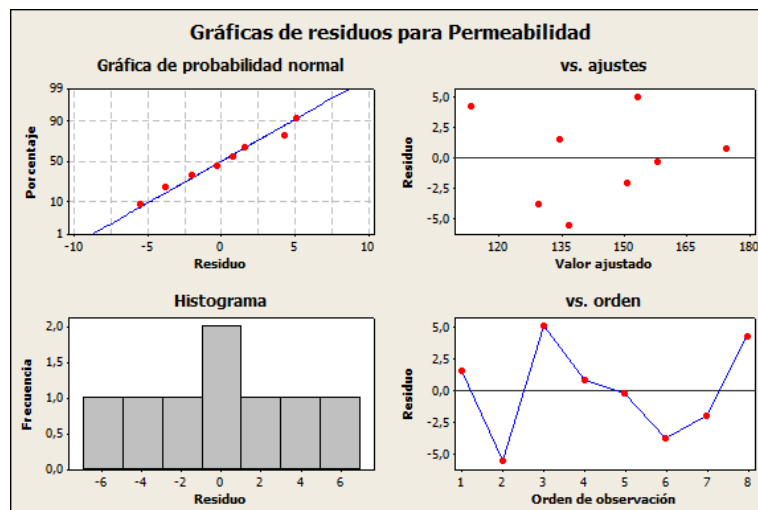


Figura N.27.- Gráfica de residuales para los datos de la permeabilidad. (Elaboración propia)

La Figura N.27 sugiere problemas con la adecuación del modelo ya que se observan problemas especialmente en la gráfica de residuos vs. Orden de observación, se indican tendencias a partir del tercer residual lo que puede hablar de problemas con la independencia de los datos en el orden de las observaciones realizadas. Por tanto se sugiere realizar una transformación de residuales para mejorar la adecuación del modelo, esto es válido con lo mencionado en el literal 2,5.

Para este caso, se realizó un ajuste de raíz cuadrada recíproca para la variable de respuesta ya que fue el ajuste que mejor estabilizó la varianza. El resultado se presenta en la figura N.28

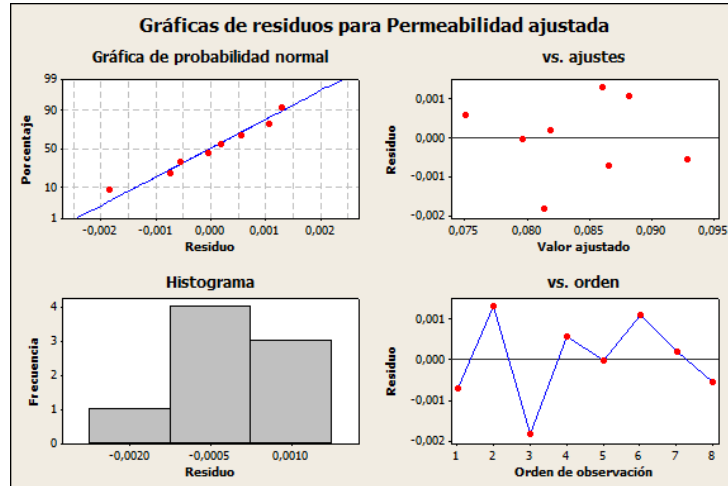


Figura N.28.- Gráfica de residuales ajustados para los datos de la permeabilidad. (Elaboración propia)

La figura N.28 muestra que, el ajuste estabilizó la independencia de los datos en la gráfica de residuos vs. Orden de observación. También se observa que, los residuales siguen una distribución normal por ajustarse a la línea de tendencia normal. Esto se lo confirma con una prueba de normalidad de Kolmogorov – Smirnov, y se la presenta en la figura N.29.

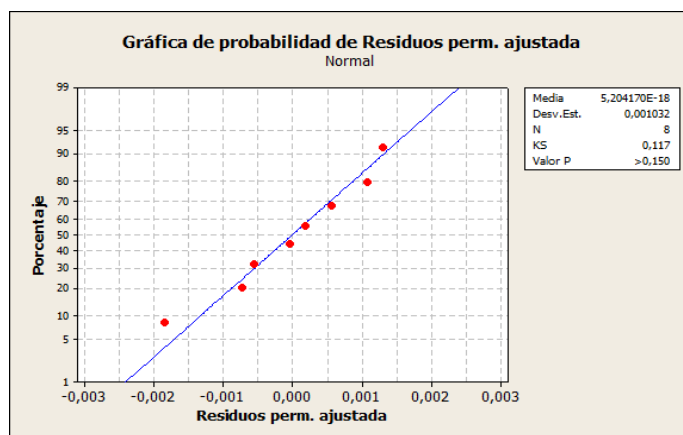


Figura N.29.- Gráfica de probabilidad normal para residuales de la permeabilidad. (Elaboración propia)

Ho: Los datos siguen una distribución normal

H1: Los datos no siguen una distribución normal

La figura N.29 muestra un valor de  $p > 0,15$  lo que indica que, no hay evidencia estadística suficiente para rechazar la hipótesis nula de que los datos siguen una distribución normal. Por tanto, se puede confiar en los resultados a pesar de ver un punto atípico en la cola izquierda de la figura N.29.

Continuando con la revisión de la figura N.28, en la gráfica de Residuos vs. Valores ajustados no se observa una tendencia anormal que hable de una mala adecuación del modelo ya que los residuales se hallan distribuidos aleatoriamente alrededor de cero.

La gráfica del histograma de residuales por su parte, muestra relativamente una forma de campana que habla la normalidad de los datos.

Por tanto, el ajuste de la variable permeabilidad generó un modelo confiable, y antes de proceder al análisis gráfico de los efectos estandarizados para confirmar los resultados del análisis de la varianza sobre la permeabilidad. Se presenta en la tabla N.16 el análisis de la varianza para la permeabilidad ajustada a la raíz cuadrada recíproca que representará el modelo final para la permeabilidad.

<b>ANÁLISIS DE LA VARIANZA ESTANDARIZADO PARA LA PERMEABILIDAD AJUSTADO</b>					
<b>Fuente</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrado Medio</b>	<b>F</b>	<b>p</b>
Cantidad de arena de reciclaje	1	0,00009368	0,00009368	50,23	0,002
Cantidad de arena nueva	1	0,00004326	0,00004326	21,65	0,009
Cantidad de agua	1	0,00008046	0,00008046	37,11	0,003
Error residual	4	0,00000746	0,00000746		
Total	7	0,00022485			

R cuadrado	96,68%
R cuadrado predicción	86,73%
R cuadrado ajustado	94,19%

<b>Coefficientes estimados</b>	
Constante	-0,0465
Cantidad de arena de reciclaje	0,000386441
Cantidad de arena nueva	-0,000438
Cantidad de agua	-0,00239347

Tabla N.16.- Análisis de la varianza estandarizado ajustado para la permeabilidad de la arena verde

Nótese que, los coeficientes estimados son valores pequeños, sin embargo éstos serán compensados por las magnitudes de cada variable y el modelo transformado.

## 5.2.6 ANÁLISIS GRÁFICO DE PARETO DE LOS EFECTOS ESTANDARIZADOS Y AJUSTADOS SOBRE LA PERMEABILIDAD DE LA ARENA VERDE

A continuación se presenta en la Figura N.29 el diagrama de Pareto para los efectos estandarizados una vez que se descartaron los factores considerados no significativos en el análisis inicial por el método gráfico.

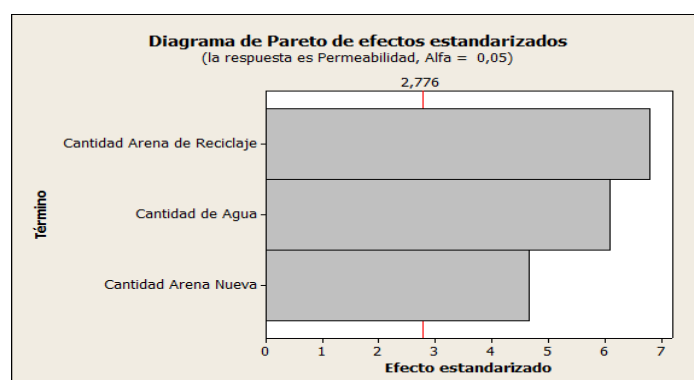


Figura N.29.- Diagrama de Pareto para los efectos estandarizados sobre la permeabilidad. (Elaboración propia).

De la Figura N.29 y trabajando con un nivel de alfa = 0,05, el diagrama de Pareto sugiere significativos los factores: cantidad de arena de reciclaje, cantidad de arena nueva, y la cantidad de agua.

Por tanto se confirman los resultados obtenidos en la tabla N.16

### 5.2.7 ANÁLISIS GRÁFICO DE NORMALIDAD PARA LA PERMEABILIDAD DE LA ARENA VERDE

Se presenta en la Figura N.30 la representación gráfica normal para los efectos estandarizados y ajustados

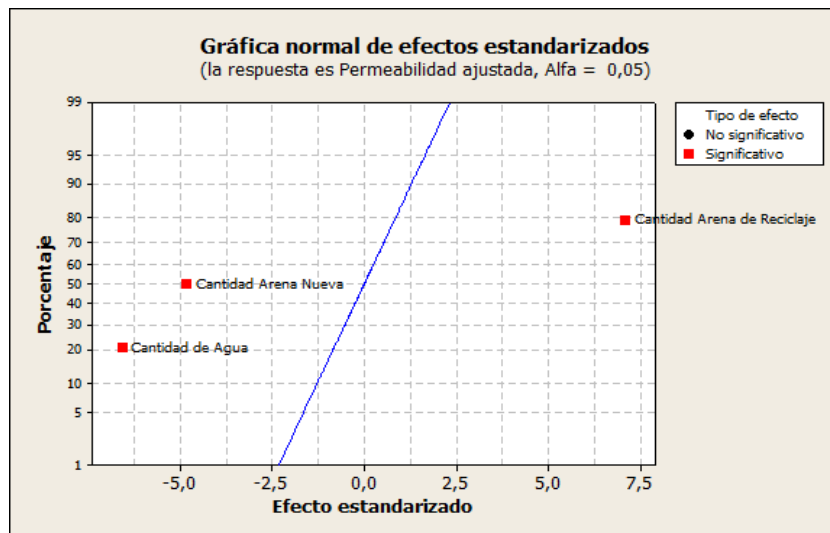


Figura N.30.- Gráfica normal para los efectos estandarizados y ajustados sobre la permeabilidad. (Elaboración propia).

La Figura N.30 confirma como factores significativos a: cantidad de arena de reciclaje, cantidad de arena nueva, y cantidad de agua.



Adicional a estas conclusiones de los efectos estandarizados y antes de presentar un modelo de regresión para la permeabilidad de la arena verde, es posible analizar de manera gráfica a las interacciones de hasta de segundo nivel y pueden servir para estudios futuros de la composición de la arena verde.

### **5.2.8 ANÁLISIS DE INTERACCIONES SOBRE LA PERMEABILIDAD DE LA ARENA VERDE**

Al no contar con la suficiente información para medir el impacto de las interacciones sobre la variable permeabilidad de la arena de manera individual. El uso de los alias es importante para tener una referencia del impacto de las interacciones, pero por lo pronto solo se pueden establecer relaciones gráficas.

De los alias para este modelo que fueron presentados en el literal 4.6.1, se tiene:

$$I_A = A + BD + CE$$

$$I_B = B + AD + CF$$

$$I_C = C + AE + BF$$

$$I_D = D + AB + EF$$

$$I_E = E + AC + DF$$

$$I_F = F + BC + DE$$

Solo se tomará en cuenta a los efectos de hasta segundo orden que pueden ser vistos de manera gráfica.

#### **5.2.8.1 ANÁLISIS GRÁFICO DE LAS INTERACCIONES PARA LA PERMEABILIDAD DE LA ARENA VERDE DE MOLDEO**

En la Figura N.31 se muestra una gráfica consolidada de las interacciones de hasta segundo orden.

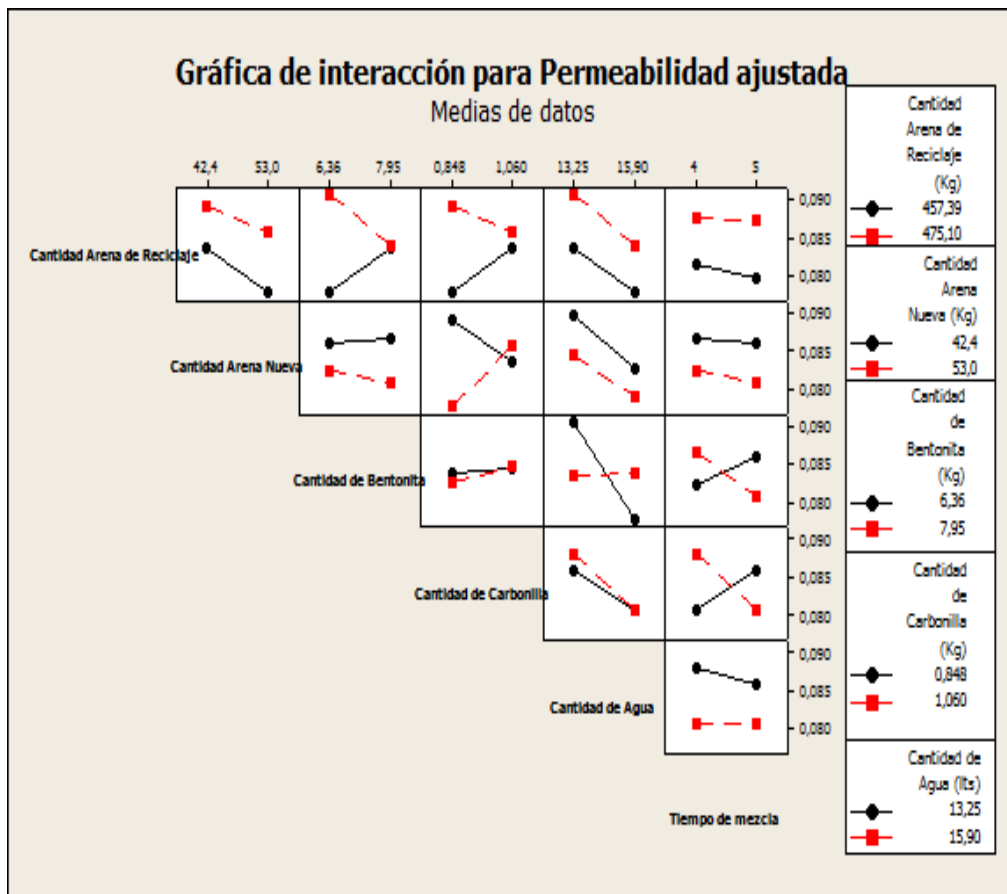


Figura N.31.- Gráfica de interacciones para la permeabilidad de la arena verde

De la Figura N.-31 se puede apreciar que, pueden ser significativas todas las interacciones en las que las líneas de los niveles se cruzan pronunciadamente y no son paralelas entre si. Este es el caso de las siguientes interacciones:

CE: Cantidad de bentonita – Cantidad de agua

CF: Cantidad de bentonita – Tiempo de mezcla

DF: Cantidad de carbonilla – Tiempo de mezcla

BD: Cantidad de arena nueva - Cantidad de carbonilla (menos significativa que las anteriores)

Sin embargo, por el momento no existe información suficiente para estimar los efectos reales de estas interacciones sobre la variable permeabilidad pero ya se tiene un aproximamiento o sugerencias para estudios futuros que se puedan realizar.

### 5.2.9 MODELO DE REGRESIÓN PARA LA VARIABLE PERMEABILIDAD DE LA ARENA VERDE

Concluidos los análisis anteriores, se presenta a continuación el modelo de regresión que más se ajusta a la realidad para predecir la permeabilidad de la arena verde. El modelo es el siguiente:

$$1/\sqrt{y}_{\text{permeabilidad}} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_A x_A + \hat{\beta}_B x_B + \hat{\beta}_E x_E \quad (17)$$

Donde las variables  $x_A, x_B, x_D, x_E$  representan a: A, B, y E ó Cantidad de arena de reciclaje, cantidad de arena nueva, y cantidad de agua respectivamente. Los valores de  $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_A, \hat{\beta}_B, \hat{\beta}_E$ , son los coeficientes estimados que resultaron del análisis de la varianza presentado en la Tabla N.16.  $\hat{\beta}_0$  es la constante media,  $\hat{\beta}_A$  es la constante para la cantidad de arena de reciclaje,  $\hat{\beta}_B$  es la constante para la cantidad de arena

nueva, y  $\hat{\beta}_E$  es la constante para la cantidad de agua, entonces la ecuación de regresión lineal para la permeabilidad es:

$$\hat{Y}_{\text{permeabilidad}} = \frac{1}{(-0,0465 + 0,000386441x_A - 0,000438741x_B - 0,00239347x_E)^5} \quad (18)$$

Este modelo servirá para generar la propuesta de composición alternativa para una arena con características deseables de permeabilidad.

### 5.3. ANÁLISIS DE LA VARIANZA DE LA RESISTENCIA DE LA ARENA VERDE

Al igual que el análisis anterior de la permeabilidad, el modelo experimental por el momento solo puede analizar los efectos principales.

Conocidos los antecedentes, de manera inicial se corre en Minitab 16 ® el modelo experimental, contemplando todos los factores predeterminados por el software, en este caso los factores principales.

A continuación se presenta en la Tabla N.17 el análisis de la varianza resultante con estas condiciones para la variable resistencia en verde. Con  $\alpha = 0,05$

ANÁLISIS DE LA VARIANZA PARA LA RESISTENCIA EN VERDE					
Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	F	p
Cantidad de arena de reciclaje	1	0,03125	0,03125	25	0,126
Cantidad de arena nueva	1	0,00125	0,00125	1	0,5
Cantidad de Bentonita	1	0,55125	0,55125	441	0,03
Cantidad de carbonilla	1	0,01125	0,01125	9	0,205
Cantidad de agua	1	0,00125	0,00125	1	0,5
Tiempo de mezcla	1	0,36125	0,36125	289	0,037
Error residual	1	0,00125	0,00125		
Total	7	1,01295			

R cuadrado	99,47%
R cuadrado predicción	66,27%
R cuadrado ajustado	96,31%

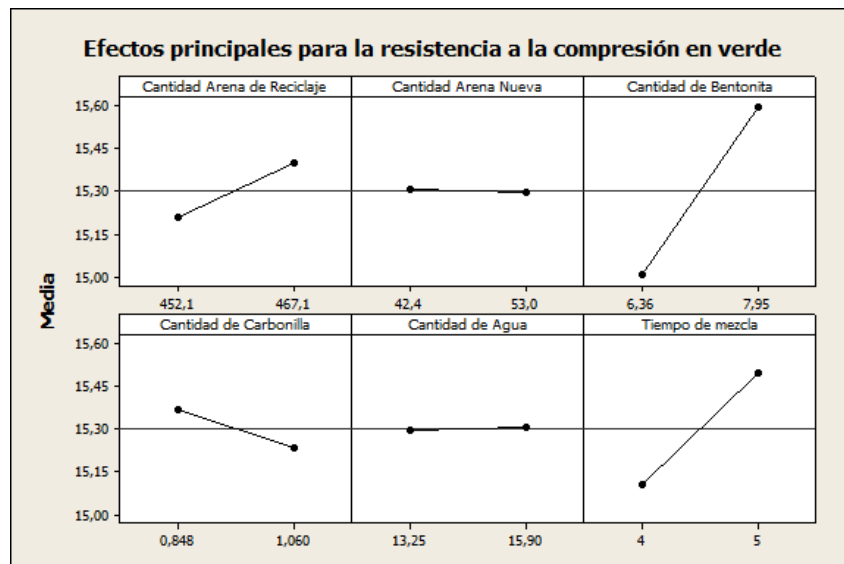
**Tabla N.17.- Análisis de la varianza para la resistencia de la arena verde. (Elaboración propia).**

Los resultados previos indican que, los factores: cantidad de bentonita y tiempo de mezcla son estadísticamente significativos en el nivel de  $\alpha = 0,05$  ya que, sus valores p son menores que  $\alpha$  y presentan valores altos de prueba F respectivamente. Sin embargo, se debe realizar una estandarización del modelo para mejorar las condiciones de R cuadrado de predicción.

De manera pareja también se analizan los resultados gráficos correspondientes a este estudio antes de realizar un modelo estándar final y tener las conclusiones acerca de la resistencia en la composición de la arena verde.

### **5.3.1 ANÁLISIS GRÁFICO DE LOS EFECTOS PRINCIPALES PARA LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN VERDE DE LA ARENA VERDE**

A continuación se presenta en la Figura N.32 la representación de los efectos principales sobre la variable de respuesta resistencia a la compresión en verde.



**Figura N.32.- Gráfica de efectos principales para la resistencia a la compresión en verde una vez corridos los ocho tratamientos experimentales. (Elaboración propia).**

De la Figura N.32, se puede apreciar un efecto importante del factor cantidad de bentonita, ya que cuando ésta aumenta a su nivel alto de 7,95 Kg la resistencia tiende a aumentar. Del mismo modo, se observa similar situación para el factor tiempo de mezcla. Estos componentes al tener una pendiente pronunciada sugieren ser significativos lo que comprueba con lo obtenido en el análisis de la varianza presentado en la tabla N.17.

Por otro lado se aprecia que, a un nivel alto del factor cantidad de arena de reciclaje de 467 Kg se tiende a aumentar los niveles resistencia, pero su efecto parece ser pequeño ya que no se aprecia un pronunciamiento pendiente marcado. Situación similar ocurre con el factor cantidad de carbonilla.

Finalmente se aprecia que, los factores cantidad de arena nueva y cantidad de agua no son significativos en la resistencia de la arena verde ya que se ajustan a la línea del eje x y no presentan un pronunciamiento de pendiente como los anteriores factores, lo que determinaría dicha conclusión.

Por tanto se concluye que, los factores cantidad de bentonita y tiempo de mezcla son significativos en la forma gráfica de efectos principales.

### 5.3.2 ANÁLISIS GRÁFICO DE PARETO PARA LOS EFECTOS PRINCIPALES PARA LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN VERDE

A continuación se presenta en la Figura N.33 la representación gráfica de Pareto para los efectos principales sobre la variable de respuesta resistencia a la compresión en verde.

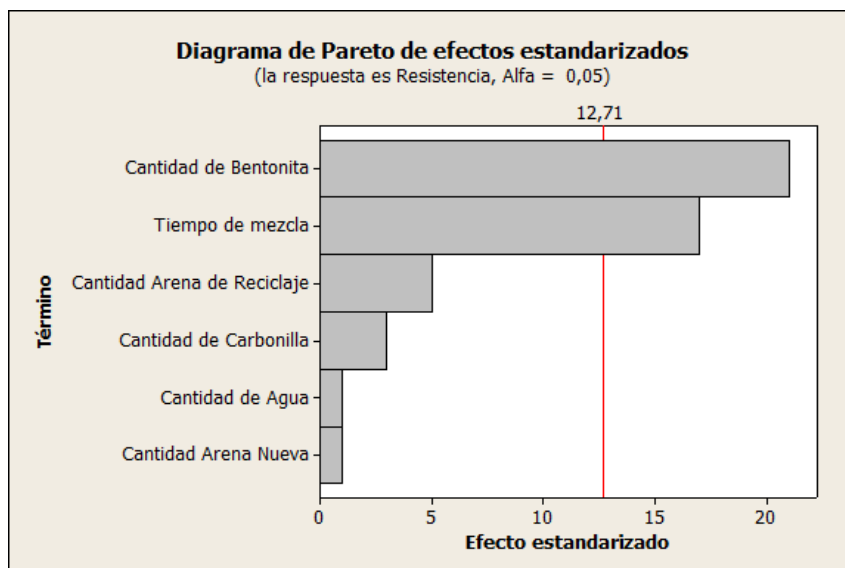


Figura N.33.- Diagrama de Pareto para los efectos principales sobre la resistencia a la compresión en verde una vez corridos los ocho tratamientos experimentales. (Elaboración propia).

De la Figura N.33 y trabajando con un nivel de alfa = 0,05, el diagrama de Pareto sugiere que son factores significativos sobre la resistencia, los factores: cantidad de bentonita y tiempo de mezcla, ya que son las barras de mayor pronunciamiento y están dentro de la línea crítica de significancia. Esto se comprueba con lo revisando en la gráfica de efectos principales y análisis de la varianza de la tabla N.17.

### 5.3.3 ANÁLISIS GRÁFICO DE NORMALIDAD PARA LOS EFECTOS PRINCIPALES SOBRE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN VERDE

A continuación se presenta en la Figura N.34 la representación gráfica normal para los efectos principales sobre la variable de respuesta resistencia a la compresión en verde.

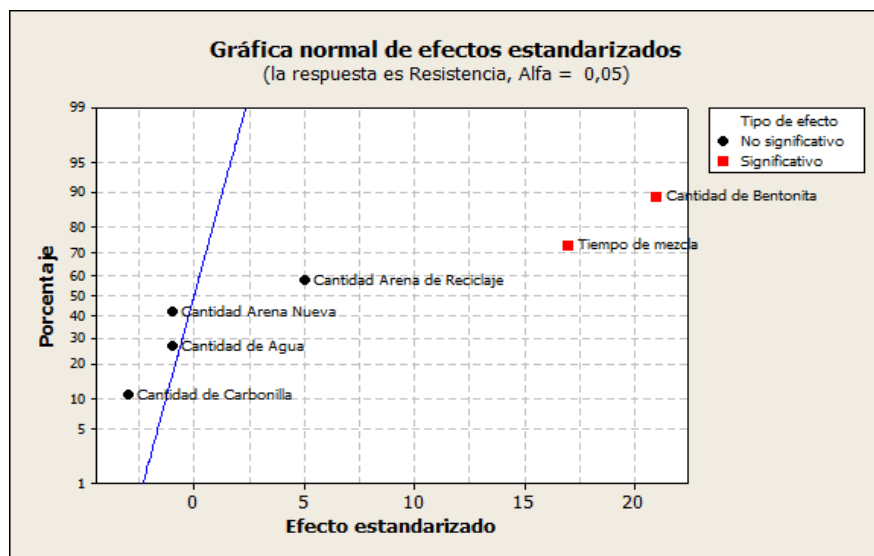


Figura N.34.- Gráfica normal para los efectos principales sobre la resistencia a la compresión en verde, corridos los ocho tratamientos experimentales. (Elaboración propia).

La figura N.34 sugiere que, son significativos los factores cantidad de bentonita y tiempo de mezcla, esto se debe a que dichos factores se hallan pronunciadamente alejados de la línea de tendencia normal.

Por tanto, una vez analizados los métodos gráficos de efectos principales, gráfico de Pareto, y de normalidad de los efectos, confirman los resultados del análisis de la varianza presentado en la tabla N.17, y se concluye que, los factores cantidad de bentonita y tiempo de mezcla, son significativos estadísticamente y tienen incidencia sobre la resistencia de la arena verde.



Con estos antecedentes se vuelve a correr el modelo experimental en Minitab 16 ®, pero en esta ocasión solo con los factores significativos sobre la resistencia para obtener un modelo estándar que explique a esta variable de respuesta y pueda ser optimizado para la composición de la arena verde.

### 5.3.4 ANÁLISIS DE LA VARIANZA PARA LA RESISTENCIA CON LOS FACTORES SIGNIFICATIVOS

Una vez conocidos los factores significativos sobre la variable resistencia, se los corrieron nuevamente en Minitab 16 ®.

A continuación se muestra en la Tabla N. 18 el análisis de la varianza y de los efectos respectivos una vez modificado el modelo experimental. Con  $\alpha=0,05$

<b>ANÁLISIS DE LA VARIANZA ESTANDARIZADO PARA LA RESISTENCIA EN VERDE</b>					
<b>Fuente</b>	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Cuadrado Medio</b>	<b>F</b>	<b>p</b>
Cantidad de Bentonita	1	0,54776	0,547756	110,4	0
Tiempo de mezcla	1	0,4309	0,430901	86,87	0,001
Error residual	5	0,00534	0,005339		
Total	7	1,01295			

R cuadrado	98,04%
R cuadrado predicción	92,16%
R cuadrado ajustado	96,57%

<b>Coeficientes estimados</b>	
Constante	8,55307
Cantidad de Bentonita	0,32914
Tiempo de mezcla	0,464167

**Tabla N.18.- Análisis de la varianza estandarizado para la resistencia de la arena verde (Elaboración propia).**

Nótese que, los coeficientes estimados son valores pequeños, sin embargo éstos serán compensados por las magnitudes de cada variable en el modelo de regresión.

Así, del análisis presentado en la Tabla N.18 se observa que, los factores: cantidad de bentonita, y el tiempo de mezcla son significativos en un nivel  $\alpha=0,05$ . Siendo el factor cantidad de bentonita el de mayor incidencia sobre la resistencia.

Así con un modelo estandarizado se obtuvieron los valores de R cuadrado= 98,04%, R cuadrado predicción=92,16%, y el R cuadrado ajustado=96,57% que sugieren un mejor ajuste del modelo y asegurará mayor eficiencia para predecir de nuevos datos de resistencia.

Una vez realizado el análisis de la varianza estandarizado, se presenta a continuación los resultados gráficos que confirman la adecuación del modelo para la resistencia de la arena verde.

### **5.3.5 ANÁLISIS DE RESIDUALES PARA EL MODELO ESTANDARIZADO PARA LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN VERDE**

En la Figura N.35 se muestra el análisis gráfico con respecto a los residuales para la verificación de la adecuación del modelo experimental.

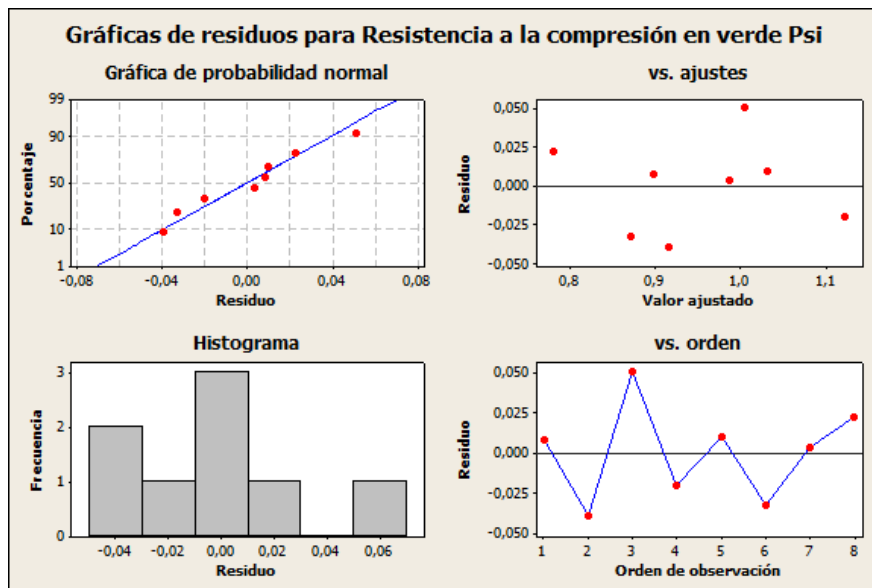


Figura N.35.- Gráfica de residuales el modelo estandarizado de la resistencia de la arena verde. (Elaboración propia).

De la Figura N.35 se observa que, los residuales siguen una distribución normal por ajustarse a la línea de tendencia.

Por su parte, en la gráfica de Residuo vs. Valores ajustados no se observa una tendencia anormal que hablen de una mala adecuación del modelo ya que los residuales se hallan distribuidos aleatoriamente alrededor de cero.

De igual forma, en la gráfica del histograma de residuales se aprecia relativamente una forma de campana que habla la normalidad de los datos.

Finalmente, se observa en la gráfica de Residuos vs. Orden de las observaciones un patrón aleatorio alrededor de la línea central. No existe una tendencia ascendente o descendente de los residuales que hablen de una mala adecuación del modelo.

Con este análisis se concluye que, el análisis de la varianza es correcto y que el modelo no presenta anomalías en los resultados del mismo y puede ser usado para predecir de mejor manera a la variable resistencia.

Por tanto, ahora se procede al análisis gráfico de los efectos estandarizados para confirmar los resultados del análisis de la varianza sobre la resistencia a la compresión en verde.

### 5.3.6 ANÁLISIS GRÁFICO DE PARETO DE LOS EFECTOS ESTANDARIZADOS SOBRE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN VERDE DE LA ARENA

A continuación se presenta en la Figura N.36 el diagrama de Pareto para los efectos estandarizados una vez que se descartaron los factores considerados no significativos en el análisis inicial por el método gráfico.

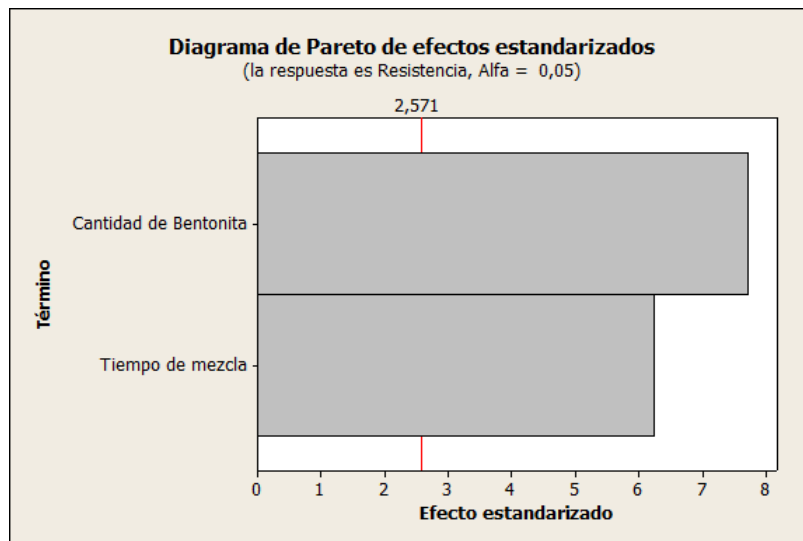


Figura N.36.- Diagrama de Pareto para los efectos estandarizados sobre la resistencia a la compresión en verde. (Elaboración propia).

De la Figura N.36 y trabajando con un nivel de alfa = 0,05, el diagrama de Pareto sugiere que, son significativos los factores: cantidad de bentonita, tiempo de mezcla pero no así el factor cantidad de arena de reciclaje.

Por tanto estos factores si demuestran tener incidencia sobre la resistencia de la arena verde.

### 5.3.7 ANÁLISIS GRÁFICO DE NORMALIDAD PARA LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN VERDE DE LA ARENA DE MOLDEO

A continuación se presenta en la Figura N.37 la representación gráfica normal para los efectos estandarizados o que se consideran significativos sobre la variable de respuesta resistencia a la compresión en verde.

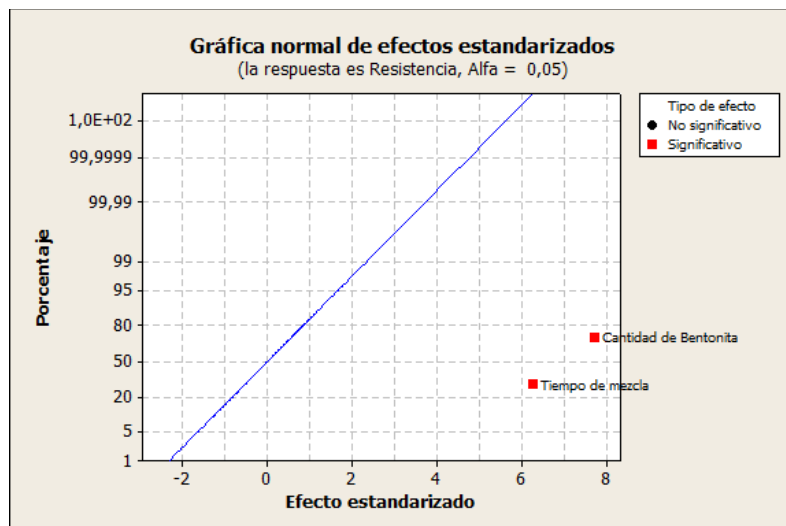


Figura N.37.- Gráfica normal para los efectos estandarizados sobre la resistencia a la compresión en verde. (Elaboración propia)

La Figura N.37 sugiere que, son factores significativos: cantidad de bentonita y tiempo de mezcla.

Adicional a estas conclusiones de los efectos estandarizados y antes de presentar un modelo de regresión para la resistencia de la arena verde, es posible analizar de

manera gráfica a las interacciones de hasta de segundo nivel y pueden servir para estudios futuros de la composición de la arena verde.

### **5.3.8 ANÁLISIS DE INTERACCIONES SOBRE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN VERDE DE LA ARENA DE MOLDEO**

Al no contar con la suficiente información para medir el impacto de las interacciones sobre la variable resistencia a la compresión en verde de la arena de manera individual. El uso de los alias es importante para tener una referencia del impacto de las interacciones, pero por lo pronto solo se pueden establecer relaciones gráficas.

De los alias para este modelo que fueron presentados en el literal 4.6.1, se tiene:

$$I_A = A + BD + CE$$

$$I_B = B + AD + CF$$

$$I_C = C + AE + BF$$

$$I_D = D + AB + EF$$

$$I_E = E + AC + DF$$

$$I_F = F + BC + DE$$

Solo se tomará en cuenta a los efectos de hasta segundo orden que pueden ser vistos de manera gráfica.

### 5.3.8.1 ANÁLISIS GRÁFICO DE LAS INTERACCIONES PARA LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN VERDE DE LA ARENA DE MOLDEO

A continuación, se presenta en la Figura N.30 un consolidado gráfico de las interacciones de hasta segundo orden.

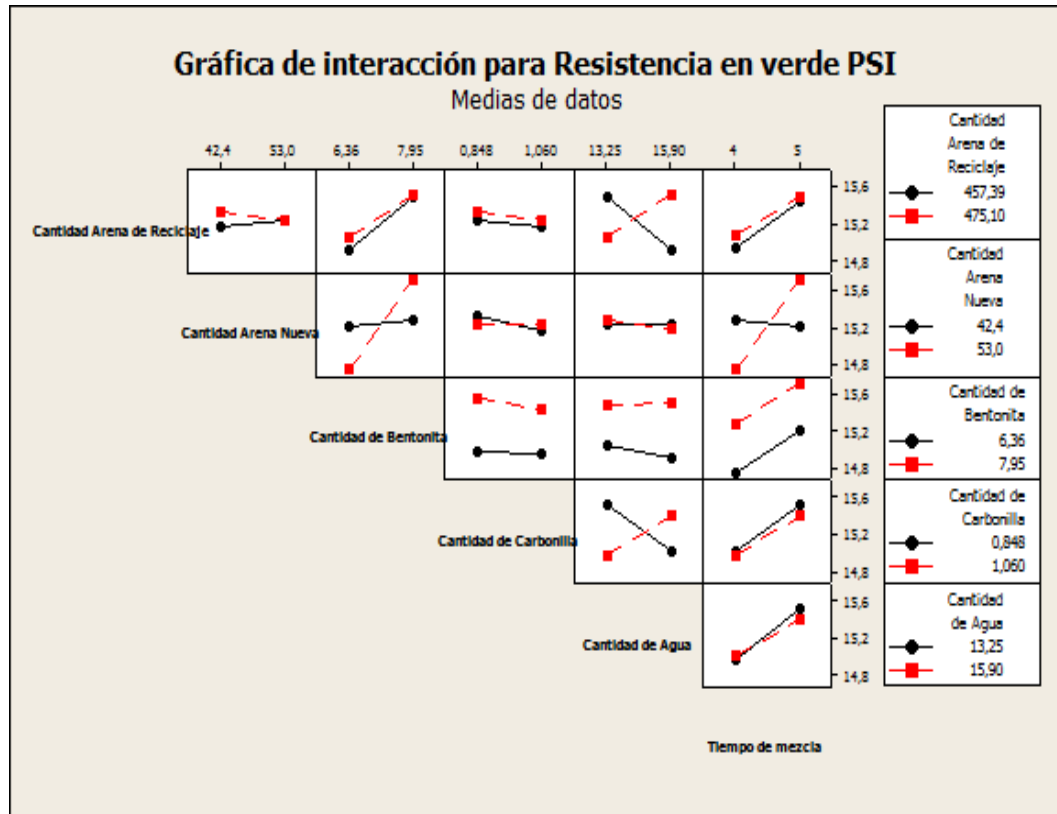


Figura N.38: Gráfica de interacciones para la resistencia a la compresión en verde (elaboración propia)

De la Figura N.38 se puede apreciar que, pueden ser significativas todas las interacciones en las que las líneas de los niveles se cruzan pronunciadamente y no son paralelas entre si. Este es el caso de las siguientes interacciones:

BC: Cantidad de arena nueva - Cantidad de bentonita

AE: Cantidad de arena de reciclaje – Cantidad de agua

BF: Cantidad de arena nueva – Tiempo de mezcla

DE: Cantidad de carbonilla – Cantidad de agua

Sin embargo, por el momento no existe información suficiente para estimar los efectos reales de estas interacciones sobre la variable resistencia a la compresión en verde.

### 5.3.9 MODELO DE REGRESIÓN PARA LA VARIABLE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN VERDE

Concluidos los análisis anteriores, se presenta a continuación el modelo de regresión que más se ajusta a la realidad para predecir la resistencia de la arena verde. El modelo es el siguiente:

$$\hat{y}_{\text{resistencia a la compresión en verde}} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_C x_C + \hat{\beta}_F x_F \quad (19)$$

Donde las variables  $x_C, x_F$  representan a: C =cantidades de bentonita y F=tiempo de mezcla. Los valores de  $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_C, \hat{\beta}_F$  son los coeficientes estimados que resultaron del análisis de la varianza presentado en la Tabla N.18.  $\hat{\beta}_0$  es la constante media,  $\hat{\beta}_C$  es la constante para la cantidad de bentonita y  $\hat{\beta}_F$  es la constante para el tiempo de mezcla, entonces la ecuación de regresión lineal para la resistencia es:

$$\hat{y}_{\text{resistencia a la compresión en verde}} = 8,55307 + 0,32914x_C + 0,464167x_F \quad (20)$$



Este modelo servirá para generar la propuesta de composición alternativa para una arena con características deseables de resistencia.

#### 5.4. ANÁLISIS DE LA VARIANZA DEL PORCENTAJE DE HUMEDAD DE LA ARENA VERDE DE MOLDEO

Al igual que el análisis anterior de la resistencia y permeabilidad, el modelo experimental por el momento solo puede analizar los efectos principales.

Conocidos los antecedentes, de manera inicial se corre en Minitab 16 ® el modelo experimental, contemplando todos los factores predeterminados por el software, en este caso los factores principales.

A continuación se presenta en la Tabla N.19 el análisis de la varianza resultante con estas condiciones. Con  $\alpha = 0,05$ .

ANÁLISIS DE LA VARIANZA PARA EL PORCENTAJE DE HUMEDAD					
Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	F	p
Cantidad de Arena de reciclaje	1	0,44023	0,44023	878,03	0,021
Cantidad de Arena nueva	1	0,1449	0,1449	289	0,037
Cantidad de Bentonita	1	0,00587	0,00587	11,7	0,181
Cantidad de Carbonilla	1	0,00007	0,00007	0,14	0,775
Cantidad de agua	1	1,2194	1,2194	2432,05	0,013
Tiempo de mezcla	1	0,01307	0,01307	26,06	0,123
Error residual	1	0,0005	0,0005		
Total	7	1,82404			

R cuadrado	99,30%
R cuadrado predicción	98,24%
R cuadrado ajustado	99,81%

Tabla N.19.- Análisis de la varianza para el porcentaje de humedad de la arena verde. (Elaboración propia).

Los resultados indican que, el factor cantidad de agua, arena de reciclaje y, arena nueva son estadísticamente significativos en el nivel de  $\alpha = 0,05$  ya que, su valor p es menor que  $\alpha$  y presenta un valor alto de prueba F respectivamente. Con estos resultados se puede construir un modelo estandarizado que mejor prediga al porcentaje de humedad de la arena verde.

Antes de realizar un modelo estándar final para el porcentaje de humedad, se muestran los resultados gráficos correspondientes al análisis de la varianza de la Tabla N.19.

#### 5.4.1 ANÁLISIS GRÁFICO DE LOS EFECTOS PRINCIPALES PARA LA PORCENTAJE DE HUMEDAD DE LA ARENA VERDE

En la Figura N.39 se muestra la representación de los efectos principales sobre la variable de respuesta porcentaje de humedad.

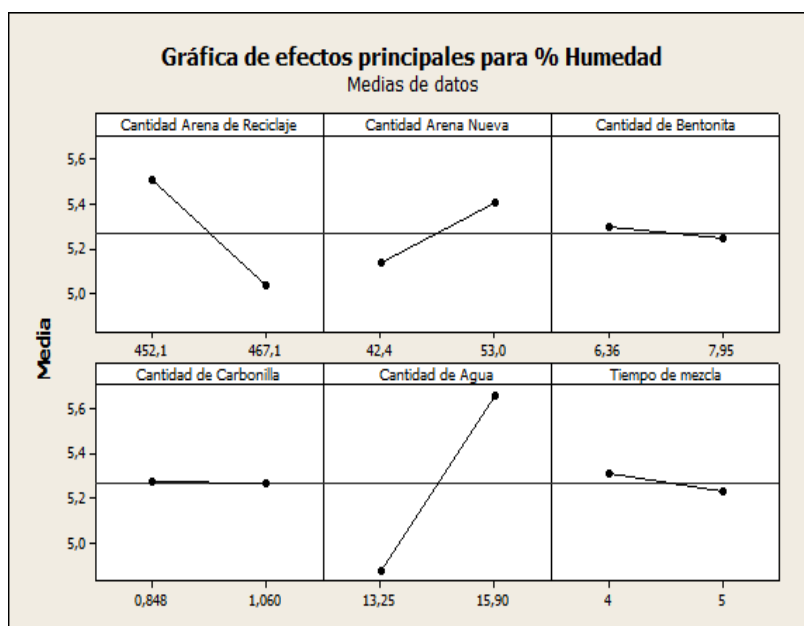


Figura N.39.- Gráfica de efectos principales para el porcentaje de humedad una vez corridos los ocho tratamientos experimentales. (Elaboración propia).

De la Figura N.39, la pendiente pronunciada del factor cantidad de agua demuestra un efecto significativo importante de este factor sobre el porcentaje de humedad. Cuando éste aumenta a su nivel alto de 15,9 lts, el porcentaje de humedad tiende a aumentar. Caso similar sucede con el factor cantidad de arena nueva, aunque con una pendiente menos pronunciada. Caso contrario ocurre con el factor cantidad de arena de reciclaje, donde el porcentaje de humedad tiende a decrecer en un nivel alto de 467kg. Sin embargo, los tres factores anteriores se muestran como significativos en la forma gráfica y confirman los resultados del análisis de la varianza detallado en la tabla N. 19.

Por otro lado se aprecia que los factores: cantidad de carbonilla, tiempo de mezcla, y cantidad de bentonita efectivamente no son significativos, ya que dichos factores se ajustan a la línea del eje x y no presentan un pronunciamiento pendiente como el de los anteriores factores.

Por tanto se concluye que, los factores: cantidad de agua, cantidad de arena nueva, y cantidad de arena de reciclaje son significativos en la forma gráfica de efectos principales con un nivel de confianza de 0,05.

#### **5.4.2 ANÁLISIS GRÁFICO DE PARETO PARA LOS EFECTOS PRINCIPALES PARA EL PORCENTAJE DE HUMEDAD DE LA ARENA VERDE DE MOLDEO**

En la Figura N.40 se muestra la representación gráfica de Pareto para los efectos principales sobre la variable de respuesta porcentaje de humedad.

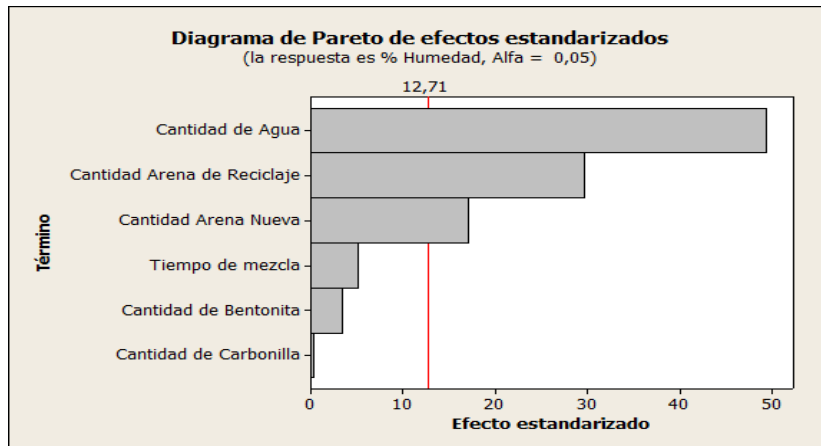


Figura N.40.- Diagrama de Pareto para los efectos principales sobre el porcentaje de humedad una vez corridos los ocho tratamientos experimentales. (Elaboración propia).

De la Figura N.40 y trabajando con un nivel de alfa = 0,05, el diagrama de Pareto sugiere significativos a los factores cantidad de agua, arena de reciclaje y arena nueva, ya que sus barras se hallan dentro de la línea crítica de significancia.

### 5.4.3 ANÁLISIS GRÁFICO DE NORMALIDAD PARA LOS EFECTOS PRINCIPALES SOBRE EL PORCENTAJE DE HUMEDAD DE LA ARENA VERDE

En la Figura N.41 se muestra la representación gráfica normal para los efectos principales sobre la variable de respuesta porcentaje de humedad.

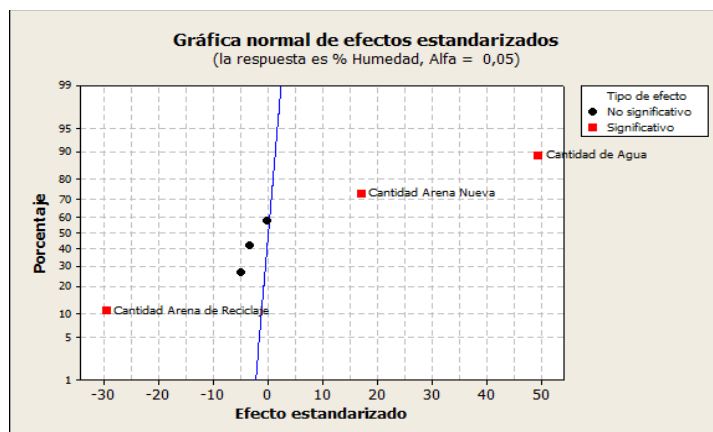


Figura N.41.- Gráfica normal para los efectos principales sobre el porcentaje de humedad una vez corridos los ocho tratamientos experimentales. (Elaboración propia).

La Figura N.41 sugiere como factores significativos a: cantidad de agua, arena de reciclaje y arena nueva, ya que se hallan pronunciadamente alejados de la línea de tendencia normal.

De esta forma, una vez analizados los métodos gráficos de efectos principales, diagrama de Pareto, y de normalidad de los efectos, se comprobaron los resultados del análisis de la varianza de la tabla N.19, y con ello ya se puede armar un modelo final estándar con los factores significativos sobre la variable porcentaje de humedad.

#### 5.4.4 ANÁLISIS DE LA VARIANZA PARA EL PORCENTAJE DE HUMEDAD DE LA ARENA VERDE CON LOS FACTORES SIGNIFICATIVOS

<i>ANÁLISIS DE LA VARIANZA ESTANDARIZADO PARA EL PORCENTAJE DE HUMEDAD</i>					
Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado Medio	F	p
Cantidad de arena de reciclaje	1	0,44023	0,44023	90,28	0,001
Cantidad de arena nueva	1	0,1449	0,1449	29,71	0,006
Cantidad de agua	1	1,2194	1,2194	250,1	0
Error residual	4	0,01951	0,00488		
Total	7	1,82404			

R cuadrado	98,93%
R cuadrado predicción	95,72%
R cuadrado ajustado	98,13%

Coeficientes estimados	
Constante	12,1137
Cantidad de arena de reciclaje	-0,0264916
Cantidad de arena nueva	0,0253931
Cantidad de agua	0,294654

**Tabla N.20.- Análisis de la varianza estandarizado para el porcentaje de humedad de la arena verde**

Nótese que, los coeficientes estimados son valores pequeños, sin embargo éstos serán compensados por las magnitudes de cada variable en el modelo transformado.

Así, del análisis presentado en la Tabla N.20 se observa que, los factores: cantidad de arena de reciclaje, nueva, y agua son significativos en un nivel  $\alpha=0,05$ . Siendo el factor cantidad de agua el de mayor incidencia.

Con este modelo estandarizado se obtuvieron los valores de R cuadrado= 98,86%, R cuadrado predicción=95,45%, y el R cuadrado ajustado=98,01% y sugieren un buen ajuste y mayor eficiencia para predecir nuevos datos de el porcentaje de humedad.

Una vez realizado el análisis de la varianza estandarizado, se presenta a continuación los resultados gráficos que confirman la adecuación del modelo para el porcentaje de humedad de la arena verde.

#### 5.4.5 ANÁLISIS DE RESIDUALES PARA EL MODELO ESTANDARIZADO PARA EL PORCENTAJE DE HUMEDAD DE LA ARENA VERDE

A continuación se presenta en la Figura N.42. El análisis gráfico con respecto a los residuales para la verificación de la adecuación del modelo experimental.

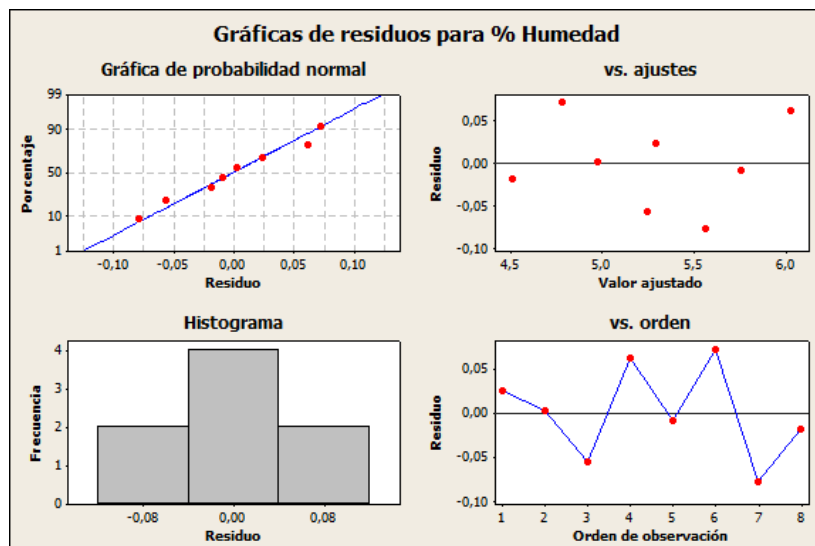


Figura N.42.- Gráfica de residuales para los datos del porcentaje de humedad. (Elaboración propia).

De la Figura N.42 se observa que, los residuales siguen una distribución normal por ajustarse a la línea de tendencia normal.

Por su parte, en la gráfica de Residuos vs. Valores ajustados no se observa una tendencia anormal que hable de una mala adecuación del modelo ya que los residuales se hallan distribuidos aleatoriamente alrededor de cero y no se observa algún patrón de tendencia.

En la gráfica del histograma de residuales se aprecia una forma de campana que habla la normalidad de los datos.

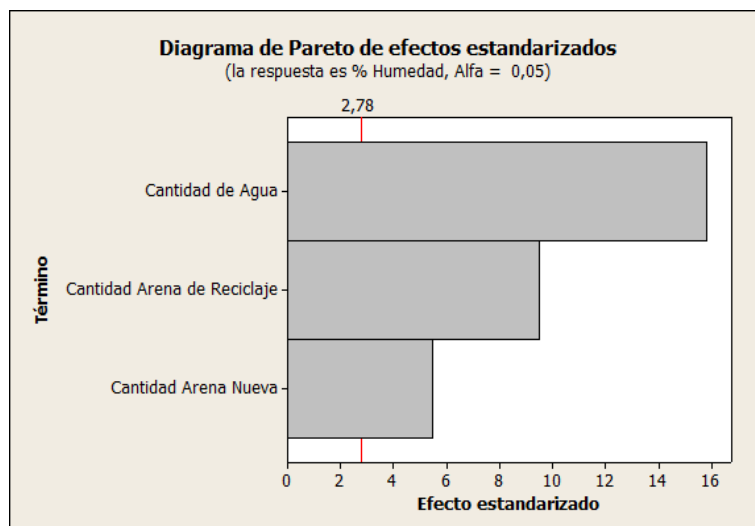
Finalmente, se observa en la gráfica de Residuos vs. Orden que los residuos se dispersan aleatoriamente alrededor de cero y no sugieren una mala adecuación del modelo.

Por tanto, el modelo es confiable y puede ser usado para predecir el porcentaje de humedad de la arena verde.

Ahora, de manera final se procede al análisis gráfico de los efectos estandarizados para confirmar los resultados del análisis de la varianza sobre el porcentaje de humedad de la arena verde.

#### **5.4.6 ANÁLISIS GRÁFICO DE PARETO DE LOS EFECTOS ESTANDARIZADOS SOBRE EL PORCENTAJE DE HUMEDAD DE LA ARENA VERDE**

En la Figura N.43 se muestra el diagrama de Pareto para los efectos estandarizados una vez que se descartaron los factores considerados no significativos en el análisis inicial por el método gráfico.



**Figura N.43.- Diagrama de Pareto para los efectos estandarizados sobre el porcentaje de humedad. (Elaboración propia).**

De la Figura N.43 y trabajando con un nivel de alfa = 0,05, el diagrama de Pareto sugiere que, son significativos los factores: A, B, y E correspondientes a: cantidad de arena de reciclaje, cantidad de arena nueva y la cantidad de agua. Por tanto estos factores sí demuestran tener incidencia sobre el porcentaje de humedad de la arena verde.

#### **5.4.7 ANÁLISIS GRÁFICO DE NORMALIDAD PARA EL PORCENTAJE DE HUMEDAD DE LA ARENA VERDE**

En la Figura N.44 se muestra la representación gráfica normal para los efectos estandarizados o que se consideran significativos sobre la variable de respuesta porcentaje de humedad.



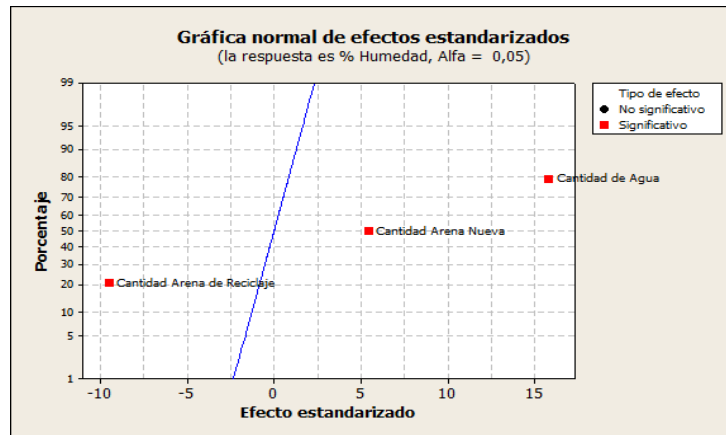


Figura N.44.- Gráfica normal para los efectos estandarizados sobre el porcentaje de humedad. (Elaboración propia).

La Figura N.44 confirma como factores significativos a: A, B, y E: cantidad de arena de reciclaje, cantidad de arena nueva, y cantidad de agua.

Adicional a estas conclusiones de los efectos estandarizados y antes de presentar un modelo de regresión para el porcentaje de humedad de la arena verde, es posible analizar de manera gráfica a las interacciones de hasta de segundo nivel. Esta información puede servir para estudios futuros de la composición de la arena verde.

#### 5.4.8 ANÁLISIS DE INTERACCIONES SOBRE EL PORCENTAJE DE HUMEDAD DE LA ARENA VERDE

Al no contar con la suficiente información para medir el impacto de las interacciones sobre la variable porcentaje de humedad de la arena de manera individual. El uso de los alias es importante para tener una referencia del impacto de las interacciones, pero por lo pronto solo se pueden establecer relaciones gráficas.

De los alias para este modelo que fueron presentados en el literal 4.6.1, se tiene:

$$I_A = A + BD + CE$$

$$I_B = B + AD + CF$$

$$I_C = C + AE + BF$$

$$I_D = D + AB + EF$$

$$I_E = E + AC + DF$$

$$I_F = F + BC + DE$$

Solo se tomará en cuenta a los efectos de hasta segundo orden

### 5.4.8.1 ANÁLISIS GRÁFICO DE LAS INTERACCIONES PARA EL PORCENTAJE DE HUMEDAD DE LA ARENA VERDE

En la Figura N.45 se presenta una gráfica consolidada de las interacciones de hasta segundo orden.

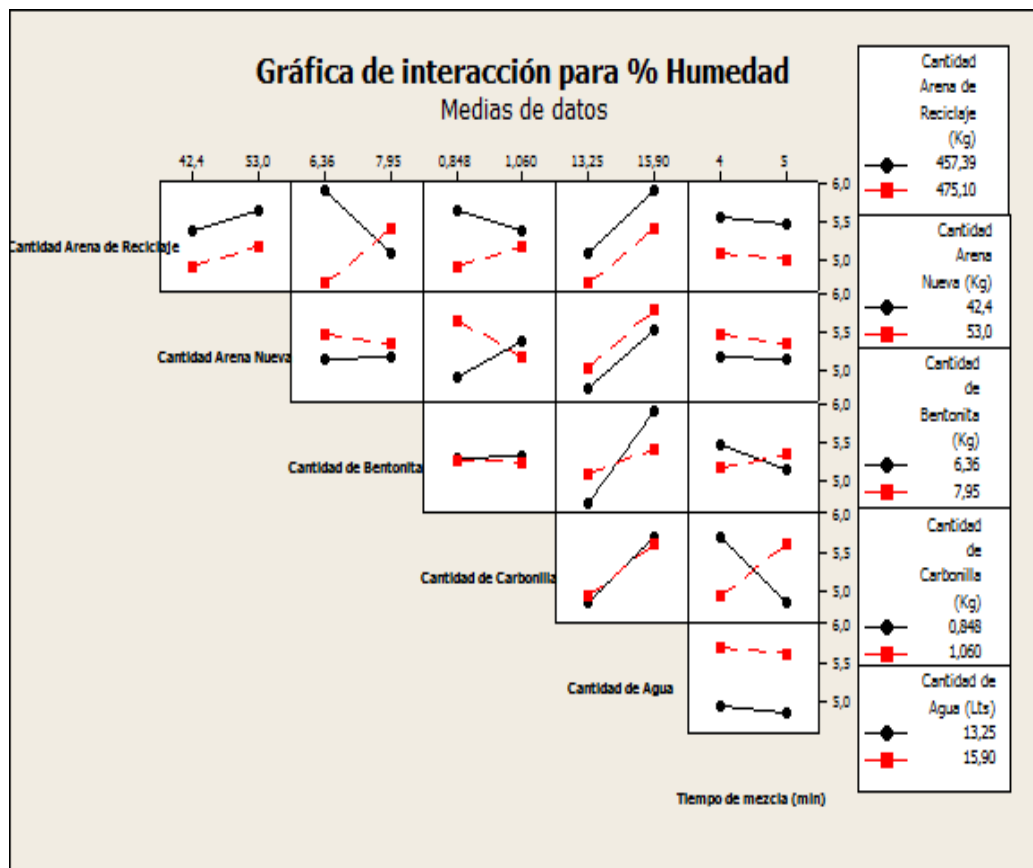


Figura N.45.- Gráfica de interacciones para la permeabilidad de la arena verde

De la Figura N.-45 se puede apreciar que, pueden ser significativas todas las interacciones en las que las líneas de los niveles se cruzan y no son paralelas entre si. Este es el caso de las siguientes interacciones:

AC: Cantidad de arena de reciclaje - Cantidad de bentonita

BD: Cantidad de arena nueva – Cantidad de carbonilla

CE: Cantidad de bentonita - Cantidad de agua

CF: Cantidad de Bentonita – Tiempo de mezcla

DF: Cantidad de carbonilla – Tiempo de mezcla

Por el momento no existe información suficiente para estimar los efectos reales de estas interacciones sobre la variable porcentaje de humedad de la arena verde.

Sin embargo, se tiene una referencia a priori de que interacciones podrían ser significativas sobre la variable si se realizarán otros estudios en el futuro.

#### **5.4.9 MODELO DE REGRESIÓN PARA LA VARIABLE PORCENTAJE DE HUMEDAD DE LA ARENA VERDE**

Concluidos los análisis anteriores, se presenta a continuación el modelo de regresión final que más se ajusta a la realidad para predecir el porcentaje de humedad de la arena verde. El modelo es el siguiente:

$$\hat{y}_{\% \text{ de humedad}} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_A x_A + \hat{\beta}_B x_B + \hat{\beta}_E x_E \quad (21)$$

Donde las variables  $x_A, x_B, x_E$  representan a A, B, y E ó Cantidad de arena de reciclaje, cantidad de arena nueva y cantidad de agua. Los valores de  $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_A, \hat{\beta}_B, \hat{\beta}_E$ , son los coeficientes estimados que resultaron del análisis de la varianza presentado en la Tabla N.20, entonces la ecuación que mejor predice el porcentaje de humedad de la arena verde es:

$$\hat{y}_{\% \text{ de humedad}} = 12,1137 - 0,0264916x_A + 0,0253931x_B + 0,294654x_E \quad (22)$$

Este modelo servirá para generar la propuesta de composición alternativa para una arena con características deseables de humedad.

## **5.5 RESUMEN DE LOS MODELOS AJUSTADOS PARA PREDECIR LAS VARIABLES DE LA ARENA VERDE DE MOLDEO**

Una vez que se identificaron los factores que inciden sobre las variables: resistencia a la compresión en verde, permeabilidad, y porcentaje de humedad de la arena.

Se presenta a continuación en la Tabla N.21 un resumen de los modelos obtenidos que mejor predicen a cada una de las variables y que servirán para determinar la composición de la arena verde optimizando cada una de las variables.

VARIABLE DE RESPUESTA	FACTORES SIGNIFICATIVOS SOBRE LA VARIABLE DE RESPUESTA	MODELOS DE REGRESIÓN PREDICTORES PARA LAS VARIABLES DE LA ARENA VERDE DE JCR FUNDICIONES
Permeabilidad (AFS)	Cantidad de arena de reciclaje (A) Cantidad de arena nueva (B) Cantidad de Agua (E)	$\hat{y}_{\text{permeabilidad}} = \frac{1}{(-0,0465 + 0,000386441x_A - 0,000438741x_B - 0,00239347x_E)^5}$
Resistencia a la compresión en verde (Psi)	Cantidad de Bentonita (C) Tiempo de mezcla (F)	$\hat{y}_{\text{resistencia a la compresión en verde}} = 8,55307 + 0,32914x_C + 0,464167x_F$
Porcentaje de Humedad	Cantidad de arena de reciclaje (A) Cantidad de arena nueva (B) Cantidad de Agua (E)	$\hat{y}_{\% \text{ de humedad}} = 12,1137 - 0,0264916x_A + 0,0253931x_B + 0,294654x_E$

Tabla N.21.- Resumen de los modelos ajustados para predecir las variables de la arena de fundición de JCR Fundiciones. (Elaboración propia).

## 5.6 OPTIMIZACIÓN DE LAS VARIABLES PARA LA COMPOSICIÓN ALTERNATIVA DE LA ARENA VERDE DE MOLDEO

Una vez que se obtuvieron los modelos que mejor describen a las variables permeabilidad, resistencia a la a compresión en verde, y porcentaje de humedad ya se puede obtener una composición alternativa que optimice a cada una de las variables.

Utilizando la técnica de optimización simultanea descrita en el capítulo 2.6 y con el uso de Minitab 16 ® se obtendrán los resultados de una composición para la arena verde con parámetros de trabajo deseados.

### 5.6.1 PARÁMETROS DE DESEADOS PARA LAS PROPIEDADES DE LA ARENA VERDE

Se espera que la composición ideal para la arena verde de moldeo cumpla con las siguientes características mostradas en la Tabla N.22. Los parámetros fueron sugeridos por el Jefe de Producción Ing. Gustavo López.

IMPORTANCIA DE LA VARIABLE DE RESPUESTA	VARIABLE DE RESPUESTA	PARÁMETROS DE TRABAJO DESEADOS (Sugeridos por el departamento de producción de JCR Fundiciones)		
		<i>Nivel Mínimo</i>	<i>Nivel óptimo</i>	<i>Nivel Máximo</i>
1	Resistencia a la compresión en verde (Psi)	14	15	16
2	Permeabilidad AFS	80	140	160
3	Porcentaje de Humedad	4%	5%	6%

Tabla N.22.- Parámetros deseados a cumplir por la composición de la arena verde de JCR Fundiciones. (Elaboración propia).

### 5.6.2 OPTIMIZACIÓN DE LAS VARIABLES DE RESPUESTA PARA LA OBTENCIÓN DE UNA COMPOSICIÓN ALTERNATIVA PARA LA ARENA VERDE DE MOLDEO DE JCR FUNDICIONES

Considerando los parámetros de trabajo deseables y con los modelos ajustados para predecir a cada una de las variables de respuesta, se corrió el modelo en Minitab 16® utilizando el optimizador de respuestas y se obtuvo los siguientes resultados mostrados en la Figura N. 46.

Deseabilidad total "D"	Nivel	Cantidad de arena de reciclaje (kg)	Cantidad de arena nueva (kg)	Cantidad de bentonita (kg)	Cantidad de carbonilla (kg)	Cantidad de agua (lts)	Tiempo de mezcla (min)
		Alto	467,1	53	7,95	1,06	15,9
0,98	Óptimo	452,3	42,42	6,36	0,85	13,36	4,65
	Bajo	452,1	42,4	6,36	0,848	13,25	4
Compuesto Deseabilidad							
Permeabilidad Objetivo: 140 y = 138,11 deseabilidad = 0,96							
% Humedad Objetivo: 5 y = 5 deseabilidad = 1,00							
Resistencia Objetivo: 15 y = 14,99 deseabilidad = 0,99							

Figura N.46.- Resultados del optimizador de respuesta para las variables de la arena verde de moldeo de JCR Fundiciones. Modificado de Minitab 16 ® (Elaboración propia).

De la Figura N.46 se aprecia que, se alcanzaron valores o parámetros deseados para cada una de las variables de respuesta, eso demuestran sus niveles de deseabilidad "d" que se encuentra cercanos o son iguales a uno para cada una de las variables.

De esta forma, ya se pueden revisar que cantidades son necesarias de cada factor o componente de la arena verde de moldeo.

Se aprecia que, para alcanzar los valores deseados de las variables de respuesta, son necesarios: 452,62 kg de arena de reciclaje, 42,41 Kg de arena nueva, 6,36 kg de Bentonita, 0,84 Kg de carbonilla, 13,37 lts de agua, y un tiempo de mezcla de 4,65 min.

Por tanto, esta composición de la arena verde cumple con los requerimientos deseados.

### 5.6.3 COMPOSICIÓN ALTERNATIVA SUGERIDA PARA LA ARENA VERDE DE JCR FUNDICIONES

Con los resultados obtenidos, la composición alternativa para la arena verde, que propone mejorar las propiedades de la misma y aportar a la reducción de defectos por problemas de arena en las piezas finales es la siguiente:

	COMPOSICIÓN ALTERNATIVA PARA LA ARENA VERDE DE MOLDEO DE JCR FUNDICIONES	PORCENTAJES DEL TOTAL DE LA MEZCLA
Cantidad de Arena Reciclaje (Kg)	452,62	87%
Cantidad de Arena Nueva (Kg)	42,41	8,2%
Cantidad de Bentonita (Kg)	6,36	1,2%
Cantidad de Carbonilla (Kg)	0,85	0,16%
Cantidad de Agua (lts) = (Kg)	13,37	3%
Tiempo de mezcla (min)	4,65	
PESO TOTAL DE LA MEZCLA (Kg)	520,26	

Tabla N.23.- Composición alternativa para la arena verde de moldeo de JCR Fundiciones. (Elaboración propia).

Las cantidades de componentes presentados en la Tabla N. 23 cumplen con los requerimientos deseados, sin embargo las cantidades a adicionar, son más altas que las cantidades con las que se trabajaban hasta el año 2011.

De modo que, si se llevaran estas cantidades a producción implicarían mayores costos y la planta se llenaría con mayores introducciones de arena al sistema.



Por tanto, conjuntamente con el departamento de producción de la empresa se decidió trabajar con esta composición pero transformada a un porcentaje similar o más bajo que con el que se trabajaba hasta diciembre 2011, dichos datos fueron presentados en la tabla N. 6.

Entonces, a partir de la composición de la tabla N. 23 se aproximó cada componente de la mezcla para elaborar lotes de hasta 450Kg. Esto se realizó con la finalidad de reducir el consumo de componentes sin afectar la demanda de arena verde en el sistema, e implicará reducción de costos de producción y mejor mantenimiento de la arena verde.

En la tabla N.24 se presenta la composición alternativa transformada a 450Kg.

	COMPOSICIÓN ALTERNATIVA PARA LA ARENA VERDE DE MOLDEO DE JCR FUNDICIONES	PORCENTAJES DEL TOTAL DE LA MEZCLA
Cantidad de Arena Reciclaje (Kg)	392	87%
Cantidad de Arena Nueva (Kg)	37	8,2%
Cantidad de Bentonita (Kg)	5	1,2%
Cantidad de Carbonilla (Kg)	0,72	0,16%
Cantidad de Agua (Its)	12	3%
Tiempo de mezcla (min)	4,65	
PESO TOTAL DE LA MEZCLA (Kg)	450	

**Tabla N.24.- Porcentajes de la composición alternativa de la arena verde de moldeo de JCR Fundiciones. (Elaboración propia)**

Esta composición a 450kg de lote sugiere reducir los costos de producción, contrastándola con los costos de lote que se hacían hasta diciembre 2011 y el costo del lote de la composición alternativa. Esto se muestra en la tabla N.25.

<b>LOTE DE 530 kg hasta dic 2011</b>	<b>CANTIDAD DE COMPONENTES</b>	<b>COSTOS DE LA MEZCLA (ctvs x kilo); (ctvs x m3)</b>	<b>COSTO APROXIMADO DE LA MEZCLA (\$)</b>
Cantidad de Arena Nueva (Kg)	10	0,03	0,3
Cantidad de Bentonita (Kg)	6	0,28	1,68
Cantidad de Carbonilla (Kg)	3	0,25	0,75
Cantidad de Agua (lts)	12 lts = 0,012 m3	0,35	0,0042
<b>COSTO TOTAL REFERENCIAL</b>			<b>\$ 2,73</b>

<b>LOTE DE 520,26 kg comp. Alternativa 1</b>	<b>CANTIDAD DE COMPONENTES</b>	<b>COSTOS DE LA MEZCLA (ctvs x kilo); (ctvs x m3)</b>	<b>COSTO APROXIMADO DE LA MEZCLA (\$)</b>
Cantidad de Arena Nueva (Kg)	42,4	0,03	1,272
Cantidad de Bentonita (Kg)	6	0,23	1,38
Cantidad de Carbonilla (Kg)	0,85	0,25	0,2125
Cantidad de Agua (lts)	13,37lts = 0,01337 m3	0,35	0,0046795
<b>COSTO TOTAL REFERENCIAL</b>			<b>\$ 2,86</b>

<b>LOTE DE 450 kg comp. Alternativa 2</b>	<b>CANTIDAD DE COMPONENTES</b>	<b>COSTOS DE LA MEZCLA (ctvs x kilo); (ctvs x m3)</b>	<b>COSTO APROXIMADO DE LA MEZCLA (\$)</b>
Cantidad de Arena Nueva (Kg)	37	0,03	1,11
Cantidad de Bentonita (Kg)	5	0,23	1,15
Cantidad de Carbonilla (Kg)	0,7	0,25	0,175
Cantidad de Agua (lts)	12 lts = 0,012 m3	0,35	0,0042
<b>COSTO TOTAL REFERENCIAL</b>			<b>\$ 2,44</b>

**Tabla N.25.- Costos de producción de lotes de arena con las composiciones revisadas (Elaboración propia)**

Por tanto, la composición alternativa de 450kg puede ser sugerida para llevarla a producción diaria. Además que no afecta las necesidades de producción ya los lotes se realizan en menos tiempo que en el año 2011 (5 min). En el año 2011 se realizaban aproximadamente 96 lotes de arena verde, en un turno de 8 horas. Mientras que, con esta composición y realizando lotes de 450Kg en 4,6

min, se llegarán a realizar aproximadamente 102 lotes de arena. Es decir, 6 lotes más que en el año 2011.

Sin embargo esta composición alternativa no asegurará que se cumplan las propiedades de arena verde de moldeo como la composición presentada en la tabla N.23. Por ello, se realizaron pruebas para observar el efecto. En la tabla N.26 se presentan los datos de pruebas realizadas con esta composición. Los datos fueron recogidos de las pruebas de producción realizadas en Febrero 2012. Los datos originales se muestran en Anexo N. 5.

<b>PROPIEDADES DE LA ARENA VERDE DE MOLDEO A 450Kg DE LOTE</b>			
<b>Muestra</b>	<b>Resistencia (psi)</b>	<b>Permeabilidad (AFS)</b>	<b>% Humedad</b>
1	16	170	5
2	13,5	172	5,1
3	16,3	155	4,72
4	17,1	140	5,26
5	15,8	148	5
6	15	175	4,36
7	15,9	180	5,05
8	15,4	168	4,34
9	16,2	144	5,16
10	17,2	125	4,66
11	16,1	130	4,36
12	15,5	160	4,42
13	16,2	142	4,22
14	15	165	5,26
15	14,8	145	4,54
16	15,3	120	4,56
17	15,2	144	5,22
18	15	132	5,03
19	16,5	130	4,7
20	14,3	150	5,34
21	16	130	4,78
22	14	154	5,02
23	15,5	125	4,88
24	15,5	118	
25	16	137	
26	13,8	160	
27	13,5	180	
28	15	150	
29	13,8	130	
30	15	152	
31	16	150	
32	15,5	160	
33	16,9	140	
34	14	145	
35	13,9	138	
36	15,5	125	
37	16	150	
<b>PROMEDIO</b>	<b>15,36</b>	<b>147</b>	<b>4,83</b>

Tabla N.26.- Resultados de pruebas de producción de lotes de arena con la composición alternativa de 450kg de arena verde. Tomados en Febrero, 2012.

Realizadas las pruebas se comprueba que, la composición alternativa de 450Kg si cumple con los parámetros de trabajo deseados, además se esta logrado reducir las cantidades de componentes de mezcla, reduciendo costos en materia prima y se espera que sugiera también la reducción de defectos por arena en las piezas finales.

## **6. CAPÍTULO VI: PROPUESTAS ADICIONALES**

### **6.1 Planteamiento final de propuesta para la composición de la arena verde de moldeo**

Presentada la composición alternativa para la arena verde de moldeo es necesario hacer un seguimiento de control de la misma, principalmente para asegurar los resultados del estudio realizado. Se sugiere por tanto:

- Mantener la materia prima con la que se trabaja
- Realizar las pruebas de laboratorio para el control de lotes de arena preparada bajo los parámetros presentados en el literal 4.7.2.1 para reducir errores de medición. Realizar por lo menos dos pruebas para comprobación de resultados, esto debido a la confiabilidad de los equipos y de la muestra aleatoria que fue sometida a medición
- Realizar seguimientos de las propiedades de la arena bajo tablas de control de calidad
- Realizar seguimientos periódicos de las condiciones del sistema de arenas

A continuación se presentan propuestas adicionales presentadas en (Ramirez, 2006) y que pueden ser adoptadas para realizar un mejor seguimiento de la arena verde con la que se trabajará dada la composición alternativa:

- Realizar evaluaciones en la recepción de materias primas
  - Mantener el proveedor de materia prima que asegure calidad del producto y a buenos costos
  - Pruebas de granulometría para la arena nueva, tamaño y forma.

- Pruebas de contenidos de arcilla para la arena nueva: De preferencia no contar con mas del 2% de arcilla
- Realizar pruebas de bentonitas
  - Análisis de composición química
  - Pruebas de hinchabilidad
- Realizar controles en la preparación de arenas de moldeo (propiedades de la arena)
- Realizar controles periódicos del estado de la arena verde para
  - Pruebas de contenidos de arcilla o polvos finos (Cada 30 días)
  - Pruebas de granulometría o tamaño de grano (Cada 30 o 60 días)
  - Realizar pruebas de arcilla activa para verificar (Cada 30 días)
- Realizar mantenimientos continuos de molinos de mezclado
- Incorporar equipos o soluciones para procesos de enfriamiento y desterronamiento de arena, separadores magnéticos, extractores de polvos finos

(Ramirez, 2006).

## **6.2 Propuesta para el seguimiento y control de los procesos de mezclado de arena verde de fundición basados en la composición alternativa.**

En esta sección se presenta la construcción de cartas de control para mediciones individuales o IMR como las presentadas en el literal 2.6.2.3, las cuales servirán para realizar seguimientos en el tiempo a las propiedades de la

arena verde, una vez que se ha propuesto la composición alternativa para la misma.

El objetivo principal de las cartas de control IMR será, el de brindar información acerca de la variabilidad del proceso y de la consistencia del mismo. De modo que, si llegaran a existir irregularidades o problemas en la preparación de la arena verde y no se están cumpliendo con los parámetros de trabajo deseados, las cartas de control serán los medios que adviertan este hecho y sugieran realizar acciones correctivas para controlar o volver a estabilizar la/s propiedad de la arena verde.

En este contexto, a continuación se presenta la construcción de las tablas de control IMR para cada una de las propiedades de la arena. La construcción de las cartas de control IMR fue realizada con la información recogida desde el mes de Febrero 2012, del laboratorio de JCR Fundiciones que ya trabaja con la composición alternativa de arena verde. Cabe indicar que, la composición alternativa fue puesta en marcha en producción desde el mes de Enero 2012, sin embargo, recién se ha registrado información desde el mes de Febrero 2012, lo que también sugiere que los datos recogidos sean ya de un proceso más estable que el de Enero 2012.

#### **Justificación del uso de cartas IMR:**

Se usaron las cartas de control para mediciones individuales o IMR dado a que, el proceso se ajusta a la realidad y al uso de estas cartas, como se mencionó en el literal 2.6.2.3.

Inicialmente se quiso construir cartas de control  $\bar{x}$ , cartas que también son validas para este proceso y un más robustas que IMR, sin embargo se tuvo el

inconveniente con la formación de subgrupos racionales y la cantidad de datos recogidos. Por lo que, las cartas IMR se convirtieron en la mejor opción para este caso de estudio.

### 6.2.1 Carta de control para mediciones individuales de la permeabilidad de la arena verde

Para calcular los límites de control IMR para la permeabilidad se siguieron los lineamientos presentados en el literal 2.6.2.3 y se usaron los datos presentados en la tabla N. 23, que como se mencionó, son los datos recogidos por la supervisión de JCR Fundiciones en el mes de Febrero 2012.

A continuación se presenta en la figura N. 47, la carta de control IMR para la permeabilidad obtenida con los datos mencionados.

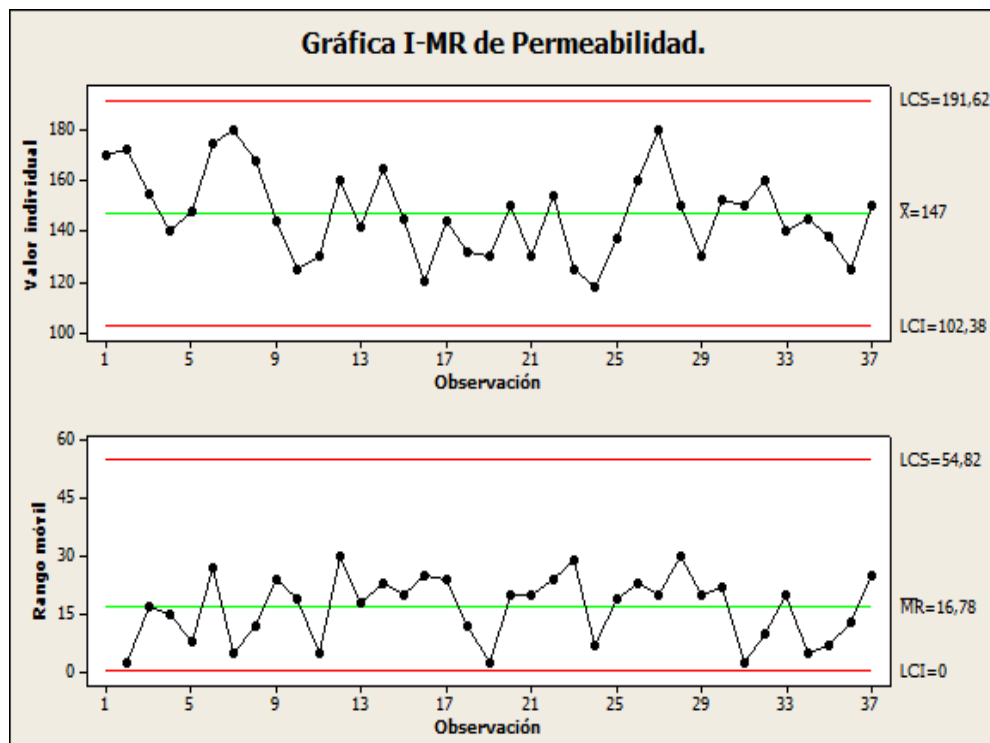


Figura N.47.- Tabla de control para la permeabilidad de la arena verde de moldeo. (Elaboración propia).



De acuerdo con lo lineamientos del literal 2.6.2.4, la gráfica de control para la permeabilidad media y su rango móvil no indican puntos atípicos, o se encuentran fueran de los límites de control, ni tampoco se observan rechazados por las pruebas de adecuación. Por lo tanto, se puede establecer a esta carta de control para las mediciones individuales de la permeabilidad.

De este modo, los límites de control que quedarían de forma inicial para realizar el seguimiento de la permeabilidad promedio de la arena verde son:

**Límite superior = 191,62**

**Media =147**

**Limite inferior = 102,38**

### **6.2.2 Carta de control para mediciones individuales de la resistencia en verde de la arena**

Para calcular los límites de control IMR para la resistencia se siguieron los lineamientos presentados en el literal 2.6.2.3 y se usaron los datos presentados en la tabla N. 23, que como se mencionó, son los datos recogidos por la supervisión de JCR Fundiciones en el mes de Febrero 2012.

A continuación se presenta en la figura N. 48 la carta de control IMR para la resistencia obtenida con los datos mencionados.

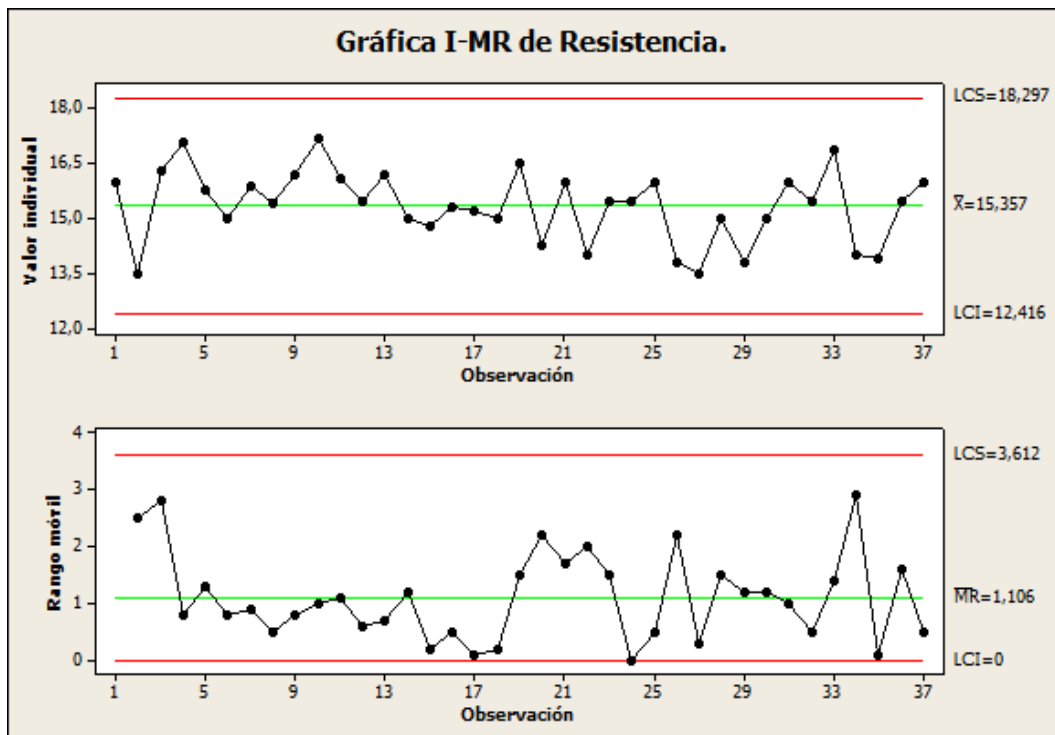


Figura N.48.- Tabla de control para mediciones individuales de la resistencia de la arena verde. (Elaboración propia).

De acuerdo con lo lineamientos del literal 2.6.2.4, la gráfica de control para la resistencia media y su rango móvil no indican puntos atípicos, o se encuentran fueran de los límites de control, ni tampoco se observan rechazados por las pruebas de adecuación. Por lo tanto, se puede establecer a esta carta de control para las mediciones individuales de la resistencia.

De este modo, los límites de control que quedarían de forma inicial para realizar el seguimiento de la resistencia promedio de la arena verde son:

**Límite superior = 18,3**

**Media =15,4**

**Limite inferior = 12,5**

### 6.2.3 Carta de control para mediciones individuales del porcentaje de humedad de la arena verde.

Para calcular los límites de control IMR para el porcentaje de humedad se siguieron los lineamientos presentados en el literal 2.6.2.3 y se usaron los datos presentados en la tabla N. 23, que como se mencionó, son los datos recogidos por la supervisión de JCR Fundiciones en el mes de Febrero 2012.

A continuación se presenta en la figura N. 49 la carta de control IMR para el porcentaje de humedad obtenida con los datos mencionados.

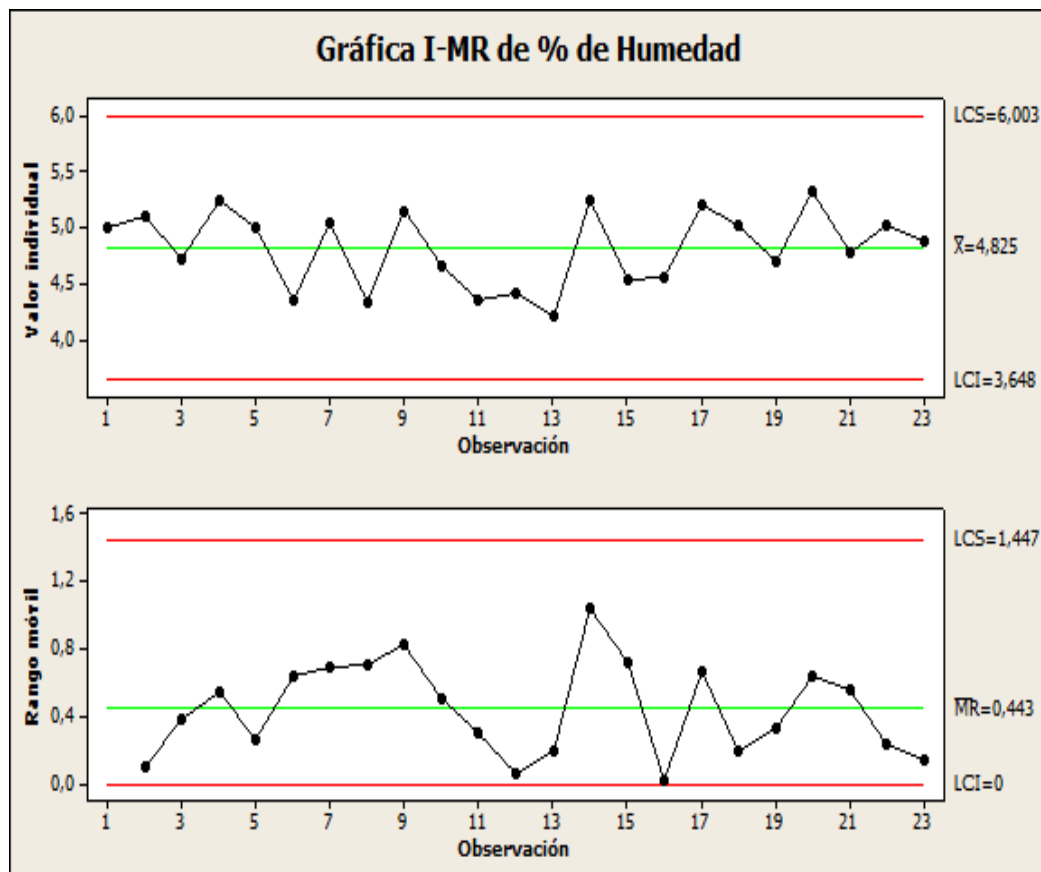


Figura N.49.- Tabla de control para el porcentaje de humedad de la arena verde. (Elaboración propia).

De acuerdo con lo lineamientos del literal 2.6.2.4, la gráfica de control para el porcentaje de humedad medio y su rango móvil no indican puntos atípicos, o se encuentran fueran de los límites de control, ni tampoco se observan rechazados por las pruebas de adecuación. Por lo tanto, se puede establecer a esta carta de control para las mediciones individuales de porcentaje de humedad.

De este modo, los límites de control que quedarían de forma inicial para realizar el seguimiento del porcentaje de humedad promedio de la arena verde son:

**Límite superior = 6%**

**Media =4,8%**

**Limite inferior = 3,7 %**

## 7. CAPÍTULO VII: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 7.1 CONCLUSIONES

- Se analizó y contrastó con la literatura de fundiciones, la preparación de la arena verde, sus características principales, métodos de medición, etc., todos con la finalidad de construir un estudio robusto para las necesidades específicas de JCR Fundiciones.
- Se identificaron los componentes, dosificaciones, y las propiedades de la arena verde de mayor interés para JCR Fundiciones. Estas ayudaron para la determinación de la composición alternativa y permitieron aprovechar al máximo los recursos de laboratorio de la empresa.
- Se logró estructurar diferentes composiciones para la arena verde bajo la metodología de diseño de experimentos, y se realizó la medición de resultados respectivos con la ayuda de los equipos de laboratorio de la empresa.
- La realización de experimentos tuvo que ser reducida debido a la cantidad de limitaciones y recursos que se tenían que destinar a la investigación. Por ello, el estudio no arrojó resultados completos, sino que, por el momento son tentativos. Sin embargo, los resultados son válidos y pueden servir para la realización de nuevos estudios con la arena verde de moldeo.
- Los resultados de la experimentación se realizaron con el promedio de cada variable de respuesta. Se usó el promedio, ya que cada tratamiento realizado ofrecía la oportunidad de realizar repeticiones dentro del mismo. Este hecho condujo a que las respuestas puedan ser verificadas o validadas, y que a su

vez, en el modelo experimental expliquen el error generado por el experimentador y la confiabilidad de los equipos de medición.

- Se halló una composición alternativa para la arena verde de JCR Fundiciones, que presenta propiedades de trabajo deseables y que por su naturaleza sugieren reducir los defectos por arena en las piezas finales. De los datos obtenidos con la nueva composición, se logró mejorar los niveles de permeabilidad en un 107%, la resistencia en verde en un 20%, y el porcentaje de humedad en un 5%, todo esto comparado con la situación del año 2011.
- La composición alternativa de arena verde en un turno de ocho horas, produce 6 lotes más que la composición del año 2011. Esto se debe a que, los lotes de la composición alternativa se realizan en menos tiempo. Lo que representa un aumento en producción del 6,25%.
- Con la composición sugerida se redujo el costo de producción de un lote de arena verde de \$2,73 a \$2,44. Es decir, \$0,29 menos por lote. Lo que representa un ahorro de aproximadamente \$16 dólares por turno de trabajo o \$32 dólares por día de trabajo.
- Se ofreció una serie de propuestas para el seguimiento y control de la composición de la arena verde, estas servirán para mejorar las condiciones del sistema de arenas y mejorarán las condiciones de trabajo anteriores al estudio realizado.
- Se logró mejorar las condiciones de preparación de arena verde en JCR Fundiciones. A pesar de que las propiedades en el año 2011 no eran malas, se las pudo mejorar y se dio más énfasis al control y seguimiento de los procesos de preparación.

- La mezcla alternativa no solo permitió mejorar propiedades de la arena, sino que inclusive se lograron disminuir costos, por las reducciones de bentonita y carbonilla que se realizaron. Y a pesar de que, la composición alternativa indica aumentos en arena nueva, esto no es un inconveniente en costos y sugiere ser importante a futuro para cuando ésta se convierta en arena de reciclaje ayude a refrescar al sistema de la saturación de polvos o finos de fundición que empeoran la calidad de la arena con la que se trabaja.

## 7.2 RECOMENDACIONES

- Revisar y realizar con el mayor orden y precisión posible, los procedimientos de medición y control de las propiedades de la arena verde de moldeo explicados a lo largo del literal 4.7.2.1. Ya que, en la toma de resultados se encuentra implícito el error del experimentador y la confiabilidad de los equipos de medición, por tanto para las mediciones futuras y para aprovechar el control estadístico de calidad se propone que la persona encargada de realizar las mediciones este al tanto de esto.
- Realizar seguimientos periódicos del sistema de arena presentados a lo largo del capítulo VI, ya que facilitará que las condiciones de trabajo sean las apropiadas para seguir obteniendo la mezcla de arena alternativa.
- De requerir estudios más robustos para la preparación de la arena verde de moldeo se puede probar la metodología estadística de mezclas, una vez que ya se sabe que factores realmente impactan sobre las propiedades de la arena. Esta metodología puede ser mas precisa que la presentada en este estudio, aunque en la realidad de las composiciones de arena verde, no se requiere de una exactitud intensiva de cada componente para cumplir con los parámetros de trabajo deseados.
- Se deben realizar revisiones periódicas para las tablas de control propuestas para cada propiedad de la arena verde. Las cartas de control no son únicas y deben revisarse. Además es posible aplicar otras técnicas para hacer más robustos a los límites de control. Una opción puede ser el uso de cartas  $\bar{x}$  con subgrupos como lo presentado en el literal 2.6.2.1



- Para mantener resultados similares en el tiempo para la composición alternativa de JCR Fundiciones, se sugiere mantener la materia prima actual que es usada en la preparación de arena verde, ya que los resultados de la arena dependerán en gran medida de ello. Sin embargo, de requerir cambios en la materia prima se deberá vigilar como se comporta el proceso con la introducción de elementos diferentes. Las cartas de control IMR pueden servir en este hecho, y de requerir ajustes será necesaria la revisión de los límites de control.
- En el caso de que, se registren problemas en la preparación de la arena verde, es decir, se evidencien puntos fuera de control en las cartas IMR, y apunten la necesidad de ajustar al proceso, se sugiere revisar las ecuaciones de predicción de las propiedades de la arena verde y realizar los ajustes necesarios revisando las adiciones que se requiera para alcanzar los niveles deseados de la propiedad en cuestión.
- Se recomienda realizar capacitaciones o reuniones con el personal de preparación de arena verde para detallar aspectos importantes como lo son: el orden de adiciones de componentes, la importancia que tiene el cumplimiento del tiempo de mezclado, el mejor uso de los molinos de mezclado y zaranda de arena, y la importancia de garantizar que la arena de reciclaje que es usada este libre de impurezas pesadas para no repercutir en el mezclado de la arena.
- En el afán de mejorar las propiedades de la arena verde de JCR Fundiciones se recomienda que los equipos de mezclado, en especial el molino garantice un funcionamiento óptimo, aquí el mantenimiento y su buen uso es prioritario. Por tanto, el personal de preparación de arena verde deberán ser los principales responsables de dar aviso a sus superiores de irregularidades o problemas con el molino de mezclado.

### 7.3 BIBLIOGRAFÍA

1. Abril, E. (1956). *Metalurgia, Técnica y Fundición*. Buenos Aires: Editorial Alsina.
2. Altmajer, D. (2004). *Tesis doctoral*. Obtenido de Formulación de detergentes Biodegradables: Ensayos de lavado: <http://0-hera.ugr.es/adrastea.ugr.es/tesisugr/15847093.pdf>
3. Álvarez. (26 de Abril de 2011). *expresión en la ingeniería*. Obtenido de [http://ocw.upm.es/expresion-grafica-en-la-ingenieria/ingenieria-grafica-metodologias-de-diseno-para-proyectos/Teoria/PDFs/3\\_INFORMACION\\_TECNICA/3.2\\_ACABADOS\\_SUPERFICIALES\\_DE\\_PROTECCION\\_FUNCIONALES\\_Y\\_DECORATIVOS/3-2-1\\_acabados\\_rugosidad.pdf](http://ocw.upm.es/expresion-grafica-en-la-ingenieria/ingenieria-grafica-metodologias-de-diseno-para-proyectos/Teoria/PDFs/3_INFORMACION_TECNICA/3.2_ACABADOS_SUPERFICIALES_DE_PROTECCION_FUNCIONALES_Y_DECORATIVOS/3-2-1_acabados_rugosidad.pdf)
4. Anderson, D. (2008). *Estadística para administración y economía*. Mexico D.F: Cengage Learning.
5. Borrás, V., & Ferrer, C. (2000). *Tecnología de materiales*. Valencia: Editorial Universidad Politécnica de Valencia.
6. Box, G., Hunter, S., & Hunter, W. (2008). *Estadística para investigadores: Diseño, innovación y descubrimiento*. Barcelona: Editorial Reverté.
7. Coello, G. (2006). *Ensayos de arenas y arcillas de fundición*. Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del litoral.
8. Correa, M., Ramirez, M., & Rodriguez, C. (2006). *Factores que afectan el acabado superficial los procesos de mecanizado: Técnicas de análisis y modelos*. Obtenido de Ceautomatica: <http://www.ceautomatica.es/old/actividades/jornadas/XXV/documentos/75-arlencicor.pdf>

9. Crespo, M. D. (2003). *Solados y Alicatados*. San Vicente: Editorial club Universitario.
10. Díaz, A. (2009). *Diseño estadístico de experimentos*. Antioquia: Editorial Universidad de Antioquía.
11. Echeverría, R. (2002). *Universidad Nacional de Comahue*. Obtenido de Defectología: [http://www.sistendca.com/DOCUMENTOS/Defectologia\[1\].pdf](http://www.sistendca.com/DOCUMENTOS/Defectologia[1].pdf)
12. Erazo, C., Flores, S., & Monroy, Á. (Octubre de 2005). *Determinación de la composición óptima de la arena de fundición empleada para fabricar piezas de hierro y evaluación de propiedades*. Obtenido de [http://cef.uca.edu.sv/descargables/tesis\\_descargables/composicion\\_optima\\_arena\\_fundicion.pdf](http://cef.uca.edu.sv/descargables/tesis_descargables/composicion_optima_arena_fundicion.pdf)
13. Foundry. (02 de 11 de 2011). *Dietert Foundry Testing Equipments*. Obtenido de <http://dietertlab.com/products.html>
14. Fundidores, S. A. (2010). *Fundamentos en arena verde*. Illinois: Des Plaines.
15. Gerling, H. (1979). *Moldeo y conformación*. Barcelona: Editorial Reverte S.A.
16. Groover, M. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna: Materiales, Procesos y sistemas*. Naucalpán de Juárez: Prentice-Hall Hispanoamericana.
17. Gutiérrez. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. Mexico D.F: McGraw-Hill.
18. Hernández, B. (2001). *Técnicas estadísticas de investigación social*. Madrid: Díaz de Santos.
19. Hinojosa, T. C. (2006). *PROPIEDADES DE FUNDICIÓN PARA LA MANUFACTURA DE PIEZAS COLADAS DE COMPOSITO Al-Si/SiCp PARA APLICACIONES DE DESGASTE*. Obtenido de materiales-sam: <http://www.materiales-sam.org.ar/sitio/biblioteca/CONAMET->

20. Kalpakjian, S., & Schmid, S. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Mexico D.F: Pearson Educación.
21. Kuehl, R. (2001). *Diseño de experimentos*. Mexico D.F: International Thomson.
22. Merino, S. (2000). *Importancia de los ensayos de compactibilidad, resistencia en verde y humedad en mezclas de moldeo*. Obtenido de Minería & Geología:  
[http://scholar.google.es/scholar?hl=es&q=control++de+la+arena+verde&lr=&as\\_ylo](http://scholar.google.es/scholar?hl=es&q=control++de+la+arena+verde&lr=&as_ylo)
23. Montgomery, D. (2004). *Control estadístico de la calidad*. Mexico D.F: Limusa Wiley.
24. Montgomery, D. (2007). *Diseño y análisis de experimentos*. México D.F: Limusa Wiley, 2007.
25. Morral, F., Jimeno, E., Molera, & P. (2004). *Metalurgia General*. Barcelona: Editorial Reverté S.A.
26. Ramirez, J. (2006). *Curso: Control de arena en verde y pruebas de laboratorio*. Bogota: Siderurgica Colombina S.A.
27. Rodriguez, J., Castro, L., & Del real, J. C. (2006). *Procesos industriales para materiales metálicos*. Madrid : Vision Net.
28. Sánchez. (2011). *Propiedades de las arenas*. Obtenido de dspace:  
<http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/762/2/CAPITULO%201.pdf>
29. Soot. (2000). *Fundamentos en la preparación y control de la arena verde*. Obtenido de Simpsonsogroup:  
<http://www.simpsongroup.com/tech/Fundamentalsofsandcontrolspanish.pdf>

## **8. CAPITULO VIII: ANEXOS**

### **8.1. Anexos**

#### **Anexo 1. Instrucciones del flujograma para la preparación de arena verde de JCR Fundiciones**

##### ***Instrucciones para la preparación de la arena verde de moldeo:***

I1: El operador de arena se encargará de abastecer de arena de reciclaje a la zaranda para su posterior tamizamiento. El operador además debe percatarse de no enviar residuos sólidos que son recogidos en producción, además debe estar pendiente de no alimentar la zaranda, si es que, la arena con la que se trabaja presenta mucha húmeda o aun se encuentra caliente.

I2: El operador del molino se encargará de alimentar con 10 kilos de arena nueva a la canastilla de arena. Esta canastilla también se encontrará recibiendo arena reciclada tamizada proveniente de la zaranda de arena.

I3: El operador de arena debe trasladarse hacia la zaranda una vez esta haya sido apagada, para proceder a limpiar los huecos por donde se tamiza a la arena de reciclaje ya que éstos tienden a taparse con su uso. También el operador de arenas debe percatarse de que la zaranda se halle libre de impurezas solidas o residuos que limiten el funcionamiento de la zaranda en las siguientes cargas que se realicen al molino de mezclado

I4: El operador de molino se encargará de añadir 4 kilos de bentonita a la arena de reciclaje que fue recientemente depositada en el molino de mezclado

I5: El operador de molino se encargará de añadir 2 kilos de carbonilla a la arena de reciclaje que fue recientemente depositada en el molino de mezclado

I6: El operador de molino se encargará de añadir 10 litros de agua a toda la mezcla de componentes que se hallan ya en el molino de mezclado. En este punto el operador

debe ser cuidadoso de verificar la composición o consistencia de la arena que se está preparando.

17: El operador del molino deberá verificar la consistencia de la preparación de la arena. Esta actividad es subjetiva pero se espera que el operador tenga la experiencia necesaria para reconocer un estado apropiado de la arena que se acaba de preparar.

**Anexo 2.**

**a. Resultados del estudio granulométrico y de arcillas de las arenas del sistema de JCR Fundiciones en laboratorios de suelos de la Universidad Politécnica del ejército ESPE**



**ESPE**  
 ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO  
 CAMINO A LA EXPERIENCIA

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y ENSAYO DE MATERIALES				
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO				
25/11/2011	CARACTERIZACIÓN ARENA BLANCA	PROCESO No. 001		
CLIENTE: SR. SEBASTIAN DIAZ				
MUESTRA No.				
TAMANCES	PESO RETENIDO (g)	RETENIDO ACUMULADO	% RETENIDO ACUMULADO	% ACUMULADO PASA
No. 6	0.00	0.00	0	100
No. 12	3.45	3.45	0	100
No. 20	29.31	32.76	4	96
No. 30	49.58	82.34	11	89
No. 40	152.57	234.91	32	68
No. 50	199.16	434.07	59	41
No. 70	167.11	601.18	82	18
No. 100	83.39	684.57	93	7
No. 140	30.60	715.17	97	3
No. 200	9.00	725.07	98	2
No. 270	3.30	728.37	99	1
Bandeja	7.87	736.24	100	
PESO INICIAL DE LA MUESTRA: (g)		736.24		



Porcentaje de arcilla :	16 del total de la muestra
ENSAYO: JUAN HARO	VERIFICÓ

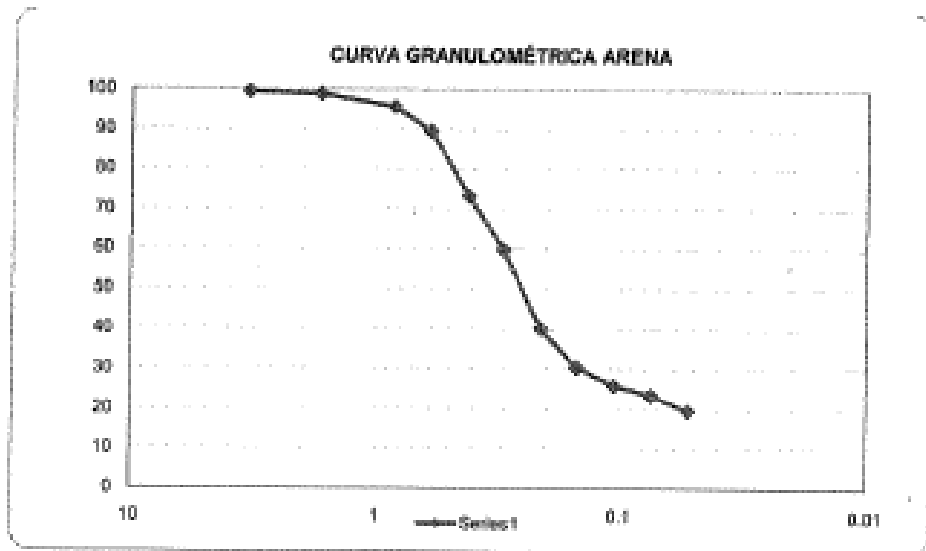
Campus Politécnico Av. Gral. Ramón Estrella s/n. Telfs: (593-2)2334950/ 2336 855 Fax: (593-2) 2334 952  
 e-mail: marketing@espe.edu.ec Web site: http://www.espe.edu.ec  
 P.O.BOX. 171-5-231-B QUITO  
 Sangolquí - Ecuador



# ESPE

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO  
CAMINO A LA EXCELENCIA

LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y ENSAYO DE MATERIALES				
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO				
25/11/2011 CARACTERIZACIÓN ARENA NEGRA			PROCESO No. 601	
CLIENTE: SR. SEBASTIAN DIAZ				
MUESTRA No.				
TAMICES	PESO RETENIDO (g)	RETENIDO ACUMULADO	% RETENIDO ACUMULADO	% ACUMULADO PASA
No. 6	3.51	3.51	1	99
No. 12	3.98	7.49	1	99
No. 20	22.84	30.13	4	96
No. 30	41.09	71.22	11	89
No. 40	108.73	179.95	27	73
No. 50	90.51	270.46	40	60
No. 70	131.96	402.42	60	40
No. 100	66.27	468.69	70	30
No. 140	29.69	498.38	74	26
No. 200	15.71	514.09	76	24
No. 270	26.25	540.34	80	20
Bandeja	132.01	672.35	100	
PESO INICIAL DE LA MUESTRA: (g)			672.35	



Porcentaje de arcilla : 16% del total de la muestra

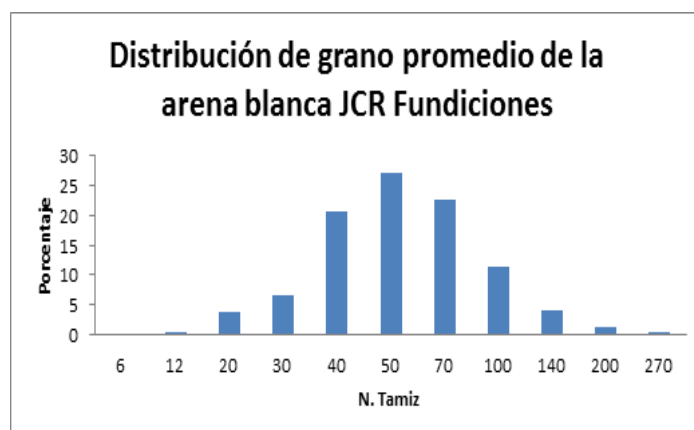
ENBAYO: JUAN PARD	CALCULO: Ing. Hugo Bonifaz	VERIFICADO: 
----------------------	-------------------------------	-----------------

Campus Politécnico Av. Gral. Rumiñahui s/n. Telfs: (593-2) 2334 652 / 2334 653 / (593-2) 2334 662  
e-mail: marketing@espe.edu.ec Web site: http://www.espe.edu.ec  
P.O. BOX. 171-5-231-8 QUITO  
Sangolquí - Ecuador

b. Resultados del estudio granulométrico y de arcillas de las arenas del sistema de JCR Fundiciones completo (Elaboración Propia) con la información proporcionada del análisis de la Universidad Politécnica del Ejército ESPE.

### ANÁLISIS DE RESULTADOS MUESTRA DE ARENA BLANCA O ARENA NUEVA

<u>Muestra Arena Blanca</u>				
Tamaño de la muestra: 736,24 gr				
Contenido de arcillas AFS: 7,37gr ó 1,001%				
Granos de arena: 728,87 gr				
TAMIZ	PESO RETENIDO (g)	% P. RETENIDO	ALFA	ALFA %
6	0	0	3	0
12	3,45	0,468597197	5	2,34298598
20	29,31	3,981038792	10	39,8103879
30	49,58	6,734217103	20	134,684342
40	152,57	20,72286211	30	621,685863
50	199,16	27,05096164	40	1082,03847
70	167,11	22,6977616	50	1134,88808
100	83,39	11,32646963	70	792,852874
140	30,6	4,156253396	100	415,62534
200	9,9	1,344670216	140	188,25383
270	3,3	0,448223405	200	89,6446811
Bandeja	0,5	0,067912637	300	20,3737912
TOTAL	728,87	98,99896773	968	4522,20064
Indice de finura AFS= 4822,51032/98,99				
Indice de finura AFS= 45,68				



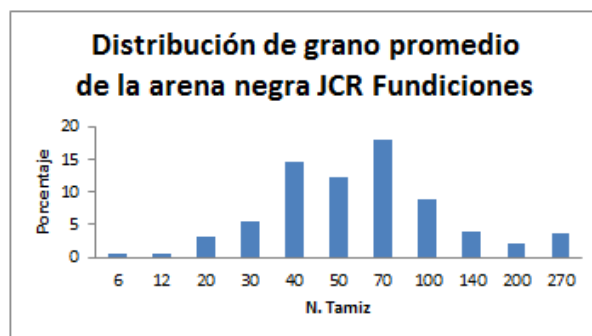
El porcentaje de arcilla para la muestra de arena blanca es de: 1%



El índice de finura AFS para la muestra de arena blanca es de 45,68. Este valor ubica a la arena dentro de una calificación de tamaño MEDIO, es decir que los granos están en el rango de 0,25 a 0,5 mm. La suma de porcentaje de arena retenida entre el tamiz 40, 50, 70 y 100, siendo el tamiz 50 el que más arena retiene, es de 27,32%.

### ANÁLISIS DE RESULTADOS MUESTRA DE ARENA NEGRA O ARENA DE RECICLAJE

<b>Muestra Arena Negra</b>				
Tamaño de la muestra: 672,35 gr				
Contenido de arcilla AFS: 100,85 gr ó 15%				
Granos de arena: 571,49 gr				
TAMIZ	PESO RETENIDO (g)	% P. RETENIDO	ALFA	ALFA %
6	3,51	0,476746713	3	1,430240139
12	3,98	0,540584592	5	2,70292296
20	22,64	3,075084212	10	30,75084212
30	41,09	5,581060524	20	111,6212105
40	108,73	14,76828208	30	443,0484625
50	90,51	12,29354558	40	491,7418233
70	131,96	17,92350321	50	896,1751603
100	66,27	9,001140932	70	630,0798653
140	29,69	4,032652396	100	403,2652396
200	15,71	2,13381506	140	298,7341084
270	26,25	3,565413452	200	713,0826904
Bandeja	31,15	4,230957297	300	1269,287189
TOTAL	571,49	77,62278605	968	5291,919754
Indice de finura AFS=		4822,51032/77,6		
Indice de finura AFS=		68,17		



El porcentaje de arcilla para la muestra de arena negra es de: 15%

El índice de finura AFS para la muestra de arena negra es de 68,17. Este valor ubica a la arena dentro de una calificación de tamaño MEDIO con tendencia FINO, es decir que los granos están en el rango de 0,1 a 0,25 mm. Y de 0,25 a 0,5 mm. La suma de porcentaje de arena retenida entre el tamiz 40, 50, y 70, siendo el tamiz 70 el que más arena retiene, es de 23,09%.

## ANEXO N.3: ESTADO ACTUAL DE LA ARENA VERDE DE MOLDEO DE JCR FUNDICIONES

DATOS CONSOLIDADOS DE LAS PROPIEDADES DE LA ARENA VERDE DE MOLDEO ENTRE JUNIO Y NOVIEMBRE 2011

PROPIEDADES DE LA ARENA VERDE DE MOLDEO DE JCR Fundiciones				
Datos registrados entre Junio 2011-Noviembre 2011				
No. Muestra	Permeabilidad mmH2O	Resistencia PSI	Humedad %	Compactibilidad %
1		14	4,94	
2		12,6	5,8	
3		14,5	5,2	
4		12,7	5,06	
5		12	5,1	
6		15,8	5,1	
7		17,8	5,56	
8		13,8	5,04	
9		13,9	4,44	
10		14,8	5,3	
11		12,8	5,84	
12		15,7	4,78	
13		14,5	4,48	
14		13,4	5,86	
15		12,2	5,18	
16		12	5,6	
17		15,7	5,26	
18		11,5	5,34	
19		14,5	4,96	
20		11	4,54	
21		10,5	5,43	
22		15,2	5,5	
23		15,6	5,14	
24		11,5	5,8	
25		14,2	5,1	
26		13,2	4,45	
27		14,5	5,32	
28		12,3	5,54	
29	88	11,2	5,01	35
30	82	8,5	4,03	30
31	75	7,8	4,1	30
32	80	9,3	4,8	35
33	77	15,2	5,58	25
34	80	16	5,8	40
35	65	15,8	5,6	40
36	90	11,2	4,02	34
37	66	10,6	4,08	45
38	88	13,1	4,5	40
39	79	17,2	6,2	40
40	93	16	4	35
41	71	13,7	6,2	35
42	90	11,3	5,5	40
43	88	11,9	4,94	35
44	91	11,3	5,6	35
45	68	13,2	4,52	40
46	85	11,2	5,5	30
47	65	10	3,58	35
48	75	11	3,64	30
49	70	10,9	3,74	30
50	80	8,5	3,14	28
51	50	11,2	3,94	37
52	86	11,5	3,86	36
53	60	12,5	4,1	40
54	58	12,45	3,68	40
55	60	13	3,08	43
56	59	12,2	3,74	40
57	68	12,4	3,46	40
58	61	12,9	3,44	39
59	60	13,4	3,82	40
60	59	13,8	4,02	40
61	70	11,4	3,7	35
62	60	12,6	4,04	40
63	49	13,6	3,38	40
64	60	10,4	3,48	37
65	70	13,1	3,6	40
66	67	13,1	3,24	40
67	60	10,9	3	35
68	58	12,9	3,66	40
69	55	13,4	3,7	42
70	73	12,8	3,94	42
<b>PROMEDIO</b>	<b>71,17</b>	<b>12,81</b>	<b>4,61</b>	<b>36,98</b>

## ANEXO 4.- ESTRUCTURA DEL DISEÑO FACTORIAL UN OCTAVO PARA LA EXPERIMENTACIÓN DE LA FORMULACIÓN DE LA MEZCLA DE ARENA VERDE DE MOLDEO

### Diseño factorial fraccionado

Factores: 6    Diseño de la base:            6; 8    Resolución: III  
Corridas: 8    Réplicas:                                    1    Fracción:    1/8  
Bloques: 1    Puntos centrales (total):            0

\* NOTA \* Algunos efectos principales se confunden con interacciones de dos factores.

Generadores del diseño:  $D = AB; E = AC; F = BC$

Relación definitoria:  $I = ABD = ACE = BCF = BCDE = ACDF = ABEF = DEF$

Estructura de alias

$I + ABD + ACE + BCF + DEF + ABEF + ACDF + BCDE$

$A + BD + CE + BEF + CDF + ABCF + ADEF + ABCDE$

$B + AD + CF + AEF + CDE + ABCE + BDEF + ABCDF$

$C + AE + BF + ADF + BDE + ABCD + CDEF + ABCEF$

$D + AB + EF + ACF + BCE + ACDE + BCDF + ABDEF$

$E + AC + DF + ABF + BCD + ABDE + BCEF + ACDEF$


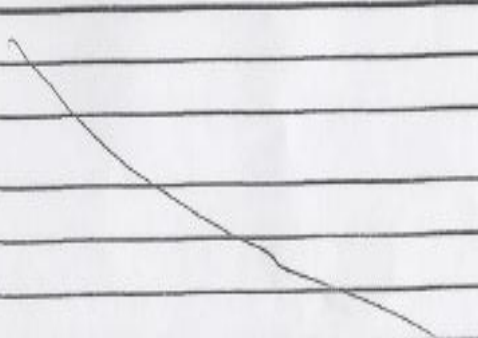

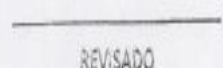
$F + BC + DE + ABE + ACD + ABDF + ACEF + BCDEF$

AF + BE + CD + ABC + ADE + BDF + CEF + ABCDEF

Tabla de diseño (aleatorizada)

Corrida	A	B	C	D	E	F
1	+	-	+	-	+	-
2	-	-	+	+	-	-
3	-	+	+	-	-	+
4	-	+	-	-	+	-
5	-	-	-	+	+	+
6	+	+	-	+	-	-
7	+	+	+	+	+	+
8	+	-	-	-	-	+

**ANEXO 5.- DATOS DE PRUEBAS DE ARENA CON LA COMPOSICIÓN ALTERNATIVA. DATOS RECOGIDOS EN FEBRERO 2012.**

 ISO 9001:2008		SISTEMA DE GESTION DE CALIDAD				Revisión: N° 1	
		PROPIEDADES ARENA DE MOLDEO				Fecha: 08-feb-12	
						Hoja: 1 de 1	
FECHA	HORA	BACHE MOLINO	RESISTENCIA	PERMEABILIDAD	HUMEDAD	DUREZA - MOLDE	
						Tapa 835	Cerco 635
9/02/2012	10:35	23	16	170	3		
	11:40	33	13.5	172	3.6	81	81
	14:55	42	16.3	155	3.8	80	76
	16:00	1 Tuno #2	17.1	150	3.6	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
10/02/2012	8:30	11	15.8	149	4.2	Tapa 835 90/160	Cerco 635 12
	11:20	30	15	175	4	65	83
	15:00	41	15.9	180	4.3	75	80
	16:30	2 Tuno #2	15.4	169	3.8	-	-
	17:00	10 Tuno #2	16.2	154	4.4	-	-
	-	-	-	-	-	-	-
PARAMETROS			14 A 18 P.S.I.	MINIMO 80 L.A.M.	4% A 6%	60 A 90 H.R.B.	
CARGA MOLINO	CANTIDADES	OBSERVACIONES:					
ARENA NUEVA							
ARENA CIRCULACION							
BENTONITA							
CARBONILLA							
AGUA							
 ELABORADO		 REVISADO					



ISO 9001:2008

SISTEMA DE GESTION DE CALIDAD

Revision: N° 1  
Fecha: 08-feb-12  
Hoja: 1 de 1

PROPIEDADES ARENA DE MOLDEO

FECHA	HORA	BACHE MOLINO	RESISTENCIA	PERMEABILIDAD	HUMEDAD	DUREZA - MOLDE			
						Tyga 635-115	Quesera 10"	Tyga 742-115	Carra 635
13/02/2012	8:15	11	17.2	125	3.8				
	10:40	34	16.1	130	4	75	80	75	75
	✓ 12:00	44	15.5	160	4	80	80	75	80
	13:10	46	16.2	142	3.8	80	75	80	75
	16:00	2 Toma #2	16	165	4	70	80	75	70
	✓ 22:00	40 Toma #2	15.8	145	3.8	80	80	-	-
	14/02/2012	8:43	21	15.3	120	5	75	85	Carra 642-400
10:35		33	15.2	124	5	77	82	80	70
✓ 11:45		44	15	132	4.72	80	85	68	72
14:00		55	16.5	130	5.26	85	80	76	75
16:00		2 Toma #2	14.3	150	5	76	77	75	75
✓ 20:00 ✓		32 Toma #2	16 ✓	130 ✓	4.36	75	85	70	
PARAMETROS				14 A 18 P.S.I.	MINIMO 80 L.A.M.	4% A 6%	60 A 90 H.R.-B.		

CARGA MOLINO	CANTIDADES	OBSERVACIONES: Hasta el día 13/02/2012 se realizó las pruebas de humedad
ARENA NUEVA		con 6 minutos de secado y el día 14/02/2012 se empezó el secado de la
ARENA CIRCULACION		arena húmeda con 10 minutos.
BENTONITA		
CARBONILLA		
AGUA		

ELABORADO

REVISADO



ISO 9001:2008

SISTEMA DE GESTION DE CALIDAD

Revision:

Nº 1

PROPIEDADES ARENA DE MOLDEO

Fecha:

08-feb-12

Hoja:

1 de 1

FECHA	HORA	BACHE MOLINO	RESISTENCIA	PERMEABILIDAD	HUMEDAD	DUREZA - MOLDE			
15/02/2012 ✓	9:00	24	14	134	4.34	76	68	70	78
	11:00	38	15.5	125	5.16	68	65	70	78
	11:55	47	15.5	118	4.66	75	70	76	82
	13:10	51	16.	137	4.36	70	76	75	80
	16:00	2 Turno #2	13.8	160	4.42	75	75	78	81
	21:50	45 Turno #2	13.5	180	4.22	80	75	84	
16/02/2012 ✓	8:15	10	14	150	4.56	75	76	72	75
	9:30	19	13.8	130	4.54	75	76	72	75
	16:10	5 #2	15	152	4.56	78	80	78	85
	16:40	7 #2	16	150	5.22	76	80	78	70
	20:00	33 #2	15.5	150	5.00	70	75	80	
	22:30	47 #2	16	140	4.70	77	80	75	
PARAMETROS			14 A 18 P.S.I.	MINIMO 80 L.A.M.	4% A 6%	60 A 90 H.R.B.			

CARGA MOLINO	CANTIDADES	OBSERVACIONES:
ARENA NUEVA	—	La humedad se lo hace con 10 minutos. El día 16/02/2012 se preparó la arena sin bentonita en el turno
ARENA CIRCULACION	—	# 2. En el turno de la mañana se trabajó con 400kg A. Circulacion 40kg arena
BENTONITA	—	nueva, 5.2 Kg de Bentonita 2.6kg de Carbonilla y 4 litros de Agua.
CARBONILLA	—	En el turno # 2 se trabajó con 7.8 Kg de Bentonita
AGUA	—	El día 16/02/2012 no existe reporte de Arena's, mezcla A.C. Noche, Carbonilla 2.6kg y 4 litros de H <sub>2</sub> O


  
ELABORADO


  
REVISADO





ISO 9001:2008

SISTEMA DE GESTION DE CALIDAD

Revision:

Nº 1

PROPIEDADES ARENA DE MOLDEO

Fecha:

08-feb-12

Hoja:

1 de 1

FECHA	HORA	BACHE MOLINO	RESISTENCIA	PERMEABILIDAD	HUMEDAD	DUREZA - MOLDE		
						T <sub>0</sub> PS (35-75)	CONO (40x40)	CONO (20x50)
17/02/2012	9:15	25	14	145	5.34			
	10:40	30	13.5	138	4.78	75	75	70
	✓ 14:00	56	15.5	125	5.02	80	74	75
	16:10	3	16	150	4.88	77	75	80
	-/-					76	75	83
	-/-					78	72	78
20/02/2012								
PARAMETROS			14 A 18 P.S.I.	MINIMO 80 L.A.M.	4% A 6%	60 A 90 H.R.B.		

CARGA MOLINO	CANTIDADES	OBSERVACIONES:
ARENA NUEVA		El primer Bache #25 se le agrego arena nueva a partir del bache 27 se le trabajo sin arena nueva.
ARENA CIRCULACION		En el turno #2 se trabaja normalmente con bentonita.
BENTONITA		
CARBONILLA		
AGUA		

ELABORADO

REVISADO



ISO 9001:2008

SISTEMA DE GESTION DE CALIDAD

Revision: N° 1

PROPIEDADES ARENA DE MOLDEO

Fecha: 08-feb-12

Hoja: 1 de 1

FECHA	HORA	BACHE MOLINO	RESISTENCIA	PERMEABILIDAD	HUMEDAD	DUREZA - MOLDE			
20-02-12	08:50 pm	36	13,2	130	4,82%	T635	830 830	863	840 840
	✓ 09:50 pm	43	16,4	132	5,08%	82	80	81	77
PARAMETROS			14 A 18 P.S.I.	MINIMO 80 L.A.M.	4% A 6%	601904.R.B			

CARGA MOLINO	CANTIDADES	OBSERVACIONES:
ARENA NUEVA		
ARENA CIRCULACION		
BENTONITA		
CARBONILLA		
AGUA		

ELABORADO

REVISADO