



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial

**CONTROL ESTADÍSTICO DE CALIDAD EN LA ELABORACIÓN  
DE PIEZAS DE HIERRO FUNDIDO**

**DANILO JOSÉ GIL LEMUS**

Asesorado por Ing. Hugo Leonel Ramírez Ortiz

GUATEMALA, AGOSTO DE 2004

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CONTROL ESTADÍSTICO DE CALIDAD EN LA ELABORACIÓN  
DE PIEZAS DE HIERRO FUNDIDO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
POR

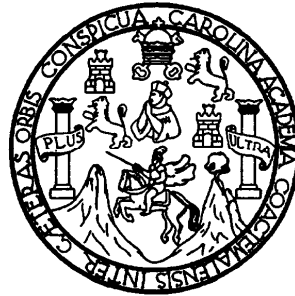
**DANILO JOSÉ GIL LEMUS**

ASESORADO POR ING. HUGO LEONEL RAMÍREZ ORTIZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE  
**INGENIERO MECÁNICO INDUSTRIAL**

GUATEMALA, AGOSTO DE 2004

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
VOCAL I	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL II	Lic. Amahán Sánchez Álvarez
VOCAL III	Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV	Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V	Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO	Ing. Sydney Alexander Samuels Milson
EXAMINADOR	Inga. Sigrid Alitza Calderón de De León
EXAMINADOR	Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Ing. Pedro Enrique Kubes Zacek
SECRETARIO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **CONTROL ESTADÍSTICO DE CALIDAD EN LA ELABORACIÓN DE PIEZAS DE HIERRO FUNDIDO**

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Industrial con fecha 20 de noviembre de 2003.

**Danilo José Gil Lemus**

## **ACTO QUE DEDICO**

***A mi Salvador, Jesucristo,***

quien merece todo el honor y la gloria.

## **AGRADECIMIENTOS**

***A mis padres: Danilo y Virginia,***

por su ejemplo y el amor que siempre me han dado.

***A mis hermanos: Masiel, Sergio y Eduardo,***

por todo su cariño.

***A mis abuelos: Segundo, Olga, Salvador y Juana,***

por su cariño incondicional y su enorme confianza en mí.

***A mis tíos y tías,***

por el aliento y consejo oportuno que nunca ha faltado.

***A los catedráticos del Área Social Humanística,***

por la amistad, confianza y estima que me brindaron.

***A mi amiga Lesbia Natareno,***

por su gran apoyo durante las pruebas que hemos pasado juntos.

***A mi asesor, Ing. Hugo Ramírez,***

por su ayuda y cooperación en la realización de este trabajo.

Y a todo aquel que por falta de espacio no fue mencionado aquí, pero sin cuya guía, afecto o intercesión, no hubiera sido posible este trabajo.

# ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b> .....	<b>VI</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	<b>VIII</b>
<b>GLOSARIO</b> .....	<b>X</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>XIII</b>
<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>XIV</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>XV</b>
<b>1. GENERALIDADES</b> .....	<b>1</b>
1.1. Definición del concepto de calidad .....	1
1.1.1. La calidad desde el punto de vista del cliente .....	2
1.1.2. La calidad desde el punto de vista del productor .....	2
1.2. Control estadístico de calidad .....	2
1.2.1. Causas de variación de la calidad.....	3
1.2.1.1. Causas fortuitas de variación de la calidad .....	3
1.2.1.2. Causas atribuibles de variación de la calidad .....	3
1.3. Herramientas de análisis de calidad.....	4
1.3.1. Diagrama de flujo del proceso.....	4
1.3.2. Gráficos de control .....	6
1.3.2.1. Gráficos por variables .....	8

1.3.2.1.1. Gráfico X .....	8
1.3.2.1.2. Gráfico R .....	9
1.3.2.2. Gráficos por atributos .....	10
1.3.2.2.1. Gráficos P y nP .....	11
1.3.2.2.2. Gráficos C y U .....	13
1.3.2.3. Ejemplo de gráficos de control .....	14
1.3.3. Tipos de muestreo aleatorio .....	15
1.3.3.1. Muestreo simple .....	16
1.3.3.2. Muestreo doble .....	16
1.3.3.3. Muestreo múltiple .....	16
1.4. Introducción al hierro fundido .....	17
1.4.1. Tipos de hierro fundido .....	18
1.4.2. Características del hierro fundido gris .....	18
1.4.3. Propiedades mecánicas .....	20
1.4.3.1. Resistencia a la tensión .....	21
1.4.3.2. Dureza .....	21
<b>2. SITUACIÓN ACTUAL .....</b>	<b>23</b>
2.1. Proceso de elaboración de piezas de hierro fundido .....	23
2.1.1. Insumos principales .....	23
2.1.2. Salidas del proceso .....	24
2.1.3. Diagrama de flujo del proceso .....	26
2.1.4. Descripción del proceso .....	27



2.2. Diagnóstico del proceso actual .....	30
2.2.1. Ventajas del proceso.....	30
2.2.2. Desventajas del proceso.....	30
2.3. Situación actual del control de calidad .....	31
2.3.1. Procedimiento de inspección .....	31
2.3.2. Procedimiento de rechazo.....	31
<b>3. DISEÑO DEL PLAN DE CONTROL DE CALIDAD .....</b>	<b>33</b>
3.1. Requerimientos de calidad según normas .....	33
3.1.1. Requerimientos para fundiciones de hierro gris (Especificación ASTM A 48).....	33
3.1.2. Requerimientos para fundiciones de hierro para uso general industrial (Especificación ASTM A 834) .....	38
3.1.2.1. Requerimientos químicos.....	38
3.1.2.2. Requerimientos suplementarios.....	38
3.2. Identificación de aspectos controlables estadísticamente.....	39
3.2.1. Propiedades del material.....	39
3.2.1.1. Composición química.....	39
3.2.1.2. Dureza.....	40
3.2.1.3. Resistencia tensil .....	40
3.2.1.4. Resistencia a la flexión.....	40
3.2.2. Características dimensionales .....	40
3.2.3. Defectos visuales y de superficie.....	41

3.3.	Selección de los gráficos de control a utilizar .....	41
3.3.1.	Gráficos por variables .....	41
3.3.1.1.	Gráfico X.....	41
3.3.2.	Gráficos por atributos.....	41
3.3.2.1.	Gráfico C.....	41
3.4.	Selección del tipo de muestreo a utilizar.....	42
3.4.1.	Muestreo aleatorio simple.....	42
3.5.	Costos de calidad .....	42
3.5.1.	Costos de control.....	43
3.5.2.	Costos por fallos .....	43
3.5.3.	Costos de prevención .....	44
<b>4.</b>	<b>PRUEBA PILOTO DEL PLAN DE CONTROL DE CALIDAD .....</b>	<b>45</b>
4.1.	Resultados experimentales.....	45
4.1.1.	Diseño de formato para registro de datos.....	46
4.1.2.	Control por variables.....	47
4.1.3.	Control por atributos .....	48
4.2.	Gráficos de control de los resultados .....	49
4.2.1.	Interpretación de los gráficos de control .....	51
4.3.	Fuentes de la variación.....	52
4.3.1.	Insumos utilizados en el proceso.....	52
4.3.2.	Equipo utilizado en el proceso .....	53
4.3.3.	Recurso humano que participa en el proceso.....	53

<b>5. SEGUIMIENTO DEL PLAN DE CONTROL DE CALIDAD .....</b>	<b>55</b>
5.1. Capacitación del recurso humano .....	55
5.2. Reuniones semanales .....	57
5.3. Establecimiento de índices de calidad .....	57
5.3.1. Número de defectos por unidad .....	58
5.3.2. Grado de dureza del material .....	58
5.3.3. Costos de calidad .....	59
5.3.4. Satisfacción del cliente .....	59
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>61</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>65</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>67</b>
<b>APÉNDICE .....</b>	<b>69</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>77</b>

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1.	Ejemplo de gráfico X	14
2.	Ejemplo de gráfico R	15
3.	Ubicación del hierro fundido en el diagrama hierro-carbono	17
4.	Diagrama de flujo del proceso	26
5.	Diseño y dimensiones para molde de elaboración de barras de prueba	35
6.	Especímenes de prueba de tensión y sus dimensiones	36
7.	Boleta de datos para gráfico P	46
8.	Boleta de datos para gráficos X y R	46
9.	Diferencia de diámetros en 100 discos (en cm.)	47
10.	Número de defectos encontrados en los soportes	49
11.	Gráfico X para la diferencia de diámetros	50
12.	Gráfico R para la diferencia de diámetros	50
13.	Gráfico C para los defectos en los soportes	51
14.	Ejemplo de hoja de encuesta de servicio	60
15.	Tapadera de hierro fundido a ser ensayada	70
16.	Prensa hidráulica para el ensayo	71
17.	Colocación de la tapadera para el ensayo	71

18. Colocación de la tapadera para el ensayo, (vista alternativa)	72
19. Disco de acero utilizado para transmitir la carga	72
20. Aplicación de la carga	73
21. Indicador de carga aplicada	74
22. Descascaramiento en el anverso de la tapadera	74
23. Muestra de la falla en el reverso de la tapadera	75

## TABLAS

I. Simbología del diagrama de flujo	6
II. Fórmulas para el gráfico X	9
III. Fórmulas para el gráfico R	9
IV. Fórmulas para el gráfico P	11
V. Fórmulas para el gráfico nP	12
VI. Fórmulas para el gráfico C	13
VII. Fórmulas para el gráfico U	13
VIII. Datos de ejemplo para gráficos por variables	14
IX. Efecto de los elementos de aleación en el hierro fundido	20
X. Propiedades mecánicas de los hierros fundidos grises	21
XI. Barras de prueba a utilizar en función del espesor	34
XII. Dimensiones de la barra de prueba	34
XIII. Factores para determinar límites de control en gráficos por variables	77

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>%</b>	Porcentaje
<b>A<sub>2</sub></b>	Constante para diagramas de control de medias
<b>ASTM</b>	<i>American Society for Testing and Materials</i>
<b>C</b>	Número de no conformidades por unidad de inspección
<b>cm</b>	Centímetros
<b>D<sub>3</sub></b>	Constante para diagramas de control de rangos
<b>D<sub>5</sub></b>	Constante para diagramas de control de rangos
<b>lb</b>	Libras
<b>LCC</b>	Línea Central de Control
<b>LIC</b>	Límite Inferior de Control
<b>LSC</b>	Límite Superior de Control
<b>mm</b>	Milímetros
<b>n</b>	Número de unidades en el grupo de inspección
<b>nP</b>	Número de unidades no conformes
<b>P</b>	Fracción de unidades no conformes

<b>PSI</b>	Libras sobre pulgada cuadrada
<b>R</b>	Rango
<b>S</b>	Desviación estándar
<b>U</b>	Número de no conformidades por unidad
<b>X</b>	Media

## GLOSARIO

<b>Aleación</b>	Sustancia con propiedades metálicas y compuesta por dos o más elementos químicos de los cuales por lo menos uno es un metal elemental.
<b>Austenita</b>	Solución sólida de carbono en hierro cúbico centrado en la cara.
<b>Causa atribuible de variación</b>	Causas que no forman parte del esquema de las causas fortuitas de variación.
<b>Causa fortuita de variación</b>	Causa de variación que es simplemente casual, acerca de la cual es poco lo que se puede hacer para revisar el proceso.
<b>Cementita</b>	Compuesto de hierro y carbono conocido químicamente como carburo de hierro ( $\text{Fe}_3\text{C}$ )
<b>Cliente externo</b>	Persona o empresa que adquirirá el producto final luego de todas las transformaciones que la empresa le realice.
<b>Cliente interno</b>	Operario o departamento de la empresa que recibirá el producto después de efectuar una operación sobre él.



<b>Corrida</b>	Una sucesión de observaciones del mismo tipo.
<b>Ferrita</b>	Solución sólida de carbono en hierro cúbico centrado en el cuerpo.
<b>Fracción disconforme o defectuosa</b>	Razón entre el número de artículos disconformes o defectuosos en una muestra y el número total de artículos en la misma.
<b>Grafito</b>	Forma en la que se manifiesta el carbono en el hierro. Usualmente se visualiza como hojuelas.
<b>Límite Central de Control</b>	Línea horizontal que representa el promedio de la característica de calidad en un gráfico de control.
<b>Límite Inferior de Control</b>	Línea horizontal debajo del promedio de la característica de calidad en un gráfico de control, que representa la frontera inferior de la región que se considera bajo control.
<b>Límite Superior de Control</b>	Línea horizontal sobre el promedio de la característica de calidad en un gráfico de control, que representa la frontera superior de la región que se considera bajo control.
<b>Perlita</b>	Disposición laminar de ferrita y cementita que se presenta a menudo en acero y hierro fundido.

**Punto muestral**

Punto en un gráfico de control que representa el valor de la característica de calidad en un tiempo determinado o para una muestra dada.

**Rango**

Diferencia entre los valores mayor y menor de la muestra.

## **RESUMEN**

El propósito de este trabajo es proporcionar un ejemplo de aplicación de los controles de calidad en un taller de fundición en el cual se producen piezas de hierro fundido de manera artesanal (lo cual no necesariamente indica que las piezas sean de mala calidad, sino que esta no se ha podido determinar por medio de los procedimientos adecuados, ni se puede asegurar que el grado de la misma sea constante), aplicando distintas herramientas de calidad, e inspeccionando las variables que puedan proporcionar un mayor grado de satisfacción al cliente.

Se inicia con una breve introducción a los conceptos de calidad, control estadístico de calidad y las características del hierro fundido.

Se procederá posteriormente a presentar el estado de la empresa y su proceso, un diagnóstico preliminar sobre las ventajas y desventajas del mismo, así como de los procedimientos de inspección y rechazo.

A continuación se realiza el diseño del plan de control de calidad, tomando en cuenta todas las posibles alternativas de características de calidad.

Se efectúa en seguida una prueba piloto del plan de control de calidad, aplicado a dos características de calidad, presentando los resultados obtenidos y los correspondientes gráficos de control y sus interpretaciones, así como un análisis de las variaciones encontradas en los mismos.

Para finalizar, se presenta una metodología estructurada para el seguimiento y mejora continua del plan de control de calidad, así como las conclusiones y recomendaciones del trabajo.

# OBJETIVOS

## General

Diseñar un sistema de control estadístico que permita determinar y elevar la calidad en el proceso de elaboración de piezas de hierro fundido

## Específicos

1. Describir el proceso de elaboración de piezas de hierro fundido
2. Definir cuáles son los parámetros a controlar en el proceso
3. Determinar la calidad del hierro fundido utilizado en la elaboración de las piezas
4. Reconocer cuáles son las posibles causas de las variaciones en las especificaciones del producto
5. Utilizar herramientas estadísticas que permitan controlar la calidad del producto
6. Crear una referencia para la aplicación del control estadístico de calidad en otras industrias metalúrgicas
7. Diseñar una metodología estructurada para el desarrollo de la mejora continua de los problemas de calidad en la industria metalúrgica

## INTRODUCCIÓN

La industria metalúrgica guatemalteca ha experimentado un considerable crecimiento durante los últimos años; asimismo se ha incrementado el número de empresas y/o talleres dedicados a la elaboración de piezas de hierro fundido. Sin embargo, son pocas las empresas de este tipo que cuentan con controles de calidad y un proceso de seguimiento y mejora continua de la misma.

Existen talleres o pequeñas empresas dedicados a la elaboración de piezas de hierro fundido, los cuales ofrecen alternativas económicas a una gran cantidad de compradores o clientes que se ven en la disyuntiva con respecto a la falta de calidad de las piezas, pero ofrecidas a un menor precio. A través del diseño y aplicación del adecuado control estadístico de la calidad de las piezas de hierro fundido producidas en dichas empresas, se podría incrementar la competitividad, mejorar la participación en el mercado y ofrecer piezas de mejor calidad.

Por tales motivos, este proyecto pretende brindar un modelo para poder establecer los mecanismos adecuados de verificación del grado de calidad de los productos, y, de tal forma, cumplir con las expectativas de los clientes.



# 1. GENERALIDADES

## 1.1. Definición del concepto de calidad

Calidad tiene muchos significados. Cada quien lo utiliza como más le convenga o como le sea de mayor utilidad. Entre estas múltiples definiciones se pueden enunciar tres:

- Características de un producto que satisfacen las necesidades de los clientes
- Ausencia de defectos
- Lo que hace que las cosas sean lo que son

Además, muchas veces se ha escuchado que la calidad es la “Conformidad de los productos y de los servicios a las exigencias de los clientes internos y externos”, pero la calidad, en realidad, es un concepto relativo, es decir, depende del punto de vista. Por ello es que se puede definir la calidad desde el punto de vista del cliente (sea este externo o interno), y desde el punto de vista del productor.

### **1.1.1. La calidad desde el punto de vista del cliente**

Para el cliente, la calidad es el grado en el cual el producto o servicio satisface sus necesidades y expectativas, de lo cual dependerá la apreciación de la misma. Pero tales necesidades y expectativas sufrirán variaciones a través del tiempo, por lo cual nunca podrán ser completamente satisfechas. Por ello se dice que la calidad es dinámica, ya que se encuentra siempre en un continuo movimiento, y el grado de satisfacción del cliente no será siempre el mismo.

### **1.1.2. La calidad desde el punto de vista del productor**

El productor, en cambio, medirá la calidad en términos de materia prima, mano de obra, costos de fabricación, equipo, eficiencia de los métodos y otros valores que pueden ser más fácilmente determinados, ya que su apreciación no es subjetiva, como en el caso del punto de vista del cliente.

## **1.2. Control estadístico de calidad**

El control de calidad ha existido desde siempre en la industria. A partir de que se establecen reglas para considerar satisfactorio o insatisfactorio un producto de acuerdo con un patrón o norma establecido, se está ejerciendo un control sobre la calidad. Esto se puede observar en la antigua industria desde que los artesanos establecen un adiestramiento para los aprendices, de tal forma que, para que pudieran convertirse en maestros del oficio, debían presentar pruebas de su aptitud y habilidad.



En comparación, se puede decir por otra parte, que el control estadístico de calidad tiene una historia más reciente. La teoría estadística no comenzó a ser aplicada al control de calidad hasta la década de 1920, teniendo como factor el desarrollo por esos años de una teoría científica del muestreo (Duncan, 1990:1). La necesidad de un control estadístico se da cuando resulta muy costoso, ineficiente, o prácticamente imposible, efectuar un control sobre cada pieza que sale en la producción, como se hacía hasta entonces. Además, la inspección o las pruebas no incorporarán calidad en el producto, sino simplemente detectarán los fallos en el proceso. Debe controlarse que el proceso de producción sea estable y capaz de fabricar todos los productos con las mismas especificaciones, y si no fuera así, deberán identificarse las causas que ocasionan esas variaciones en las características del producto.

### **1.2.1. Causas de variación de la calidad**

#### **1.2.1.1. Causas fortuitas de variación de la calidad**

Los procesos no pueden ser exactos ni perfectos. Sin importar cuán bien diseñado se encuentre el proceso o cuán constantes se mantengan las condiciones del mismo, siempre habrá un grado de variación. Esta variación es el efecto de varias causas pequeñas incontrolables que, sumadas, darán esta variabilidad natural. Si este “ruido de fondo” es relativamente pequeño, puede aceptarse tal nivel de funcionamiento del proceso. A esta variabilidad natural se le llama “sistema estable de causas fortuitas”. Un proceso que varíe solamente por causas fortuitas se considera bajo control estadístico.

#### **1.2.1.2. Causas atribuibles de variación de la calidad**

Además de las causas fortuitas, existen otros tipos de variabilidad en un proceso. Por lo general provienen de tres fuentes (Montgomery, 1991:87):

- Ajuste incorrecto de máquinas
- Errores de operario
- Defectos en las materias primas

Estas pueden estar interrelacionadas, pero son mayores que la variabilidad natural del proceso y, por lo general, generan un funcionamiento inaceptable del proceso.

Un proceso que varíe por causas atribuibles se encuentra fuera de control estadístico.

Uno de los objetivos del control estadístico de calidad es detectar cuándo se estén presentando causas atribuibles de variación para tomar acciones correctivas, evitando así que una mayor proporción de la salida del proceso no cumpla con los requisitos de calidad.

### **1.3. Herramientas de análisis de calidad**

#### **1.3.1. Diagrama de flujo del proceso**

La visualización gráfica es de gran ayuda para poder analizar un proceso. Al momento de tener que establecer los problemas de calidad es necesario identificar en qué etapa del proceso pueden ser ocasionados, y para ello será necesaria la intervención de distintas personas. Para que exista una mejor coordinación y un mejor entendimiento entre las partes, utilizar una herramienta gráfica como el diagrama de flujo del proceso, evitará problemas de comunicación, sean problemas de emisión o de retroalimentación.

El diagrama de flujo utiliza por lo general cinco símbolos (tabla I), dos de los cuales representan actividades que se consideran productivas, es decir, no se pueden eliminar, aunque el tiempo tomado para realizarlas puede ser susceptible de mejora; mientras que el resto de símbolos se consideran improductivos, por lo cual deben reducirse al mínimo, si no eliminarse.

El diagrama de flujo ayudará a:

- a) Visualizar el proceso en su conjunto
- b) Establecer responsabilidades
- c) Determinar los puntos críticos del proceso
- d) Identificar actividades susceptibles de medición y control
- e) Analizar la adecuación del proceso con las necesidades del cliente

Para realizar un diagrama de flujo se deben seguir los siguientes pasos:

1. Definir el proceso para el cual se elaborará el diagrama, estableciendo claramente el inicio y fin del mismo
2. Identificar los componentes del proceso (recursos humanos, materiales y tecnológicos)
3. Representar las actividades desde la primera hasta la última
4. Identificar cada actividad con los símbolos adecuados

**Tabla I. Simbología del diagrama de flujo**

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
	Operación
	Inspección
	Demora
	Transporte
	Almacenaje

### **1.3.2. Gráficos de control**

Un gráfico de control (o diagrama de control) es una herramienta estadística que ayuda a estudiar y controlar un proceso repetitivo, y sirve para:

- Definir un estándar del proceso a alcanzar
- Auxiliar a alcanzar la meta
- Juzgar si la meta fue alcanzada

Un diagrama de control es una representación gráfica de una característica de calidad de cara al número de muestra o al tiempo. Consta de tres líneas horizontales: una en el medio denominada Línea Central, que representa el valor medio de la característica de calidad; y una línea arriba y otra debajo de esta, llamadas Límite Superior de Control (LSC) y Límite Inferior de Control (LIC), las cuales son determinadas de tal forma que, si el proceso está bajo control, casi la totalidad de los puntos muestrales se halle entre ellas.

En dicho diagrama se ubican los datos obtenidos sobre la característica de calidad, en el orden en que se extrajeron, siendo representados por los ya mencionados puntos muestrales, a los cuales se acostumbra unir mediante líneas rectas, para poder visualizar de mejor manera cómo cambia la característica en el tiempo.

Se considera que el proceso se encuentra fuera de control (y por lo tanto hay una causa atribuible de variación que debe ser encontrada y corregida), si se observa cualquiera de las siguientes situaciones (Montgomery, 1985:98):

- I. Uno o más puntos están fuera de los límites de control
- II. Una corrida de por lo menos 7 u 8 puntos, donde el tipo de corrida podrá ser ascendente o descendente, una corrida sobre la línea central o debajo de ella, o bien una por encima o por debajo de la media
- III. Dos o tres puntos consecutivos fuera de los límites de advertencia de dos sigmas, pero todavía entre los límites de control
- IV. Cuatro o cinco puntos consecutivos más allá de los límites sigma
- V. Un patrón anormal o no aleatorio en los datos
- VI. Uno o más puntos cerca de un límite de control

Con los gráficos de control es posible inspeccionar tanto características de calidad cuantitativas como cualitativas, pero el enfoque que se le da al gráfico de acuerdo con esta división es distinto. Por ello es que se acostumbra hablar de “gráficos de control por variables” y “gráficos de control por atributos”.

### **1.3.2.1. Gráficos por variables**

Este tipo de gráficos se utiliza cuando la característica de calidad a medir se puede expresar numéricamente. Por ejemplo, puede ser la dimensión de una pieza, el peso de un material o el porcentaje de determinada sustancia en el producto. A esta característica de calidad mensurable se le denomina variable. Por lo general este tipo de diagramas de control son más eficientes y brindan más información que los gráficos de control por atributos.

De esta característica de calidad, ya que es una variable, se tratará de controlar el promedio de la misma y su variabilidad. Para controlar el promedio o valor medio de la variable se utiliza el diagrama de control de medias o gráfico X. Para controlar la variabilidad de la misma se pueden considerar dos diagramas, dependiendo de la exactitud (y por ende la complejidad) que se desee del gráfico. Es posible utilizar un diagrama de control de la desviación estándar, llamado gráfico S, o un diagrama de control de rangos o gráfico R. Por lo general, se prefiere utilizar el diagrama de control de rangos por su simplicidad, conjuntamente con el diagrama de control de medias. A continuación se verán más a profundidad estos dos diagramas.

#### **1.3.2.1.1. Gráfico X**

Cómo se mencionó anteriormente, un gráfico X muestra las variaciones en el valor medio de las muestras. La línea central del diagrama está determinada por la media de medias de las muestras, y los límites inferior y superior se determinan por la media más / menos el triple de la desviación estándar. Sin embargo, en la práctica, para determinar los límites se suelen utilizar las fórmulas siguientes:

**Tabla II. Fórmulas para el gráfico X**

$LIC = X - A_2R$
$LCC = X$
$LSC = X + A_2R$

Donde  $A_2$  es una constante obtenida a partir de tablas (ver anexos), y depende exclusivamente del tamaño de la muestra.

#### **1.3.2.1.2. Gráfico R**

A diferencia del anterior, el gráfico R muestra variaciones en los rangos (diferencias entre los valores mayor y menor de la muestra) de las muestras, es decir, cuánto varían las amplitudes de las muestras. La línea central del diagrama es la media de los rangos de las muestras. Los límites superior e inferior de control también deberían ser determinados a partir de la desviación estándar, pero, como con el gráfico X, en la práctica se determinan a partir de constantes obtenidas de tablas. Las fórmulas para el gráfico R son:

**Tabla III. Fórmulas para el gráfico R**

$LIC = D_3R$
$LCC = R$
$LSC = D_4R$

Donde  $D_3$  y  $D_4$  son constantes obtenidas a partir de tablas (ver anexos), y dependen exclusivamente del tamaño de la muestra.

### **1.3.2.2. Gráficos por atributos**

En la sección anterior, se mencionó cómo pueden controlarse por medio de gráficos por variables aquellas características de calidad que cabe representar por números. Sin embargo, hay muchas de ellas que no es posible dimensionar o mensurar. Para esos casos solamente es posible clasificar al producto como conforme o disconforme (defectuoso o no defectuoso), o referir el número de disconformidades (defectos) que tiene la muestra. Cuando se da este tipo de casos, es más ventajoso utilizar los gráficos de control por atributos.

Comúnmente se suelen utilizar tres tipos de gráficos o diagramas de control por atributos: el gráfico P, que utiliza como característica de calidad la fracción de productos disconformes o defectuosos; el gráfico C, cuya característica de calidad es el número de disconformidades o defectos observados; y el gráfico U, que es un diagrama de disconformidades por unidad, que se utiliza cuando una razón de disconformidades es más favorable que utilizar el gráfico C.

Además de los mencionados se suele utilizar el gráfico nP, que no es más que una extensión del gráfico P, pero multiplicando la fracción defectuosa por el número de unidades en la muestra, a fin de evitar tener que trabajar con números tan vagos y abstractos como pueden llegar a ser los decimales entre 0 y 1.



### 1.3.2.2.1. Gráficos P y nP

El diagrama P representa gráficamente los distintos valores de la fracción disconforme (es decir, la razón entre el número de artículos disconformes o defectuosos y el número total de artículos de la muestra) en el transcurso del proceso. Esto se refiere a cuando se somete el producto a inspección por parte de un empleado, y este lo clasifica de acuerdo al cumplimiento o incumplimiento de un estándar o norma previamente establecido. Si el artículo no cumple con la norma, pasará a formar parte del grupo de artículos disconformes.

La fracción antes mencionada es usualmente expresada, ya sea en términos de unidades por cada cien, o bien como un número decimal. Por lo general, es más conveniente utilizar el porcentaje, debido a que es más fácil de interpretar para el personal operativo.

Las fórmulas utilizadas para este tipo de gráfico son las siguientes:

**Tabla IV. Fórmulas para el gráfico P**

$LIC = P - 3\sqrt{P(1-P)/n}$
$LCC = P$
$LSC = P + 3\sqrt{P(1-P)/n}$

El gráfico nP es esencialmente el mismo que el gráfico P, con excepción de que la fracción defectuosa se multiplica por el número de artículos en la muestra (n), a fin de que el intervalo de valores en la gráfica no sea solamente de 0 a 1 (o de 0% a 100%), sino que se inicie en cero artículos, y finalice con el número total de artículos de la muestra. De esta manera, ya no se está tratando con números relativos, sino que se expresa en términos absolutos, trasladando la referencia al número de artículos objeto del estudio. Esta ventaja del gráfico nP podría hacer pensar que se debiera utilizar este, y no el gráfico P. Sin embargo, hay casos en los cuales la talla de la muestra no es constante, y es allí donde surge la imposibilidad de utilizar el gráfico nP. Es por ello es que se acostumbra decidir qué tipo de gráfico se va a utilizar (cuando se trata con gráficos de disconformes), atendiendo a la constancia del tamaño de la muestra.

En caso se optara por el gráfico nP, las fórmulas a aplicar para obtener los límites de control serían las siguientes:

**Tabla V. Fórmulas para el gráfico nP**

$LIC = nP - 3\sqrt{(nP(1-P))}$
$LCC = nP$
$LSC = nP + 3\sqrt{(nP(1-P))}$

### 1.3.2.2.2. Gráficos C y U

En determinados casos, la existencia de un defecto o disconformidad en el producto no ocasiona que este sea rechazado. Es posible tolerar en este tipo de artículos un cierto número de disconformidades, ya que la presencia de ellas no afectan en gran medida su funcionamiento. Como ejemplo podrían mencionarse los muebles u objetos de madera, ya que quizá existan en ellos pequeñas raspaduras que puedan no ser advertidas por el cliente (a menos que revise meticulosamente). Pero ciertamente, si el número de las fallas llega a ser alto, el cliente percibirá el desperfecto y rechazará el producto. Cuando se tiene este tipo de productos, deberán utilizarse los diagramas de control de disconformidades C y U.

Los gráficos C y U son muy parecidos a los gráficos P y nP. El gráfico C presenta el número de disconformidades en la muestra; en cambio, el gráfico U se basa en la razón de las disconformidades en la muestra y el tamaño de la misma, es decir, el promedio de disconformidades por unidad. En tal caso se presentará un caso parecido en cuanto a la constancia del número de artículos, para elegir el gráfico más conveniente. Es preferible el gráfico C cuando se tiene un tamaño de muestra constante, y el gráfico U cuando no sea posible evitar que varíe.

Las fórmulas son como siguen a continuación:

**Tabla VI. Fórmulas para el gráfico C**

$LIC = C - 3\sqrt{C}$
$LCC = C$
$LSC = C + 3\sqrt{C}$

**Tabla VII. Fórmulas para el gráfico U**

$LIC = U - 3\sqrt{(U/n)}$
$LCC = U$
$LSC = U + 3\sqrt{(U/n)}$

### 1.3.2.3. Ejemplo de gráficos de control

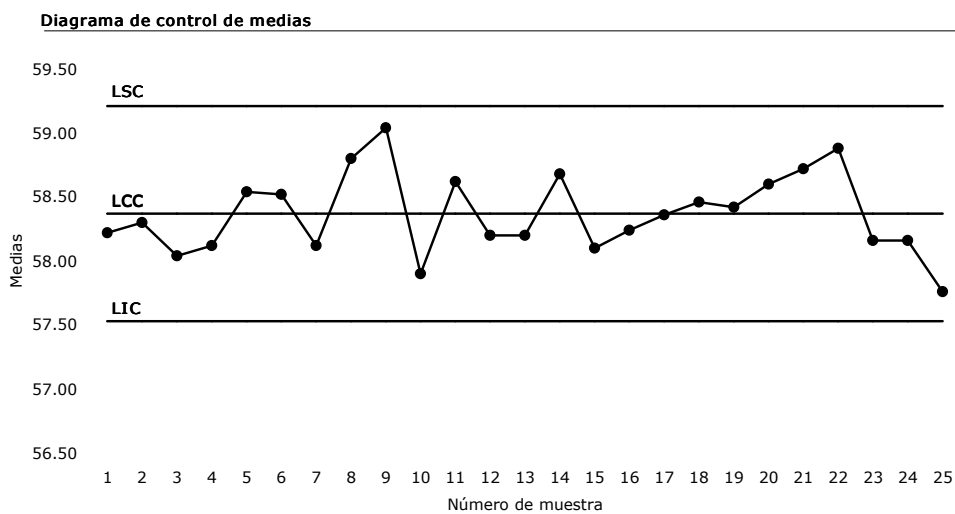
Tabla VIII. Datos de ejemplo para gráficos por variables

No.	OBSERVACIONES					X	R
	1	2	3	4	5		
1	58.7	57.4	58.0	59.0	58.0	58.22	1.6
2	59.4	57.5	58.0	57.6	59.0	58.30	1.9
3	58.1	57.6	57.4	58.8	58.3	58.04	1.4
4	57.8	59.1	58.0	58.2	57.5	58.12	1.6
5	59.3	58.0	57.5	58.8	59.1	58.54	1.8
6	59.4	57.4	59.0	58.9	57.9	58.52	2.0
7	57.7	57.3	57.6	59.1	58.9	58.12	1.8
8	59.4	58.5	58.2	58.6	59.3	58.80	1.2
9	59.4	58.7	58.8	59.3	59.0	59.04	0.7
10	58.2	57.4	58.6	57.7	57.6	57.90	1.2
11	59.3	59.0	58.0	59.1	57.7	58.62	1.6
12	57.9	58.5	57.6	59.0	58.0	58.20	1.4
13	58.2	57.7	57.8	59.3	58.0	58.20	1.6
14	58.8	59.0	58.8	58.5	58.3	58.68	0.7
15	57.9	57.9	57.5	59.4	57.8	58.10	1.9
16	57.3	58.6	57.5	58.7	59.1	58.24	1.8
17	59.3	57.7	58.8	58.6	57.4	58.36	1.9
18	57.8	58.8	59.4	58.6	57.7	58.46	1.7
19	59.0	58.3	57.7	58.5	58.6	58.42	1.3
20	58.3	58.5	59.3	57.9	59.0	58.60	1.4
21	59.2	58.6	59.1	58.1	58.6	58.72	1.1
22	58.7	58.8	59.2	58.7	59.0	58.88	0.5
23	58.4	58.5	58.0	57.4	58.5	58.16	1.1
24	58.5	57.8	57.3	57.9	59.3	58.16	2.0
25	57.4	57.7	58.2	57.6	57.9	57.76	0.8
						58.37	1.44

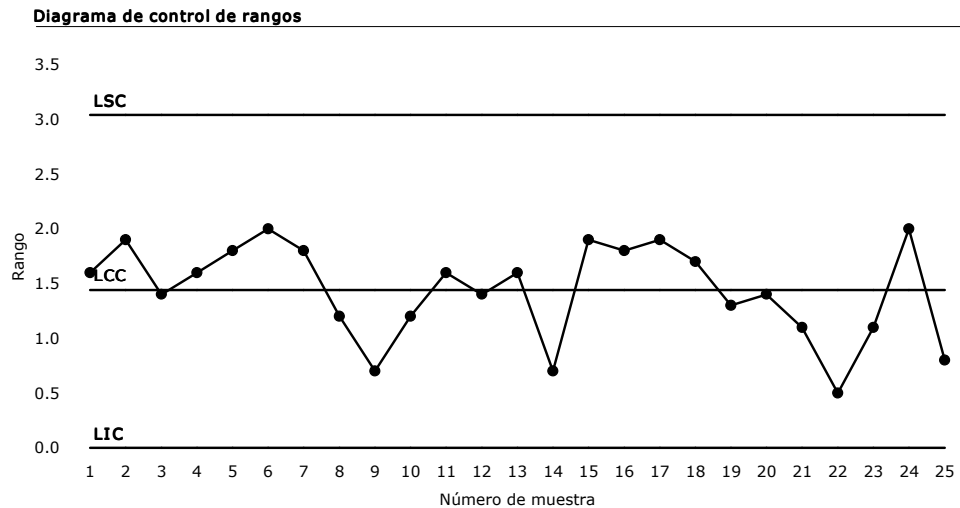
<b>GRÁFICO X</b>
LIC = 57.53
LCC = 58.37
LSC = 59.21

<b>GRÁFICO R</b>
LIC = 0.00
LCC = 1.44
LSC = 3.04

Figura 1. Ejemplo de gráfico X



**Figura 2. Ejemplo de gráfico R**



### 1.3.3. Tipos de muestreo aleatorio

Cuando es necesario inspeccionar un lote, por lo general una inspección al 100% no será conveniente, por los recursos que tal tarea demandaría, sean estos de tipo humano, temporal, económicos y/o de espacio. Por ello, resulta preferible tomar una muestra, y hacer una inferencia estadística con respecto a la población, es decir, todas las piezas del lote.

Sin embargo, hay que tener en consideración que para que esto sea válido, la elección de los artículos de la muestra debe estar determinada solamente por el azar, además de que la muestra debe ser representativa de todo el lote. A un muestreo de este tipo se le llama muestreo aleatorio. Existen varios tipos a seguir.

### **1.3.3.1. Muestreo simple**

Muestreo simple es aquel en el cual, para determinar el rechazo o la aceptación del lote, solamente se toma una muestra de tamaño  $n$ , de la cual, si el número de disconformes no supera el número de aceptación  $c$ , el lote será aceptado.

### **1.3.3.2. Muestreo doble**

En el muestreo doble debe tomarse primero una muestra de tamaño  $n_1$ , para la cual, si el número de disconformes no supera el número de aceptación  $c_1$ , el lote será aceptado. La diferencia consiste en que si el número de defectuosos supera a  $c_1$ , se realiza un muestreo adicional, tomando  $n_2$  artículos del lote, de los cuales, si los disconformes de este nuevo grupo no superan al nuevo número de aceptación  $c_2$ , el lote se rechazará. De lo contrario, el lote se tendrá por aprobado.

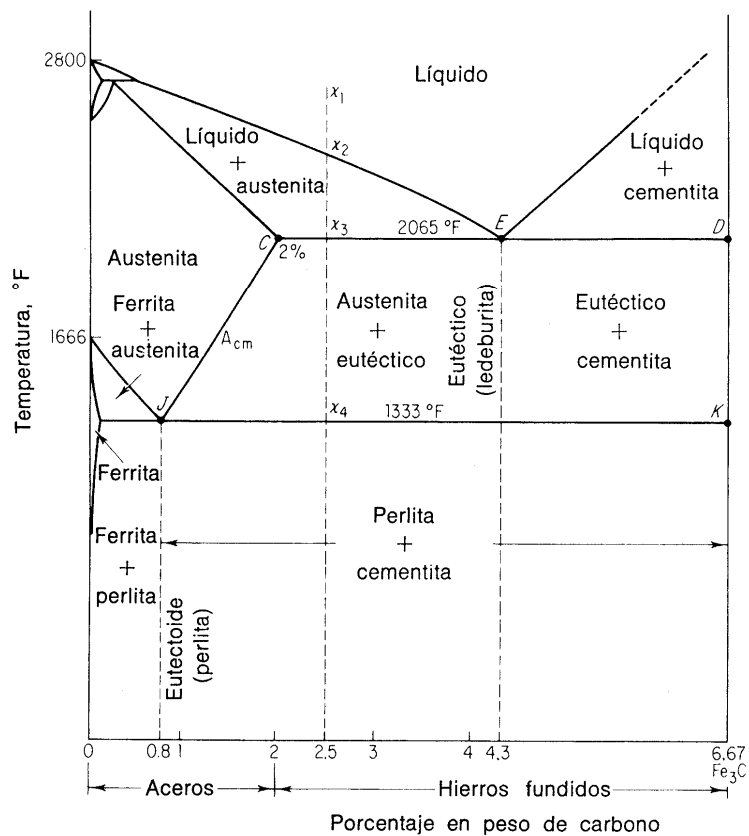
### **1.3.3.3. Muestreo múltiple**

Este es simplemente una extensión del muestreo doble, en el cual pueden ser necesarias más de dos muestras para evaluar al lote. Este tipo de muestreo toma muestras más pequeñas que el muestreo simple y el doble, lo cual podría representar un incremento en la eficiencia, pero la desventaja es que resulta más difícil de administrar.

#### 1.4. Introducción al hierro fundido

El hierro fundido es una aleación de hierro y carbono, en la que la proporción de este último elemento se encuentra entre 2 y 6.67% (ver figura 3). El alto contenido de carbono es el responsable de la gran fragilidad del material, por lo cual no se suelen utilizar en la industria hierros fundidos de más de 4% de contenido de carbono.

**Figura 3. Ubicación del hierro fundido en el diagrama hierro-carbono**



Fuente: Sydney Avner. **Introducción a la metalurgia física**. Página 422.

La razón por la cual se le llama “fundido” a este material es debido a que, por su baja ductilidad, el hierro fundido no puede trabajarse a temperatura ambiente. Consecuencia de ello es que el único proceso aplicado en la elaboración de este tipo de piezas es la fundición, y de allí surge el nombre.

#### **1.4.1. Tipos de hierro fundido**

Es posible catalogar al hierro fundido de acuerdo a diversas características, como lo son el contenido de carbono, los elementos de aleación, la velocidad de enfriamiento, la cantidad de impurezas en el material, el tratamiento térmico al que haya sido sometido, y otras. Pero la mayoría de ellas se refieren a condiciones que tienen que ver con el estado en que se encuentre el carbono. Por ello es que se suele clasificar el hierro fundido de acuerdo a su estructura metalográfica, en la cual se verán reflejadas las variables mencionadas anteriormente. Puede clasificarse a los hierros fundidos más importantes como sigue:

- Hierros fundidos blancos: El carbono se encuentra como cementita.
- Hierros fundidos maleables: El carbono se encuentra en forma de partículas redondas irregulares obtenidas por tratamiento térmico.
- Hierros fundidos grises: El carbono está sin combinar, en forma de escamas de grafito.
- Hierros fundidos aleados: Las propiedades de los anteriores son modificadas mediante la adición de elementos de aleación.

#### **1.4.2. Características del hierro fundido gris**

Debido a que las piezas de hierro fundido a considerarse en el transcurso de este trabajo están elaboradas de hierro fundido gris, será de este tipo de hierro fundido del que serán consideradas sus principales características.



Este tipo de hierro es uno de los más comúnmente utilizados en la industria. Debido a la extremada dureza y fragilidad del hierro fundido blanco, se suele preferir el gris, que permite una mayor “maquinabilidad”. Para poderlo producir, se favorece que la cementita se separe en grafito y austenita (o ferrita), controlando la composición de la aleación y la velocidad de enfriamiento. Además se garantiza el proceso de grafitización con un alto contenido de carbono, una alta temperatura y la adición de silicio.

La resistencia del hierro fundido gris dependerá de la matriz en que esté incrustado el grafito. Puede ir desde una matriz de ferrita pura, en cuyo caso será un material muy suave y débil, hasta una matriz de perlita pura, obteniéndose la máxima dureza y resistencia (sin alcanzar los indeseables grados de dureza del hierro fundido blanco). Asimismo es posible tener mezclas en distintas proporciones de ferrita y perlita. La matriz se verá en gran manera determinada por los elementos de aleación adicionados en el proceso de fundición. En la tabla IX se observa cómo se alteran las características del hierro fundido gris de acuerdo al elemento de fundición.

**Tabla IX. Efecto de los elementos de aleación en el hierro fundido**

<b>ELEMENTO DE ALEACIÓN</b>	<b>EFEECTO SOBRE EL HIERRO FUNDIDO</b>
Silicio	En la solidificación en presencia de silicio, el carbono se precipita como grafito primario en forma de hojuelas. La máxima resistencia tensil se obtiene con 2.75% de carbono y 1.5 de silicio
Azufre	El efecto del azufre es contrario al del silicio. A mayor contenido de azufre, mayor será la cantidad de carbono combinado, tendiendo a producir hierro blanco.
Manganeso	Tiende a incrementar la cantidad de carbono combinado, pero es menos potente que el azufre. Formará sulfuro de manganeso al combinarse con el azufre, lo que reducirá el nocivo efecto de este último.
Fósforo	Suele combinarse con el hierro formando fosfuro de hierro, lo cual ocasionará que se mezcle con la cementita y la austenita, formando esteadita. Es relativamente frágil, lo cual reduce la tenacidad del hierro fundido, por lo cual debe controlarse cuidadosamente el contenido de fósforo

**Fuente:** Sydney Avner. **Introducción a la metalurgia física.** Páginas 433-434.

### **1.4.3. Propiedades mecánicas**

En la tabla X se detallan las distintas propiedades mecánicas de las barras de prueba estándar de hierro gris, en la condición de fundido. Debido al especial interés que podría tenerse en tomar alguna de ellas como parámetro de calidad, serán dadas las definiciones de algunas de ellas.

**Tabla X. Propiedades mecánicas de los hierros fundidos grises**

CLASE ASTM	RESISTENCIA A LA TENSIÓN (PSI)	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (PSI)	RESISTENCIA TORSIONAL DE CORTE (PSI)	MÓDULO DE ELASTICIDAD (PSI)		ÍNDICE DE DUREZA BRINELL
				TENSIÓN	TORSIÓN	
20	22000	83000	26000	9.6 - 14.0	3.9 - 5.6	156
25	26000	97000	32000	11.5 - 14.8	4.6 - 6.0	174
30	31000	109000	40000	13.0 - 16.4	5.2 - 6.6	201
35	36500	124000	45800	14.5 - 17.2	5.8 - 6.9	212
40	42500	140000	57000	16.0 - 20.0	6.4 - 7.8	235
50	52500	164000	73000	18.8 - 22.8	7.2 - 8.0	262
60	62500	187500	88500	20.4 - 23.5	7.8 - 8.5	302

Fuente: Sydney Avner. **Introducción a la metalurgia física**. Página 442.

#### **1.4.3.1. Resistencia a la tensión**

Consiste en el valor de esfuerzo máximo que puede soportar una muestra o probeta del material al ser colocada en una máquina de prueba, y ser sometida a una carga axial por un sistema de carga de palanca, mecánico o hidráulico.

#### **1.4.3.2. Dureza**

No puede definirse la dureza como una propiedad del material, sino como un valor relativo. Este valor mostrará una relación entre las distintas propiedades elásticas y plásticas del material, y además servirá para comparar distintos materiales y tratamientos.

Puede dividirse en las siguientes categorías:

- a. Dureza elástica: Se obtiene al medir la altura de rebote de un pequeño martillo con emboquillado de diamante, luego de caer por su propio peso desde una altura definida sobre la superficie de la pieza a probar.

- b. Resistencia al corte: La pieza se somete a la acción de corte de una lima de dureza conocida para determinar si se produce un corte visible.
- c. Resistencia a la indentación: Se realiza al imprimir en la probeta un indentador de determinada geometría, al aplicar una carga estática conocida, y al finalizar la prueba se mide la profundidad de indentación en el material. Este es el más conocido y se suelen utilizar distintas escalas, tales como la dureza Brinell, la Rockwell (con sus distintos tipos), la Vickers y la Knoop.

## 2. SITUACIÓN ACTUAL

### 2.1. Proceso de elaboración de piezas de hierro fundido

#### 2.1.1. Insumos principales

Para poder elaborar piezas de hierro fundido, habrá algunas interrogantes que plantearse acerca de los insumos:

- ¿Cuál será la principal fuente de hierro?
- ¿Qué combustible se utilizará para fundir el hierro?
- ¿De qué material serán los moldes para producir las piezas?
- ¿Qué otros elementos serán añadidos para mejorar las propiedades del metal?

Para la empresa en la que se realizó el estudio, la principal fuente de hierro proviene de material de chatarra, ya que este material tiene un costo relativamente bajo, y el tipo de piezas a fabricar no requieren que el hierro de entrada sea de una calidad tan alta.

Para la segunda interrogante, debido a las características del proceso, es necesario utilizar coque como combustible del horno, una clase de carbón que reúne las propiedades necesarias para la fundición del hierro.

En el caso de los moldes para fundir las piezas, debido a su bajo costo y facilidad de construcción, se utilizan moldes de arena para hacerlos. Al efecto, se emplea arena sílica, a la cual se le añade bentonita y se le somete a un proceso de preparación para que sea adecuada y posea las cualidades necesarias para la correcta fundición de la pieza.

De la misma manera, para que el hierro fundido obtenga las propiedades requeridas, y evitar defectos en el material, se le añaden ciertas sustancias llamadas fundentes, que ayudan a eliminar las impurezas gracias a la escoria, mejoran la calidad del hierro o le proporcionan ciertas cualidades que puedan ser necesarias dependiendo del uso que se le vaya a dar a las piezas a elaborar.

### **2.1.2. Salidas del proceso**

La principal salida del proceso será, por supuesto, las piezas de hierro fundido, objetivo de todo el proceso, pero como en todo proceso transformativo también habrá otras salidas, tanto desechos como material sobrante.

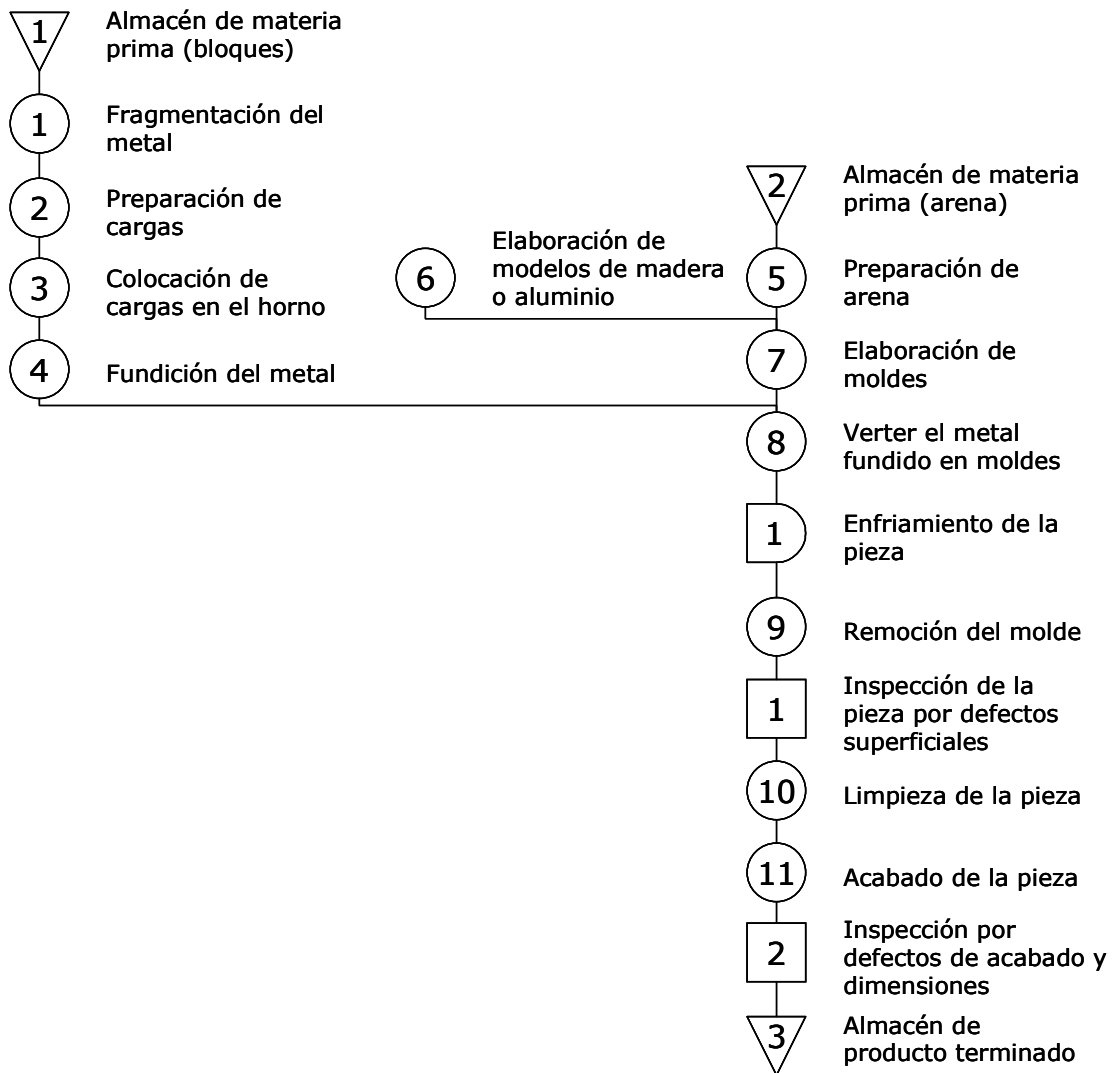
El material sobrante es consecuencia de los conductos del molde diseñado para poder verter el hierro en el mismo, así como para lograr la evacuación del aire y los gases emanados por este al ser vertido. A este material se le puede reciclar, es decir, utilizarse en la siguiente fundición junto con el hierro de chatarra. Sin embargo, este hierro sobrante, por haber sido sometido ya una vez al proceso, no proporcionará la misma calidad del elemento que se utilizaría originalmente como materia prima. Por ello se hace necesario emplearlo como una proporción muy reducida junto con el material de chatarra, para evitar que afecte la calidad y las propiedades de las piezas de hierro fundido.

Con respecto al producto de desecho, se le denomina comúnmente como “escoria”, siendo un producto no metálico resultante de la disolución mutua de fundente e impurezas no metálicas en las operaciones de fundición y refinación. Aquí ya se observa la importancia de utilizar los fundentes, ya que de no ser añadidos a la materia prima en la entrada del horno, todas las impurezas no serían apartadas del hierro, terminarían en las piezas de hierro fundido y ello se vería reflejado como una disminución de la calidad de las piezas o como un cambio en las propiedades de las mismas.

Por último, pueden mencionarse los gases originados del proceso de fundición, los cuales se trasladan a la atmósfera por medio de la chimenea del horno.

### 2.1.3. Diagrama de flujo del proceso

Figura 4. Diagrama de flujo del proceso





#### **2.1.4. Descripción del proceso**

El proceso se inicia con la recepción de la chatarra de hierro, en su mayoría bloques de motor, los cuales se almacenan y alistan para cuando llegue el día de la fundición, ya que la empresa, por su volumen de producción, no necesita fundir todos los días, sino aproximadamente cada 14 días. Cuando la fundición se acerca, se procede a “quebrar” los bloques de motor en piezas pequeñas, y a pesar las piezas a fin de poder preparar las cargas que se colocarán en el horno para fundirse.

Simultáneamente se efectúa el moldeo. La etapa del moldeo es conocida como moldeo con arena, que es la forma de moldeo más utilizada en la industria de la fundición. Descrita de la forma más simple, comienza con la elaboración de un modelo. Este modelo será similar a la pieza que se desea fabricar, con la excepción de que será más grande, ya que por efecto del cambio dimensional de los metales con la temperatura es necesario elaborar el molde de mayor tamaño que el de la pieza, para que al enfriarse el hierro y reducir su tamaño no se vea afectada la pieza final. Además, el modelo será elaborado de madera, para piezas que solamente se producirán unas cuantas veces; o de aluminio, para piezas que se fabricarán a gran escala y en repetidas ocasiones.

Al mismo tiempo se prepara la arena que servirá de material para la realización de los moldes. La arena utilizada para este proceso, como fue mencionado anteriormente, es arena sílica. A cada quintal de arena nueva se le añaden 20 libras de bentonita, 2 libras de carbón marino y 14 libras de agua. Sin embargo, no es necesario preparar arena nueva en cada ocasión, ya que la arena de fundiciones pasadas es posible reprocesarla y utilizarla de nuevo en la siguiente fundición, e incluso tendrá mejores propiedades que la arena a utilizarse por primera vez. En este caso, la arena ya utilizada se hace pasar por una zaranda, para separar la arena de relleno, la arena de contacto y el polvo. Una vez hecho esto, se procede a añadirle 2 libras de bentonita y 9 libras de agua, junto con 2 libras de carbón marino a cada quintal de arena de reproceso.

A continuación se procede a elaborar los moldes. Se coloca el modelo en un contenedor de metal. Se llena luego con arena preparada para, después, apisonarla de tal manera que se encuentre concentrada uniformemente a lo largo del molde. El apisonado puede ser manual o neumático, dependiendo del tipo de pieza que se vaya a elaborar y del tipo de caja a utilizar para contener la arena del molde. Luego se procede de la misma manera con el otro lado del contenedor, hasta que el modelo se encuentra completamente cubierto de arena y los contenedores están completamente llenos y apisonados. Se separa cuidadosamente una de las dos secciones del contenedor, se retira el modelo, y se vuelven a colocar juntas las dos secciones del contenedor.

El día de la fundición, todos los moldes deben estar ya elaborados, de tal forma que se aproveche al máximo la capacidad del horno, y de esa manera se eviten costos innecesarios de mantenimiento.

Se enciende el horno con leña y, una vez encendido, se coloca una “cama” de carbón coque para iniciar. En seguida se vierten alternamente cargas de metal con cargas de carbón coque, en proporción de 120 libras a 9, respectivamente. Cuando el horno ha alcanzado la temperatura correcta, se procede a recibir en un crisol el hierro líquido que atravesó la cama de carbón, para posteriormente ser vertido en cada uno de los moldes de arena.

Al terminar de verter el hierro fundido en los moldes, se cubre la entrada con arena y se deja enfriar hasta el día siguiente.

La siguiente fase del proceso consiste en la apertura de los contenedores, y en la destrucción del molde de arena para sustraer la pieza de hierro fundido. En esta etapa se procede a realizar una inspección inicial, en busca de desperfectos en la pieza debidos a la presencia de hierro frío al momento de la colada, a desprendimientos de arena o a picaduras.

Se procede posteriormente a la limpieza de las piezas, para retirar la arena que pueda tener adherida a su superficie, y en ocasiones, esta fase puede servir como una segunda inspección, aunque si los trabajadores son ya diestros en el oficio, no será necesaria esta nueva inspección, puesto que en la primera se habrán identificado ya las piezas defectuosas.

Una vez se ha finalizado con la limpieza, se procede a dar el acabado necesario por medio del maquinado, para llevar las piezas a las dimensiones deseadas, y posteriormente ser almacenadas o, en el caso de que sean piezas que formen parte de un producto más complejo (como sucede con las afiladoras y los molinos de nixtamal), llevadas hacia un ensamble.

## **2.2. Diagnóstico del proceso actual**

### **2.2.1. Ventajas del proceso**

- El proceso es simple y de bajo costo.
- No requiere de maquinaria compleja ni de mano de obra altamente calificada, y en caso no sea calificada, la capacitación no será muy compleja y en pocos días podrá el trabajador iniciar con sus labores.
- Ciertos insumos son fáciles de conseguir en el mercado y no se requiere tecnología de punta.
- Las principales etapas no dependen de la energía eléctrica.

### **2.2.2. Desventajas del proceso**

A pesar de que el proceso posee muchas ventajas, algunas de ellas traen consigo ciertas desventajas inherentes, como las limitaciones que se tienen para la calidad del material, debido al tipo de materia prima que se utiliza. En cambio, el utilizar materiales de mayor calidad, aunque por ende de mayor costo y menor disponibilidad, traerá consigo una mayor calidad del producto reflejado en una disminución de las piezas rechazadas.

Con otros materiales es más crítica la situación, ya que solamente se pueden traer del extranjero, como es el caso del carbón coque.

Además, la falta de tecnología limita en gran manera el tiempo de elaboración del producto, y también incide en la calidad de las piezas. Ejemplo de ello es cuando no se utilizan apisonadores neumáticos para los moldes de arena.

## **2.3. Situación actual del control de calidad**

### **2.3.1. Procedimiento de inspección**

Al momento, no se tiene establecido un procedimiento concreto para inspeccionar las piezas con respecto a si se encuentran en buen estado o no. Lo único que se realiza actualmente es una inspección visual al momento de almacenarlas luego de abrir los moldes de arena; es decir, si el trabajador observa que una pieza se encuentra defectuosa (según su criterio), la colocará en un lugar separado del resto. En tal caso puede decirse que un punto crítico de control en el proceso actual sucede después de la operación de apertura de moldes, y antes de la de almacenaje.

### **2.3.2. Procedimiento de rechazo**

Como se mencionó anteriormente, el criterio actual de rechazo es subjetivo, es decir, depende del trabajador que observe la pieza (y eso, si es que la observa detenidamente, ya que puede ser que ni siquiera revise si la pieza se encuentra bien o no). Las piezas que han sido rechazadas se almacenan en un lugar separado del resto de las piezas, a fin de poder ser reprocesadas.



### **3. DISEÑO DEL PLAN DE CONTROL DE CALIDAD**

#### **3.1. Requerimientos de calidad según normas**

Antes de definir cuáles serán las características de calidad a controlar en el plan de control de calidad, es necesario examinar qué dicen al respecto las normas existentes que rigen las fundiciones de hierro, contenidas en las especificaciones de la *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, para lo cual se revisarán dos normas de la sociedad antes mencionada que tratan acerca de este tipo de fundiciones. La especificación que principalmente rige el tipo de material del cual son elaboradas las piezas es la norma ASTM A 48, que se refiere a fundiciones de hierro gris, pero existe otra especificación que debe utilizarse en conjunto, que es la norma ASTM A 834, relacionada con las fundiciones para uso general industrial. A continuación se mencionan las principales propiedades que establece la norma.

##### **3.1.1. Requerimientos para fundiciones de hierro gris (Especificación ASTM A 48)**

Esta especificación cubre las fundiciones de hierro gris donde la resistencia tensil es de mayor importancia que la composición química, y establece los procedimientos para la determinación de la conformidad del material con la norma. Se establecen 9 clases, que van desde la Clase 20 hasta la Clase 60, a intervalos de 5, donde el número de la clase no es más que la resistencia tensil mínima en miles de libras sobre pulgada cuadrada.

La conformidad con una clase se determina por medio de un ensayo de tensión con espécimen obtenido de una barra de prueba cuyas dimensiones dependerán del grosor de la sección de control de las piezas (tabla XI). Hay cuatro tipos de barra de prueba, que son cilindros del material a ensayar, denominados A, B, C y S. Los tipos A, B y C son los estándar, y sus dimensiones ya se encuentran fijadas en la especificación (tabla XII), mientras que las de la barra S serán acordadas entre el fabricante y el comprador.

**Tabla XI. Barras de prueba a utilizar en función del espesor**

Espesor de la pared de la sección de control de la fundición, pulg. (mm)	Barra de prueba
Menos de 0.25 (6)	S
0.25 a 0.50 (6 a 12)	A
0.51 a 1.00 (13 a 25)	B
1.01 a 2.00 (26 a 50)	C
Más de 2.00 (50)	S

**Fuente:** ASTM. **ASTM Annual Book of Standards 01.02.** Página 25.

**Tabla XII. Dimensiones de la barra de prueba**

Barra de prueba	Diámetro fundida, pulg. (mm)			Longitud, pulg. (mm)	
	Nominal	Mínima	Máxima	Mínima (Especificada)	Máxima (Recomendada)
A	0.88 (22.4)	0.85 (21.6)	0.96 (24.4)	5.0 (125)	6.0 (150)
B	1.20 (30.5)	1.14 (29.0)	1.32 (33.5)	6.0 (150)	9.0 (230)
C	2.00 (50.8)	1.90 (48.3)	2.10 (53.3)	7.0 (175)	10.0 (255)
S <sup>A</sup>	...	...	...	...	...

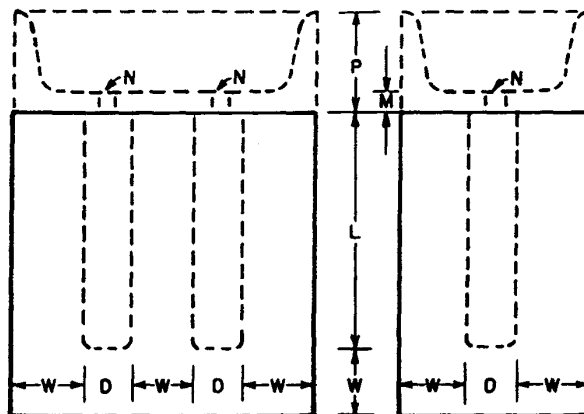
<sup>A</sup>Todas las dimensiones de la barra de prueba S deberán ser acordadas entre el fabricante y el comprador.

**Fuente:** ASTM. **ASTM Annual Book of Standards 01.02.** Página 25.



La elaboración de estas barras de prueba debe hacerse del mismo hierro de las fundiciones que representan, y las dimensiones podrán cambiar dentro de las tolerancias especificadas en la tabla XII. Deben ser fundidas en moldes de arena sílica con los aglutinantes apropiados y con la forma indicada en la figura 5, y todas las condiciones de la elaboración de las barras de prueba deberán ser similares a las condiciones de elaboración de las piezas del lote cuyo contenido se pretende conformar a dicha especificación, es decir, temperatura del molde, enfriamiento dentro del molde o fuera de él, revenido, recocido o cualquier otro tratamiento térmico al que puedan ser sometidas las fundiciones, y asimismo deberá hacerse con las barras de prueba.

**Figura 5. Diseño y dimensiones de molde para barras de prueba**



**Características obligatorias:**

1. Material = Agregado de arena sílica seca.
2. Posición = Barras verticales
3. L = Ver tabla 3.
4. D = Ver tabla 3.
5. W = No menor que el diámetro. D.

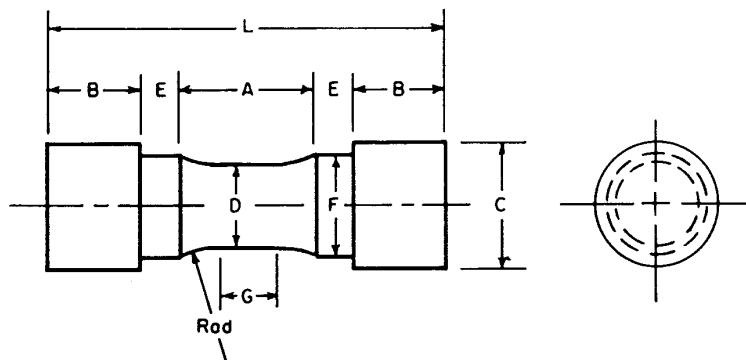
**Características opcionales:**

1. Número de barras de prueba en un solo molde = Se sugiere dos
2. Diseño de tasa vertedora.
3. P = 2 pulg. (50 mm), sugerido.
4. N = 5/16 pulg. (8 mm), sugerido.
5. M = 1.5 N, sugerido

**Fuente: ASTM. ASTM Annual Book of Standards 01.02. Página 26.**

Luego de haberse elaborado las barras de prueba, deberá procederse a maquinar los especímenes de prueba de tensión, que serán las piezas que serán ensayadas. Las dimensiones para los especímenes se definen en la siguiente figura.

**Figura 6. Especímenes de prueba de tensión y sus dimensiones**



Dimensiones, pulg. (mm)	Especímen de Prueba de Tensión A	Especímen de Prueba de Tensión B	Especímen de Prueba de Tensión C
G = Longitud en paralelo	0.50 (13)	0.75 (19)	1.25 (32)
D = Diámetro	0.500 ± 0.010 (12.7 ± 0.25)	0.750 ± 0.015 (19.1 ± 0.4)	1.25 ± 0.025 (31.7 ± 0.050)
R = Radio del filete, min	1 (25)	1 (25)	2 (50)
A = Longitud de la sección reducida, min	1 1/4 (32)	1 1/2 (38)	3 2*5 (57)
L = Longitud total, min	3 3/4 (95)	4 (100)	6 3/8 (160)
C = Diámetro de sección final, aprox.	7/8 (22.2)	1 1/4 (31.8)	1 7/8 (47)
E = Longitud del hombro, min	1/4 (6)	1/4 (6)	5/16 (8)
F = Diámetro del hombro	5/8 ± 1/64 (16 ± 0.5)	15/16 ± 1/64 (25 ± 0.5)	1 7/16 ± 1/64 (36 ± 0.5)
B = Longitud de la sección final	A	A	A

\*Opcional para fijar los sujetadores de la máquina de ensayos.

**Fuente: ASTM. ASTM Annual Book of Standards 01.02. Página 27.**

Estos especímenes deberán ser maquinados concéntricamente al eje de la barra de prueba. Por último, deberá realizarse la prueba de tensión, de tal manera que toda la carga de la máquina de prueba sea axial. El tiempo transcurrido desde el inicio de la carga en la prueba de tensión al momento de la fractura no deberá ser mayor de 15 segundos para el espécimen de prueba A, y no menor de 20 segundos para los especímenes B y C.

Para cada lote de fundiciones que pretendan satisfacer la especificación, el fabricante debe fundir y preparar por lo menos tres barras. Solo una barra debe ser probada en cuanto a si los resultados son conformes a los requerimientos de propiedades (resistencia tensil) de la especificación. En caso se fallara, deberán realizarse dos pruebas más. Si cualquiera de las repruebas fracasan en satisfacer los requerimientos de la especificación, las fundiciones deberán ser rechazadas.

Además de la resistencia tensil, la especificación ASTM A 48 menciona otros requerimientos:

- Dureza
- Composición química
- Microestructura
- Compactación a presión
- Integridad radiográfica
- Dimensiones
- Acabado superficial

Se detallan, en el caso del acabado superficial, los siguientes defectos:

- a) Grietas
- b) Arena adherida
- c) Incrustaciones
- d) Sopladuras

Se prohíben además, cualesquiera reparaciones por conexiones o soldaduras, a menos que se otorgue permiso por escrito de parte del comprador.

### **3.1.2. Requerimientos para fundiciones de hierro para uso general industrial (Especificación ASTM A 834)**

Esta especificación es muy general, y cubre requerimientos que son obligatorios al utilizarse en conjunto con otras normas emitidas por la ASTM (tal como la ASTM A 48), así como ciertos requerimientos suplementarios que podrían ser aplicados cuando se desee realizar pruebas o inspecciones adicionales. Solamente se mencionarán los puntos más importantes, así como los requerimientos suplementarios que se establecen.

#### **3.1.2.1. Requerimientos químicos**

Se establece la manera en la cual se determinarán las características químicas del material, tal como el porcentaje total de carbón, lo que debe hacerse con un espécimen templado con forma de lápiz o con láminas delgadas de aproximadamente 0.8 mm de grosor. Además, no son confiables las perforaciones en el material, debido a una probable pérdida de grafito, y las muestras para análisis de carbono deben ser tomadas a no más de ¼ de pulgada de una superficie fundida.

#### **3.1.2.2. Requerimientos suplementarios**

Se describen ciertos requerimientos suplementarios que deben ser aplicados solamente cuando se especifique en el contrato por el comprador:

1. Ensayo de partículas magnéticas para detectar discontinuidades en la superficie
2. Ensayo de rayos X (radiográfico) para detectar defectos internos
3. Ensayo de líquidos penetrantes para detectar discontinuidades en la superficie

#### 4. Ensayo de dureza en localidades especificadas en las fundiciones

En todos los casos, la extensión del examen y la base para la aceptación o el rechazo serán acordados entre el fabricante y el comprador.

### **3.2. Identificación de aspectos controlables estadísticamente**

Una vez se ha examinado lo que las especificaciones ASTM indican acerca de los requerimientos para hierros fundidos, se tiene una visión técnica de los aspectos a controlar en el plan de control de calidad, pero, además, es necesario añadir los aspectos que particularmente desea cada cliente. Tomando esto en consideración, se pueden clasificar y establecer las características de calidad del plan de control de calidad, como sigue.

#### **3.2.1. Propiedades del material**

Quizá las principales características de calidad a considerar sean estas, ya que se encuentran relacionadas con la resistencia del material y la funcionalidad de las piezas. Si estas propiedades son mantenidas bajo control, se denotará que la composición del metal que se está analizando es constante.

##### **3.2.1.1. Composición química**

Básicamente consiste en determinar el nivel de pureza del metal. Esta se refiere a la concentración de carbono en el metal, así como a la cantidad presente de elementos no metálicos, como por ejemplo, óxidos, carburos y gases disueltos. Sin embargo, en el medio guatemalteco será difícil realizar este tipo de pruebas, en especial para empresas pequeñas y medianas, como en la que se realiza el estudio, por el alto costo que representa para ellas.

### **3.2.1.2. Dureza**

Cuando el tipo de pieza que se esté fabricando requiera tener un cierto nivel de dureza, será conveniente controlar esta propiedad. Debido al tipo de material, lo más común será realizar ensayos de dureza Brinell, aunque podría darse el caso de que se realicen otros ensayos.

### **3.2.1.3. Resistencia tensil**

En cuanto a esta propiedad, aunque pueda parecer de poca importancia en un material tan frágil como lo es el hierro fundido, en realidad su magnitud determinará en gran medida su desempeño al momento de encontrarse en situaciones de flexión, por ejemplo las tapaderas de hierro fundido a utilizarse en aceras. Por lo general se utilizará para controlar esta propiedad la norma ASTM A 48.

### **3.2.1.4. Resistencia a la flexión**

Generalmente se realizará cuando en la pieza se especifique una carga máxima a la cual se puede someter, como por ejemplo en las tapaderas anteriormente mencionadas.

## **3.2.2. Características dimensionales**

El producto debe cumplir con las dimensiones establecidas en la hoja de pedido del cliente, o en el diseño de la pieza, cuando se trate de partes de mecanismos más generalizados. Usualmente estas dimensiones no se habrán logrado al extraer del molde la pieza, sino que esta excederá las mismas, con el objeto de terminar de ajustarla a las medidas por medio del maquinado. Por lo tanto, el control de estas características no deberá efectuarse hasta que ya se haya pasado por las máquinas herramientas.

### **3.2.3. Defectos visuales y de superficie**

En muchas ocasiones es difícil establecer grados de importancia para los defectos de visuales y de superficie. Se suele recurrir a la “habilidad” del operario para distinguir qué defecto puede afectar en mayor medida la percepción del cliente sobre el producto y cuál no. Sin embargo, puede controlarse la cantidad de defectos que cada pieza tenga, para así hacer un esfuerzo para reducirlos y afectar en la menor medida posible la aceptación del producto por parte del comprador.

### **3.3. Selección de los gráficos de control a utilizar**

#### **3.3.1. Gráficos por variables**

##### **3.3.1.1. Gráfico X**

Se utilizará este diagrama de control, junto con el diagrama de control de rangos (Gráfico R), cuando las características de calidad sean cuantitativas, como en el caso de las características dimensionales y las propiedades mecánicas, tales como la dureza y la resistencia tensil.

#### **3.3.2. Gráficos por atributos**

##### **3.3.2.1. Gráfico C**

En el caso de los defectos de superficie y visuales, se hace necesario el uso de diagramas de control por atributos, más específicamente los diagramas de control de disconformidades C ó U. Debido a la practicidad del gráfico C, que evita el tener que realizar divisiones, se utilizará este para realizar el control de calidad.

### **3.4. Selección del tipo de muestreo a utilizar**

En la industria metalúrgica, en muchos casos se realiza una inspección al 100%, debido a que el número de piezas similares es muy reducido. Sin embargo, cuando se fabrican piezas estandarizadas para elaborar maquinarias tales como molinos u otras similares, será suficiente realizar un muestreo aleatorio, es decir, no será necesario inspeccionar la totalidad de piezas fabricadas, sino que solamente se tomará una porción representativa.

#### **3.4.1. Muestreo aleatorio simple**

En este caso, se tomará solamente una muestra a intervalos regulares de tiempo, debido a su mayor simplicidad, y porque los tamaños de lote, por lo general, en este tipo de empresa no serán tan grandes que ameriten utilizar otro tipo de muestreo.

### **3.5. Costos de calidad**

Comúnmente se piensa que costo de calidad es solamente el costo necesario para alcanzar la calidad, tales como los costos de inspección y verificación. Sin embargo, esto deja fuera otros costos de calidad más significativos para la empresa, como los costos de una pobre calidad, es decir, los costos en que incurre la empresa para hallar el producto defectuoso, almacenarlo, corregir el trabajo defectuoso, etc. A estos últimos se les llama “costos por fallos”, mientras que a los primeros se les llama “costos de control”. Además de estos dos, existe otro tipo de costo de calidad, y es el relacionado con la prevención los otros costos anteriormente mencionados. Estos son llamados “costos de prevención”. A continuación se presenta la definición de los tipos de costos de calidad más importantes.



### **3.5.1. Costos de control**

Estos costos están asociados con la determinación de la calidad (o del grado de conformidad a las exigencias de calidad). Esta determinación lleva varias acciones a seguir:

- Control de recepción
- Control del proceso
- Control final
- Auditoría de la calidad del producto.

### **3.5.2. Costos por fallos**

Estos costos pueden dividirse en costos por fallos internos y fallos externos. Los costos por fallos internos son los relacionados con que se descubran defectos en el producto antes de que sea enviado al cliente. Algunos ejemplos de estos costos son los siguientes:

- Pérdidas de material
- Pérdidas de mano de obra
- Costo de reelaboración
- Análisis de los fallos
- Inspección al 100%
- Reducción de precio

En cambio, los costos por fallos externos están asociados con que los defectos sean descubiertos por el cliente. Ejemplos de ellos son:

- Pago de reclamos o de la garantía
- Devolución de material

- Descuentos

### **3.5.3. Costos de prevención**

Son los costos derivados de las acciones emprendidas para evitar que los costos de control y por fallos sean elevados, es decir, para mantenerlos en un mínimo. Entre estas acciones se encuentran:

- Planificación de la calidad
- Revisión del diseño de nuevos productos
- Auditorías de calidad
- Control estadístico del proceso
- Evaluación de los proveedores
- Capacitación del recurso humano

## **4. PRUEBA PILOTO DEL PLAN DE CONTROL DE CALIDAD**

### **4.1. Resultados experimentales**

Para la prueba piloto del plan, dentro de la variedad de aspectos que son controlables estadísticamente y que representan algún parámetro de calidad (muchos de ellos mencionados en el capítulo anterior), solamente se utilizarán dos características.

El primer ejemplo aplicará el control estadístico de calidad a una característica dimensional, siendo esta la diferencia entre los diámetros interior y exterior de los discos utilizados para fabricar molinos de nixtamal, ya que sobre esta variable influyen diversas etapas del proceso, y el grado en el cual se hayan realizado correctamente.

El segundo ejemplo analizará los defectos (no conformidades) visuales y de superficie de un lote de piezas, siendo el tipo de pieza a inspeccionar los soportes a utilizarse en los molinos de nixtamal. De igual manera que en el ejemplo anterior, de hallarse que el proceso no se encuentra bajo control, será un indicador de que en alguna etapa del proceso se está realizando incorrectamente alguna tarea o, en todo caso, de que la materia prima no es la adecuada.

#### 4.1.1. Diseño de formato para registro de datos

**Figura 7. Boleta de datos para gráfico P**

BOLETA DE CONTROL DE ATRIBUTOS				
Proceso:		Operación:		Equipo utilizado:
Característica de calidad:		Pieza a inspeccionar:		Elaboró:
No.	Fecha	Hora	Tamaño de muestra	Número de defectos
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				

**Figura 8. Boleta de datos para gráficos X y R**

BOLETA DE CONTROL DE VARIABLES																				
Proceso:					Operación:					Elaboró:					Fecha:					
Característica de calidad:					Pieza a inspeccionar:					Equipo utilizado:					Unidad de medida:					
Grupo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Muestras	1																			
	2																			
	3																			
	4																			
	5																			
Total																				
Promedio																				
Rango																				

El uso de boletas de recolección de datos sirve para tener un formato de registros estandarizado, de tal forma que al momento de capacitar al personal sobre el uso de estos registros, sea más fácil la labor, ya que se evitan los formatos imprecisos, además de los posibles errores que pueda cometer el operario al ingresar la información.

#### 4.1.2. Control por variables

Como se mencionó anteriormente, se realizará un control estadístico de calidad sobre las dimensiones de las piezas; en este caso, las piezas a inspeccionarse serán los discos para los molinos de nixtamal, los cuales poseen un diámetro interior y un diámetro exterior, puesto que tienen una sección hueca, la cual permite que el producto que se desea moler entre en esta sección y debido a la acción del movimiento circular, sea comprimido y triturado.

La tabla de datos se muestra a continuación:

**Figura 9. Diferencia de diámetros en 100 discos (en cm)**

OBSERVACIONES							
No.	1	2	3	4	5	X	R
1	1.92	1.94	1.94	2.03	2.05	1.976	0.13
2	2.09	1.99	1.93	2.01	1.95	1.994	0.16
3	2.02	1.92	2.08	2.01	1.93	1.992	0.16
4	2.04	1.98	2.04	1.97	1.97	2.000	0.07
5	1.95	1.95	2.09	2.08	2.07	2.028	0.14
6	1.97	1.98	2.09	1.95	2.09	2.016	0.14
7	2.01	1.96	2.02	2.04	1.96	1.998	0.08
8	2.08	2.09	2.09	2.08	1.99	2.066	0.10
9	2.01	2.03	2.08	2.00	1.96	2.016	0.12
10	2.10	2.07	2.04	2.00	2.03	2.048	0.10
11	2.00	2.08	1.93	2.10	2.03	2.028	0.17
12	2.02	2.08	1.97	2.10	1.91	2.016	0.19
13	1.97	2.08	1.98	2.00	2.08	2.022	0.11
14	1.99	2.07	2.02	1.93	2.07	2.016	0.14
15	1.92	2.09	2.05	1.91	1.91	1.976	0.18
16	2.07	2.04	2.02	1.92	1.92	1.994	0.15
17	2.05	2.06	2.06	2.06	2.04	2.054	0.02
18	1.91	2.08	2.09	2.06	1.93	2.014	0.18
19	2.10	1.92	1.99	1.95	2.02	1.996	0.18
20	2.05	2.01	1.95	1.95	1.92	1.976	0.13
						2.011	0.133

Ahora se procede a realizar los cálculos de los límites de control para los gráficos.

Para el gráfico X:

$$\begin{aligned} \text{LIC} &= X - A_2R = 2.011 - (0.577) \times (0.133) = 1.934 \\ \text{LCC} &= X = 2.011 = 2.011 \\ \text{LSC} &= X + A_2R = 2.011 + (0.577) \times (0.133) = 2.088 \end{aligned}$$

donde  $A_2$  fue obtenido de la tabla XIII del anexo.

Para el gráfico R:

$$\begin{aligned} \text{LIC} &= D_3R = 0 \times (0.133) = 0.000 \\ \text{LCC} &= R = 0.133 = 0.133 \\ \text{LSC} &= D_4R = (2.115) \times (0.133) = 0.281 \end{aligned}$$

donde  $D_3$  y  $D_4$  fueron obtenidos de la tabla XIII del anexo.

#### 4.1.3. Control por atributos

Para este caso, será realizado un muestreo de los defectos en las piezas. Los lotes de piezas a inspeccionar en este caso serán los soportes para los molinos de nixtamal, los cuales no son piezas que requieran estar cien por ciento libres de defectos, pero la presencia de ellos influirá en la percepción que el cliente pueda tener del producto. El principal tipo de defectos a encontrarse en esta inspección será el superficial, aunque ello no descarta otro tipo de defectos.

La tabla de datos se muestra a continuación:

**Figura 10. Número de defectos encontrados en los soportes**

No.	OBSERVACIONES	
	Tamaño de la muestra	Número de defectos
1	5	9.00
2	5	5.00
3	5	3.00
4	5	4.00
5	5	2.00
6	5	10.00
7	5	9.00
8	5	7.00
9	5	2.00
10	5	9.00
11	5	3.00
12	5	6.00
13	5	4.00
14	5	7.00
15	5	4.00
16	5	5.00
17	5	4.00
18	5	8.00
19	5	2.00
20	5	7.00
	100	110.00

Ahora se procede a realizar los cálculos de los límites de control para el gráfico C1:

$$\text{Promedio defectos por grupo de control} = 110/20 = 5.50$$

$$\text{LIC} = C - 3\sqrt{C} = (5.5) - 3\sqrt{(5.5)} = -1.54$$

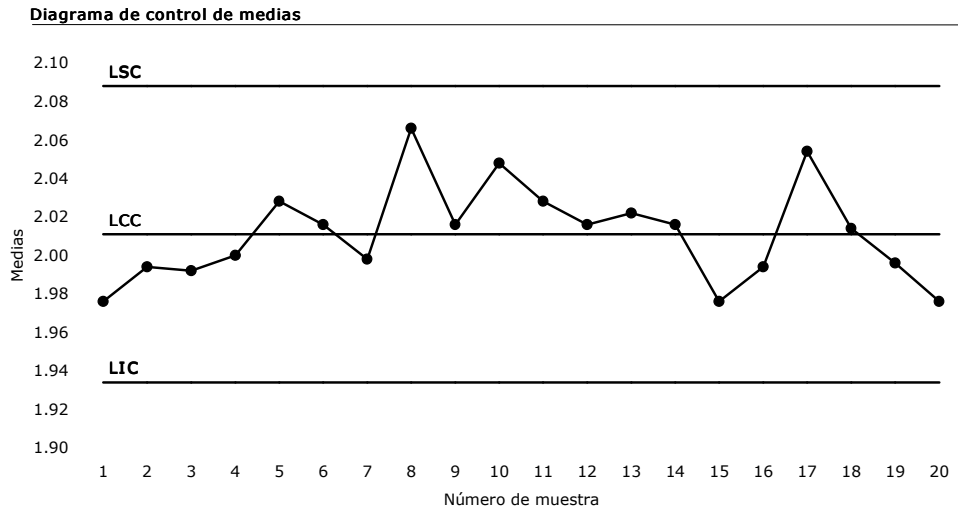
$$\text{LCC} = C = 5.5 = 5.5$$

$$\text{LSC} = C + 3\sqrt{C} = (5.5) + 3\sqrt{(5.5)} = 12.54$$

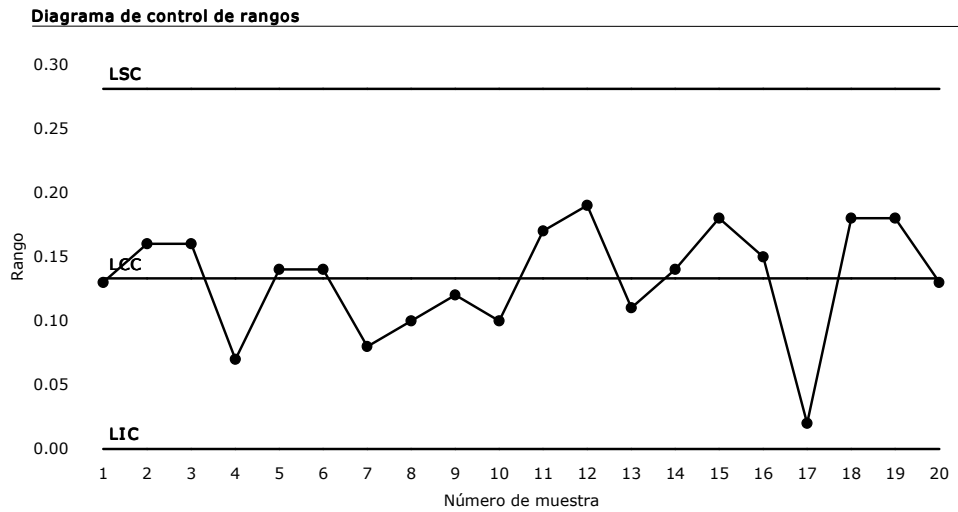
#### 4.2. Gráficos de control de los resultados

Ahora se procede a elaborar los gráficos de control con los datos obtenidos.

**Figura 11. Gráfico X para la diferencia de diámetros**

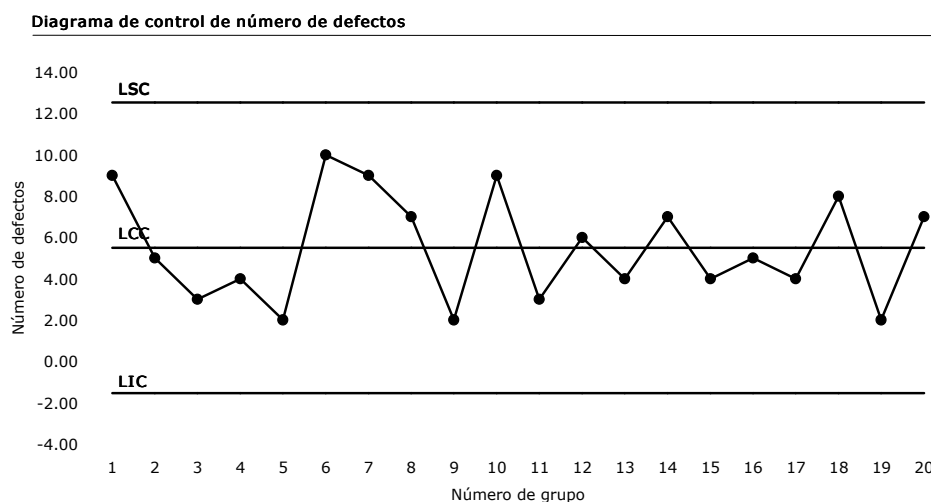


**Figura 12. Gráfico R para la diferencia de diámetros**





**Figura 13. Gráfico C para los defectos en los soportes**



#### 4.2.1. Interpretación de los gráficos de control

Como se mencionó en el capítulo 1, se considera que un proceso se encuentra fuera de control, cuando ocurre una de las siguientes situaciones:

- I. Uno o más puntos están fuera de los límites de control
- II. Una corrida de por lo menos 7 u 8 puntos, donde el tipo de corrida podrá ser ascendente o descendente, una corrida sobre la línea central o debajo de ella, o bien una por encima o por debajo de la media
- III. Dos o tres puntos consecutivos fuera de los límites de advertencia de dos sigmas, pero todavía entre los límites de control.
- IV. Cuatro o cinco puntos consecutivos más allá de los límites sigma.
- V. Un patrón anormal o no aleatorio en los datos
- VI. Uno o más puntos cerca de un límite de control

Con estos criterios, se puede realizar un análisis de los gráficos de control anteriores, y determinar la situación del proceso.

**Gráfico X:** Se observa que a partir de la muestra 8 se encuentra una corrida de 7 puntos sobre la línea central.

**Gráfico R:** El punto correspondiente a la muestra 17 está a punto de cruzar el límite inferior de control, pero aun así se encuentra dentro de los límites aceptables.

**Gráfico C:** A partir de la muestra 9 se observa una corrida de 8 puntos, uno arriba y uno abajo de la línea central.

Por lo tanto, se puede decir que el proceso no se encuentra bajo control, de acuerdo con lo establecido por los tres gráficos de control.

### **4.3. Fuentes de la variación**

De acuerdo con la teoría del control estadístico de calidad, si se encuentra que el proceso se encuentra fuera de control, es debido a que hay una causa atribuible de variación, la cual deberá ser hallada y eliminada. Se analizará cada una de las posibles fuentes de variación, para analizar cuál es la más probable para cada caso.

#### **4.3.1. Insumos utilizados en el proceso**

La calidad de la materia prima, así como la adición de los fundentes adecuados y en la cantidad suficiente, sin lugar a dudas influirá en las características finales del producto. En caso sea excesiva la proporción de material sobrante de fundiciones pasadas a utilizarse en un nuevo proceso, junto con material “nuevo”, este factor puede influir negativamente en las características del producto, ya que este material ya ha sido sometido a una elevación de su temperatura y a fusión, además de que lleva ya cierta cantidad de impurezas, así como los fundentes que fueron utilizados en otra ocasión.

De la misma manera, si se omite la adición de los fundentes, puede también afectarse el grado de calidad del material, puesto que la escoria no será eliminada.

Otro insumo que debe ser cuidadosamente preparado es la arena, debido a que si la consistencia es inadecuada, puede que al ser preparado el molde, este no respire, lo cual ocasionará que, al momento de la colada, el hierro no fluya de una manera correcta.

#### **4.3.2. Equipo utilizado en el proceso**

El equipo más importante a utilizarse en este proceso es el horno, por lo que si la temperatura no es adecuada, al momento de la colada, el hierro frío no fluye dentro del molde, ocasionando la pérdida de la pieza, o que las dimensiones no sean las adecuadas.

Además, al momento de elaborar los moldes de arena, el equipo puede tener un gran impacto sobre las características finales de la pieza. En el caso de la empresa en cuestión, el uso de la apisonadora neumática puede traer consigo un gran beneficio, en el sentido de que será menos probable que la compresión de la arena sea dispar en distintas secciones del molde, lo cual ocasionaría desprendimientos de arena, redundando también en defectos superficiales.

#### **4.3.3. Recurso humano que participa en el proceso**

Es indispensable el correcto manejo de los crisoles, al momento de verter el metal líquido dentro de los moldes, ya que el recurso humano inexperto puede hacer la colada de manera incorrecta, lo cual ocasionará defectos en el material, así como puede que el molde no sea llenado hasta donde deba, lo cual ocasionará piezas defectuosas o con dimensiones incorrectas.

De la misma forma, en la etapa de la elaboración de los moldes, si los trabajadores no tienen el cuidado de evitar que la arena caiga dentro de la cavidad de los mismos, podrían ocasionarse incrustaciones de arena.

## **5. SEGUIMIENTO DEL PLAN DE CONTROL DE CALIDAD**

### **5.1. Capacitación del recurso humano**

El recurso humano es el elemento más importante en cualquier empresa. Es quien lleva a cabo cada etapa del proceso, y si no tiene conciencia sobre la importancia de mejorar la calidad, así como de todas sus implicaciones, no podrá lograrse el objetivo de establecer exitosamente un plan de control de calidad.

La capacitación no debe restringirse al departamento de control de calidad o, en caso no exista este departamento, a las personas que realizarán las tareas de verificación de la calidad. Debe capacitarse a todo el personal de la empresa sobre las herramientas que se utilizarán para llevar a cabo esta labor, tales como los formatos de toma de datos a utilizarse en cada etapa del proceso, la manera de elaborar los gráficos de control, la forma correcta de tomar los datos (es decir, que se sepan utilizar los instrumentos de medición adecuadamente), etc.

Cuando todo el recurso humano de la empresa se encuentre informado acerca de los beneficios de la aplicación del plan de control de calidad, se generará una actitud positiva hacia el mismo, además de que los empleados seguramente encontrarán fallos en el mismo y presentarán propuestas de mejora al plan, generando una correcta retroalimentación.

Aparte de esto, no debe olvidarse que las prácticas de calidad cambiarán con el tiempo, así como la mano de obra es variable en el tiempo, por lo cual no basta con dar una capacitación inicial al momento de implantar el sistema, sino que es necesario dar capacitación de “mantenimiento”, es decir, capacitación para las personas que son de reciente ingreso a la empresa, y también para los empleados que cambien de puesto y este requiera nuevos conocimientos sobre el plan de calidad.

Los principales temas a tratar en un curso de capacitación sobre control de calidad deben ser:

- Definiciones sobre control de calidad
- Definición de la calidad
- Costos de calidad
- Diagramas de proceso
- Control estadístico de calidad
- Gráficos de control (por atributos y por variables)
- Muestreo de aceptación
- Conceptos estadísticos

Y luego, para finalizar, debe darse a conocer el sistema de control de calidad de la empresa:

- Variables a controlar
- Procedimiento de inspección
- Procedimiento de rechazo
- Utilización de los formatos de toma de datos

## **5.2. Reuniones semanales**

Deben establecerse reuniones a intervalos definidos en las que se encuentre el personal idóneo para establecer revisiones al plan de control de calidad, ya que un plan de calidad no es estático, sino dinámico, es decir, no puede mantenerse un sistema de calidad sin efectuarle mejoras continuas, ya que el sistema de calidad perdería vigencia.

Se debe evaluar el grado de eficacia del plan de calidad, así como el comportamiento de los costos de calidad desde la implantación del plan de calidad.

Además de analizar revisiones y mejoras, deberán también analizarse los problemas de calidad que se descubran gracias al plan, ya que si no se encuentran problemas, el plan de control de calidad no estará cumpliendo con su cometido, que es auxiliar para encontrar los fallos que puedan suceder en el proceso.

## **5.3. Establecimiento de índices de calidad**

Es conveniente tener ciertos parámetros que indiquen el grado de provecho que se está obteniendo del establecimiento del plan de control de calidad con respecto a costos, aumento de la calidad, aceptación del cliente, etc. A estos parámetros se les llama "índices de calidad". Para la empresa en estudio, es conveniente establecer los índices de calidad.

### **5.3.1. Número de defectos por unidad**

Este es un indicador importante, ya que muestra en qué medida el proceso ha mejorado su calidad, así como la efectividad del plan de control de calidad. Este valor, por lo general, se podrá obtener de los resultados que se obtengan de los gráficos C. Si este valor no disminuye (siempre y cuando no haya llegado a cero), deberá evaluarse el comportamiento de esta variable durante el proceso, y determinar qué elemento es el que está ocasionando tal número de defectos, como lo pueden ser la calidad de la materia prima, el desempeño de los empleados, la maquinaria, etc.

### **5.3.2. Grado de dureza del material**

Muy probablemente se dará el caso de que algunos clientes necesiten algún grado de dureza del material de las piezas para el uso que de ellas harán, tal como en el caso de las piezas para afiladoras o para molinos de nixtamal; por lo tanto será conveniente mantener indicadores que muestren los valores de esta propiedad. Sin embargo, es importante mencionar que entre las piezas de hierro fundido habrá algunas que necesiten tener un alto grado de dureza, pero habrá otras que necesiten lo contrario, ya que un alto grado de dureza forzosamente implica un bajo grado de ductilidad, lo cual merece tomarse en cuenta ya que el aumento o disminución de este índice de calidad no forzosamente indica una mejoría, sino que esta deberá determinarse de acuerdo a los requerimientos específicos de cada cliente.



### **5.3.3. Costos de calidad**

El empresario, al implementar un sistema de control de calidad, necesariamente tendrá que realizar un gran esfuerzo de coordinación, así como ciertas erogaciones, y lo hará esperando que tal inversión rinda frutos, como un incremento en las utilidades, ya sea por la disminución de los costos o por el incremento de las ventas. Los costos que deben disminuir para demostrar que el plan de control de calidad está funcionando correctamente son los costos de calidad relativos a costos por fallos internos y los costos por fallos externos. En cambio, los costos de prevención y los costos de control seguramente aumentarán, pero el aumento no debe ser tan grande como para anular la reducción de los costos por fallos. Por ello, debe establecerse también como índice de calidad el decremento de los costos de calidad.

### **5.3.4. Satisfacción del cliente**

Desde luego, este es el indicador más importante en lo que respecta a la evaluación de un plan de control de calidad, pero también es el más difícil de medir, ya que la percepción del cliente sobre el producto es algo muy abstracto. Pero a través de encuestas que contengan escalas para que el cliente muestre en qué medida se halla complacido por la calidad del producto, es posible estimar este índice de calidad. A continuación se muestra un ejemplo de boleta de encuesta para los clientes.



## CONCLUSIONES

1. El proceso de elaboración de piezas de hierro fundido consta de las siguientes etapas principales: la elaboración de los modelos, la realización de los moldes de arena, la fundición y colada del hierro, la apertura de moldes y posterior inspección de las piezas, para concluir con el maquinado de las piezas y una inspección final.
2. Para el control estadístico del proceso, se identificaron tres tipos de aspectos que pueden representar características de calidad para el proceso de elaboración de piezas de hierro fundido, dependiendo de las necesidades del cliente y los requisitos contractuales. Entre estos aspectos se encuentran las propiedades del material, tales como la composición química, la dureza, la resistencia a la flexión, etc.; las características dimensionales, y, por último, los defectos visuales y de superficie.
3. Al efectuarse una prueba piloto sobre características dimensionales, así como de defectos visuales y de superficie, los resultados mostraron que el proceso no se encuentra bajo control, debido a que es posible encontrar tendencias no aleatorias, puntos cercanos a los límites de control, así como corridas de puntos en un solo lado de la gráfica.

4. Entre los posibles orígenes de tales variaciones en la tendencia del proceso, cabe mencionar: una mala selección de la materia prima, para el caso del metal; una mala preparación de la arena; falta de capacitación o de experiencia del operario al momento de elaborar el molde; negligencia por parte de los trabajadores al momento de verter el metal al molde; y por último, que el uso del equipo no se haya extendido hacia todas las piezas, refiriéndose específicamente al apisonador neumático.
  
5. El uso de gráficos de control en la industria metalúrgica solamente puede ser empleado si el número de piezas a fabricarse es suficiente como para poderse elaborar. En el caso de piezas diseñadas a la medida, a elaborarse una sola vez, el control de las propiedades del material en su conjunto podría tomarse en cuenta.
  
6. El plan de control de calidad diseñado aquí puede ser utilizado en cualquier industria metalúrgica, debido a que las características de calidad fueron clasificadas y descritas en forma genérica. Solamente habrá que identificar la norma ASTM que corresponda al tipo de material con que se trabaje en dicha industria.

7. Como seguimiento al plan de control de calidad, se establecen acciones tales como la capacitación constante a los trabajadores, así como la mejora del plan de calidad por medio de la retroalimentación que ellos brinden; una serie de reuniones periódicas para que se dé solución a los problemas de calidad que puedan hallarse por medio del plan de control; y de la misma manera, para poder tener señales que muestren el grado de avance de la empresa, el establecimiento de índices de calidad, los cuales servirán de guía y ayudarán a determinar si se está mejorando o, de lo contrario, emprender las acciones correctivas necesarias para tal propósito.



## RECOMENDACIONES

1. Para evitar incurrir en gastos innecesarios de control y de prevención, deben establecerse, por medio de una encuesta a los clientes, las características que tienen más importancia para ellos, y, de la misma forma, determinar las especificaciones para dichas características.
2. En el caso de las variaciones en las características dimensionales, para evitar que ocurran deben tomarse las precauciones necesarias a fin de que:  
a) los moldes se encuentren bien elaborados, b) los empleados tengan las precauciones del caso al verter el hierro fundido dentro del molde y c) la preparación de arena se lleve a cabo correctamente, inspeccionando la consistencia de la misma antes de ser utilizada para elaborar los moldes.
3. Se debe establecer un programa de capacitación a los empleados que actualmente laboran en la empresa, para que, al momento de ser necesario implantar por completo el sistema de calidad, no exista resistencia al cambio por parte de ellos, sino que, al contrario, de suyo se sientan identificados con este tipo de procedimientos.
4. De la misma forma, debe establecerse un plan de inducción y capacitación a los trabajadores de primer ingreso a la empresa, para que conozcan las herramientas de control de calidad y se familiaricen con ellas, así como con el proceso de fabricación.

5. Al momento de decidir respecto a la implementación o no del plan de control de calidad en la empresa, deberá tomarse en cuenta el volumen de producción de las piezas a ser controladas, debido a que si el nivel no lo amerita, no podrán obtenerse datos significativos para poder efectuar un adecuado control.
  
6. Al momento de querer implementar el plan de control de calidad en una empresa metalúrgica distinta a la mencionada en este trabajo, deberán observarse los posibles cambios que puedan derivarse, ya sea de la diferencia entre los procesos, o del material con que se trabaje.
  
7. Se recomienda el uso de otras herramientas de calidad, tales como los diagramas de causa y efecto o los gráficos de pareto, los cuales pueden ser de gran utilidad al momento de tener que analizar las causas de variación en el proceso.



## BIBLIOGRAFÍA

American Society for Testing and Materials. **ASTM Annual book of standards**. Volumen 01.02. Estados Unidos: 1990. 644pp.

Avner, Sydney. **Introducción a la metalurgia física**. Segunda edición. México: McGraw Hill, 1988. 694 pp.

Duncan, Acheson J. **Control de calidad y estadística industrial**. México: Alfaomega, 1990. 1084pp.

Jurán, J. M. y Gryna, Frank. **Manual de control de calidad**. Volumen I. Cuarta Edición. España: McGraw Hill, 1993.

Montgomery, Douglas C. **Introducción al control estadístico de la calidad**. México: Iberoamérica, 1991. 446pp.

Orozco Miranda, Wendy Marisol. Control estadístico de calidad en la materia prima y en el proceso de tubería industrial redonda. Tesis Ingeniería Industrial. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2001. 98pp.

Subuyuj Gutierrez, Carlos Enrique. Diseño de un sistema para controlar la calidad en una empresa productora de envases plásticos basado en control estadístico de calidad. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2002. 125pp.

Vachette, Jean-Luc. **Mejora continua de la calidad: Control estadístico del proceso (SPC)**. España: CEAC, 1992. 307pp.



## APÉNDICE

En el capítulo 3, al elaborar el diseño del plan de control de calidad, se establecieron tres tipos de características de calidad susceptibles de ser estadísticamente controladas. Dos de esos tipos de características fueron consideradas en la prueba piloto, siendo estas las referentes a las características dimensionales y a los defectos visuales y de superficie. Sin embargo, las propiedades del material no fueron consideradas para este propósito. La razón de su exclusión es muy sencilla: los costos que implicaba para la empresa el tener que elaborar una gran cantidad de piezas solamente para ser ensayadas.

Sin embargo, para una ejemplificación de los ensayos que se realizarían en caso se considerara incluir tales propiedades en el plan de control de calidad, se incluye en este apéndice una breve descripción de un ensayo realizado a una tapadera de hierro fundido, a fin de determinar si cumple con el requerimiento de carga establecido en su anverso por el fabricante, y así determinar, también, el grado de calidad del producto, representado en este caso por dicha propiedad del material.

**Figura 15. Tapadera de hierro fundido a ser ensayada**



La tapadera a ser ensayada (figura 15) tiene un diámetro de 80 centímetros, con ocho rayos de 3 cm de peralte sobre la plancha y 1.5 en la parte inferior, y 2 cm de grosor. La tapadera también cuenta con su respectivo anillo, el cual será el que la sostenga al realizar el ensayo, para que las condiciones sean semejantes a las de uso.

**Figura 16. Prensa hidráulica para el ensayo**

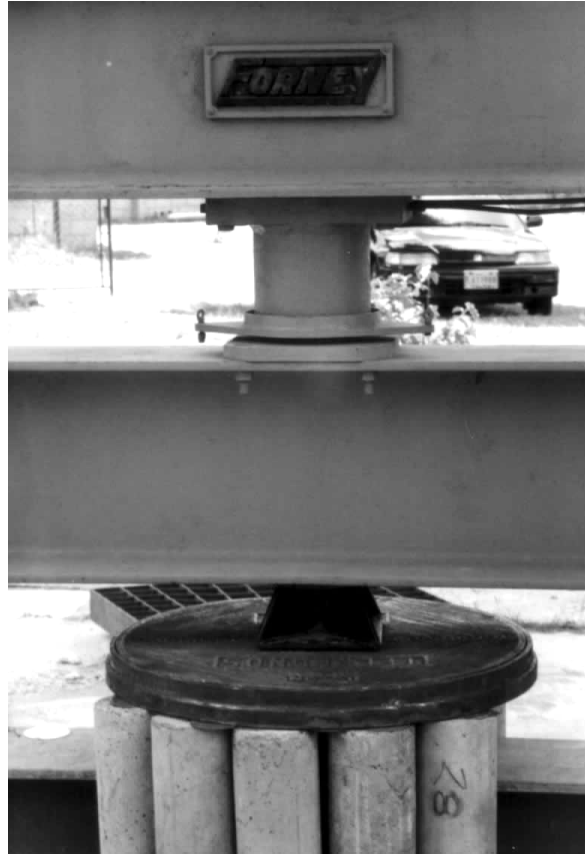


El procedimiento consistió en colocar la tapadera, con su respectivo anillo de soporte, bajo la prensa hidráulica (figuras 16, 17 y 18).

**Figura 17. Colocación de la tapadera para el ensayo**



**Figura 18. Colocación de la tapadera para el ensayo (vista alternativa)**



**Figura 19. Disco de acero utilizado para transmitir la carga**



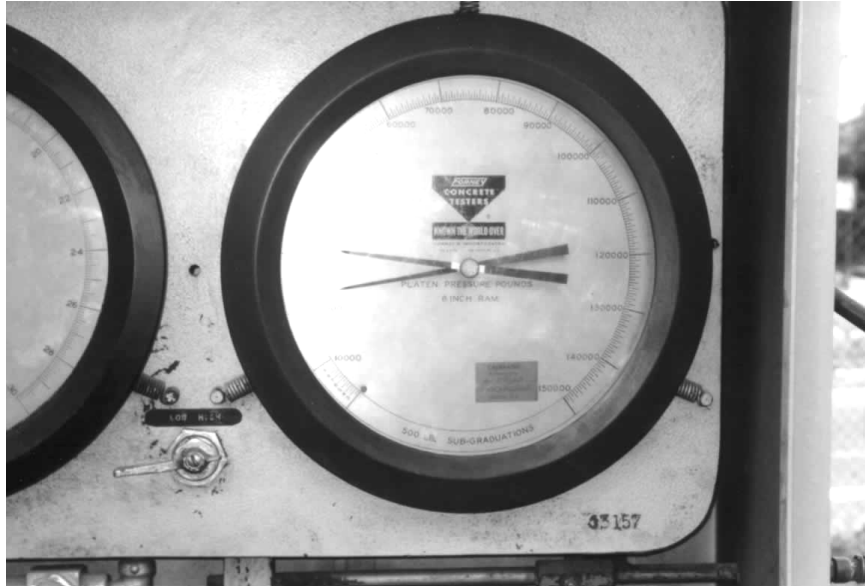
La carga sería aplicada a través de un disco de acero de 20.5 cm de diámetro colocado en el centro de la tapadera (figura 19).

**Figura 20. Aplicación de la carga**



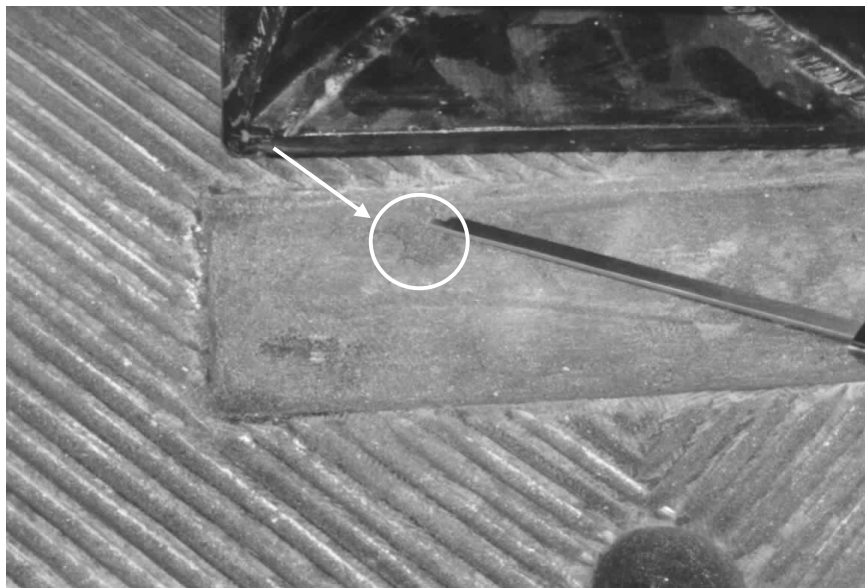
Posteriormente se procedió a aplicar la carga gradualmente (figura 20), por medio de un mecanismo manual, observándose dicha carga en el indicador circular de la figura 21.

**Figura 21. Indicador de carga aplicada**



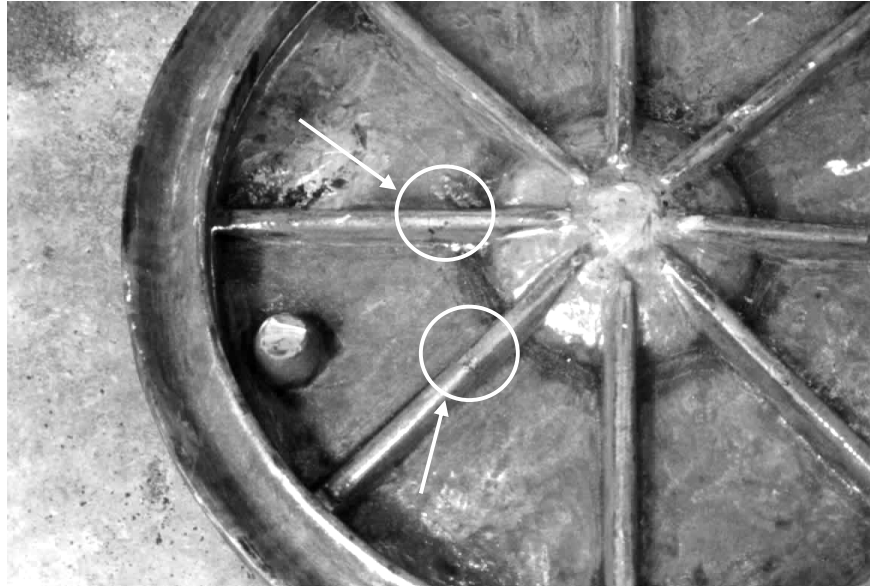
Al llegar a 24,500 lb de carga, se presentó la falla, señalándose en la figura 22 el descascamiento en el anverso de la tapadera al llegar a dicha carga.

**Figura 22. Descascamiento en el anverso de la tapadera**





**Figura 23. Muestra de la falla en el reverso de la tapadera**



En la figura 23 se muestran las fallas en los rayos, que se presentaron a 16 cm del eje.

Por lo tanto, el principal dato que se utilizaría como característica de calidad en este ensayo, sería la carga de falla, igual a 24,500 lb, lo cual indica que sobrepasa en 500 libras la carga nominal establecida en la tapadera de hierro fundido (24,000 libras ó 12 toneladas).



## ANEXOS

**Tabla XIII. Factores para determinar límites de control en gráficos por variables**

Tamaño del subgrupo	Factor para gráfico X	Factores para gráfico R	
		D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>
n	A <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>
2	1.880	0.000	3.267
3	1.023	0.000	2.574
4	0.729	0.000	2.282
5	0.577	0.000	2.114
6	0.483	0.000	2.004
7	0.419	0.076	1.924
8	0.373	0.136	1.864
9	0.337	0.184	1.816
10	0.308	0.223	1.777
11	0.285	0.256	1.744
12	0.266	0.283	1.717
13	0.249	0.307	1.693
14	0.235	0.328	1.672
15	0.223	0.347	1.653
16	0.212	0.363	1.637
17	0.203	0.378	1.622
18	0.194	0.391	1.608
19	0.187	0.403	1.597
20	0.180	0.415	1.585
21	0.173	0.425	1.575
22	0.167	0.434	1.566
23	0.162	0.443	1.557
24	0.157	0.451	1.548
25	0.153	0.459	1.541

Fuente: Vachette, Jean-Luc. **Mejora continua de la calidad.** Página 306