

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA FÍSICA



INFORME DE SUFICIENCIA PARA OPTAR EL TÍTULO  
PROFESIONAL DE INGENIERO FÍSICO

TITULADO

**“MEDICIÓN DE DUREZA DE TUBOS DE PLOMO UTILIZANDO UNA BALANZA.”**

PRESENTADO POR:  
**DIEGO A.TORRES GUILLÉN**

Asesor  
Mg. Clemente Luyo Cacho

LIMA – PERU  
2015

## **DEDICATORIA**

El presente informe se la dedico a mis padres que fueron pilares fundamentales en mi formación profesional por brindarme la confianza, consejos, oportunidad y recursos para lograrlo, a mi compañera de toda la vida que siempre supo estar ahí brindándome su amor, paciencia y comprensión, a mis compañeros de trabajo que me apoyaron en la realización de los experimentos, a los profesores que fueron una guía y ejemplo a lo largo de mi vida universitaria y sobre todo a mi asesor que en esta recta final supo guiarme hasta la realización de este trabajo.

Seamos realistas y hagamos lo imposible.

## INDICE

RESUMEN .....	6
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	7
1.1 Antecedentes .....	7
1.2 Objetivos. ....	7
1.2.1 Objetivo General .....	7
1.2.2 Objetivos específicos .....	7
CAPÍTULO 2. JUSTIFICACIÓN .....	8
CAPÍTULO 3. FUNDAMENTO TEÓRICO .....	9
3.1 Dureza .....	9
3.2. Método de ensayo de Dureza Brinell [2] .....	9
3.2.1 Principio del Método y Simbología.....	9
3.2.2 Campo de aplicación .....	11
3.2.3 Máquina de ensayo.....	11
3.2.4 Probeta de ensayo.....	11
3.2.5 Procedimiento .....	12
3.3. Estimación de la Incertidumbre de la Medición [3] .....	13
3.3.1 Modelo Matemático.....	13
3.3.2 Métodos para cuantificar las fuentes de incertidumbre .....	14
3.3.3 Incertidumbre combinada .....	17
3.3.4 Incertidumbre expandida .....	18
3.4 Análisis del sistema de medición .....	19
3.4.1 Repetibilidad de los resultados de las mediciones [5]: .....	19
3.4.2 Reproducibilidad de los resultados de mediciones [5]: .....	20
3.4.3 Estudio de Repetibilidad y Reproducibilidad del sistema de medición (cruzado) ...	20
3.5 Influencia del Antimonio en el plomo.....	23
CAPÍTULO 4. PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES .....	25
4.1 Equipos y Materiales utilizados .....	25
4.1.1 Máquina de ensayo de dureza.....	25
4.1.2 Microscopio Compuesto.....	26

4.1.3 Tubo de plomo a analizar.....	26
4.1.4 Indentador de Acero.....	27
4.1.5 Pesas para aplicar la Fuerza en el ensayo .....	27
4.2 Preparación de las Muestras .....	27
4.3 Procedimiento .....	28
<b>CAPÍTULO 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES .....</b>	<b>30</b>
5.1. Datos obtenidos para el cálculo de la incertidumbre de medición del microscopio. ....	30
5.2 Datos obtenidos para calcular la incertidumbre de medición y realizar el análisis de repetibilidad y reproducibilidad del sistema de medición. ....	30
5.3 Datos obtenidos para el análisis de la exactitud. ....	46
5.4 Cálculo de la incertidumbre de medición del microscopio .....	49
5.5 Calculo de la Dureza y su incertidumbre de medición.....	49
<b>CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN.....</b>	<b>54</b>
6.1 Análisis del Cálculo de Incertidumbre de Dureza. ....	54
6.2 Análisis de Repetibilidad y Reproducibilidad (R&R) en el sistema de medición .....	54
6.2.1 Análisis de R&R para el tubo 24-14.....	54
6.2.2 Análisis de R&R para el tubo 24-16.....	57
6.2.3 Análisis de R&R para el tubo 17-9.....	59
6.2.4 Análisis de R&R para el tubo 13-9.....	61
6.2.5 Análisis de R&R para la placa de plomo (~ 0%Sb).....	63
6.3 Evaluación de la Dureza vs %Sb .....	66
<b>CAPITULO 7. CONCLUSIONES.....</b>	<b>71</b>
<b>CAPÍTULO 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>72</b>
<b>ANEXO A: Parámetros para el Método de Ensayo .....</b>	<b>74</b>
<b>ANEXO B: Mediciones en el Microscopio Leica .....</b>	<b>76</b>
<b>ANEXO C: Análisis de R&amp;R en el MINITAB .....</b>	<b>81</b>
<b>ANEXO D: Documentación Utilizada .....</b>	<b>83</b>

## **INDICE DE FIGURAS**

Figura 1 Principio del Ensayo .....	10
Figura 2 Máquina de ensayo de dureza usando una balanza electrónica Camry.....	25
Figura 3 Microscopio Leica Modelo DM750 y una cámara de modelo DFC295.....	26
Figura 4 Tubo de plomo 24/14 y 2 muestras .....	26

Figura 5 Indentador de 1 mm .....	27
Figura 6 Pesas utilizadas en el ensayo de Dureza. ....	27
Figura 7 Izquierda: Muestras de tubo de plomo 24/14 pulidas y cortadas.....	28
Figura 8 Variación de la componentes – Tubo de plomo 24-14 .....	56
Figura 9 Gráfica de control de rangos – Tubo de Plomo 24-14 .....	56
Figura 10 Gráfica por operador – Tubo de Plomo 24-14 .....	56
Figura 11 Variación de la componentes – Tubo de Plomo 24-16.....	58
Figura 12 Gráfica de control de rangos – Tubo de plomo 24-16.....	58
Figura 13 Gráfica por operador – Tubo de Plomo 24-16 .....	58
Figura 14 Variación de la componentes – Tubo de Plomo 17-9.....	60
Figura 15 Gráfica de control de rangos – Tubo de Plomo 17-9 .....	60
Figura 16 Gráfica por operador – Tubo de Plomo 17-9 .....	61
Figura 17 Variación de la componentes – Tubo de plomo 13- 9 .....	62
Figura 18 Gráfica de control de rangos – Tubo de plomo 13-9.....	62
Figura 19 Gráfica por operador – Tubo de Plomo 13-9 .....	63
Figura 20 Variación de la componentes – placa de plomo (~ 0%Sb).....	64
Figura 21 Gráfica de control de rangos – placa de plomo (~ 0%Sb) .....	65
Figura 22 Gráfica por operador – placa de plomo (~ 0%Sb) .....	65
Figura 23 Porcentaje de antimonio vs Dureza, de la tabla de valores teóricos .....	68
Figura 24 Porcentaje de antimonio vs Dureza, comparativo experimental y teórico.....	69
Figura B 1 Lente de 10x .....	76
Figura B 2 Muestra colocado sobre una porta muestras en la platina del microscopio. ....	76
Figura B 3 Luz dirección del microscopio incidiendo en la huella deseada. ....	77
Figura B 4 Ajuste macroscópico y microscópico del microscopio. ....	77
Figura B 5 Visualización de la huella en el programa LAS V4.1 .....	78
Figura B 6 Capturando la imagen utilizando el Programa LAS V4.1 del Microscopio Leica. Apretar “Adquirir Imagen” y luego confirmar apretando Objetivo “10x” y “Adquirir”.....	78
Figura B 7 Insertando el nombre de la imagen. ....	79
Figura B 8 Trazando línea de distancia y capturando imagen en el programa LAS V4.1 del microscopio LEICA .....	80
Figura B 9 Trazando 2 diámetros en la huella, utilizando el Programa LAS V4.1.....	80
Figura C 1 Ordenamiento de los valores de parte (muestra), operador y medición.....	81
Figura C 2 Ruta para realizar análisis de R&R en Minitab.....	81
Figura C 3 Cuadro de R&R – Minitab.....	82

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Criterios a considerar para la GRR.....	22
Tabla 2 Impacto del Número de Categorías Distintas (NCD) de la Distribución del Proceso en Actividades de Análisis y Control.....	22
Tabla 3 Propiedades mecánicas de los grados de pureza del plomo.....	23
Tabla 4 Propiedades mecánicas de la aleación Pb-Sb.....	24
Tabla 5 Datos obtenidos en la medición del campo visual del microscopio.....	30
Tabla 6 Datos obtenidos para el diámetro de huella Operador A – tubo de plomo 24-14.....	31
Tabla 7 Datos obtenidos para los pesos Operador A – tubo de plomo 24-14.....	31
Tabla 8 Datos obtenidos para el diámetro de huella Operador B – tubo de plomo 24-14.....	32
Tabla 9 Datos obtenidos para los pesos Operador B – tubo de plomo 24-14.....	32
Tabla 10 Datos obtenidos para el diámetro de huella Operador C – tubo de plomo 24-14.....	33
Tabla 11 Datos obtenidos para los pesos Operador C – tubo de plomo 24-14.....	33
Tabla 12 Datos obtenidos para el diámetro de huella Operador A – tubo de plomo 24-16.....	34
Tabla 13 Datos obtenidos para los pesos Operador A – tubo de plomo 24-16.....	34
Tabla 14 Datos obtenidos para el diámetro de huella Operador B – tubo de plomo 24-16.....	35
Tabla 15 Datos obtenidos para los pesos Operador B – tubo de plomo 24-16.....	35
Tabla 16 Datos obtenidos para el diámetro de huella Operador C – tubo de plomo 24-16.....	36
Tabla 17 Datos obtenidos para los pesos Operador C – tubo de plomo 24-16.....	36
Tabla 18 Datos obtenidos para el diámetro de huella Operador A – tubo de plomo 17-9.....	37
Tabla 19 Datos obtenidos para los pesos Operador A – tubo de plomo 17-9.....	37
Tabla 20 Datos obtenidos para el diámetro de huella Operador B – tubo de plomo 17-9.....	38
Tabla 21 Datos obtenidos para los pesos Operador B – tubo de plomo 17-9.....	38
Tabla 22 Datos obtenidos para el diámetro de huella Operador C – tubo de plomo 17-9.....	39
Tabla 23 Datos obtenidos para los pesos Operador C – tubo de plomo 17-9.....	39
Tabla 24 Datos obtenidos para el diámetro de huella Operador A – tubo de plomo 13-9.....	40
Tabla 25 Datos obtenidos para los pesos Operador A – tubo de plomo 13-9.....	40
Tabla 26 Datos obtenidos para el diámetro de huella Operador B – tubo de plomo 13-9.....	41
Tabla 27 Datos obtenidos para los pesos Operador B – tubo de plomo 13-9.....	41
Tabla 28 Datos obtenidos para el diámetro de huella Operador C – tubo de plomo 13-9.....	42
Tabla 29 Datos obtenidos para los pesos Operador C – tubo de plomo 13-9.....	42
Tabla 30 Datos obtenidos para el diámetro de huella Operador A – placa de plomo (~ 0 %Sb).....	43
Tabla 31 Datos obtenidos para los pesos Operador A – placa de plomo (~ 0 %Sb).....	43
Tabla 32 Datos obtenidos para el diámetro de huella Operador B – placa de plomo (~ 0 %Sb).....	44
Tabla 33 Datos obtenidos para los pesos Operador B – placa de plomo (~ 0 %Sb).....	44
Tabla 34 Datos obtenidos para el diámetro de huella Operador C – placa de plomo (~ 0 %Sb).....	45
Tabla 35 Datos obtenidos para los pesos Operador C – placa de plomo (~ 0 %Sb).....	45
Tabla 36 Datos obtenidos para el diámetro de huella y pesos Operador A – Tubo de Plomo 24-14 (CC 36463).....	46

Tabla 37 Datos obtenidos para el diámetro de huella y pesos Operador A – Tubo de Plomo 24-14 (CC 36022).....	46
Tabla 38 Datos obtenidos para el diámetro de huella y pesos Operador A – Placa N°2 de plomo (~ 0 %Sb).....	47
Tabla 39 Datos obtenidos para el diámetro de huella y pesos Operador A – Tubo de Plomo 13-9 (CC 35897) .....	47
Tabla 40 Datos obtenidos para el diámetro de huella y pesos Operador A – Tubo de Plomo 24-14 (CC 35333).....	48
Tabla 41 Resultados promedio de %Sb.....	48
Tabla 42 Calculo de incertidumbre de medición.....	50
Tabla 43 Datos de Dureza e incertidumbre de medición – Tubo de plomo 24-14 .....	51
Tabla 44 Datos de Dureza e incertidumbre de medición – Tubo de plomo 24-16 .....	51
Tabla 45 Datos de Dureza e incertidumbre de medición – Tubo de plomo 17-9 .....	52
Tabla 46 Datos de Dureza e incertidumbre de medición – Tubo de plomo 13-9 .....	52
Tabla 47 Datos de Dureza e incertidumbre de medición – Placa de plomo (~ 0%Sb).....	53
Tabla 48 %Contribución – Tubo de plomo 24-14 .....	55
Tabla 49 %Variación – Tubo de plomo 24-14.....	55
Tabla 50 %Contribución – Tubo de plomo 24-16 .....	57
Tabla 51 %Variación – Tubo de plomo 24-16.....	57
Tabla 52 %Contribución – Tubo de plomo 17-9 .....	59
Tabla 53 %Variación – Tubo de plomo 17-9.....	59
Tabla 54 %Contribución – Tubo de plomo 13-9 .....	61
Tabla 55 %Variación – Tubo de plomo 13-9.....	61
Tabla 56 %Contribución – placa de plomo (~0 %Sb).....	63
Tabla 57 %Variación – placa de plomo (~0 %Sb).....	64
Tabla 58 Resultados de dureza de 4 tubos de plomo adicionales y una placa de plomo.....	66
Tabla 59 Resultados de dureza de vs %Sb – Sistema de Medición.....	67
Tabla 60 Valores de %Sb y Dureza - Teóricos .....	68
Tabla 61 Valores de %Sb y Dureza - Teóricos .....	70
Tabla A 1 Tolerancias para distintos diámetros de la esfera.....	74
Tabla A 2 Espesor mínimo de la probeta de ensayo (mm) .....	74
Tabla A 3 Relación carga-diámetro para distintos materiales metálicos .....	75

## **MEDICIÓN DE DUREZA DE TUBOS DE PLOMO UTILIZANDO UNA BALANZA.**

### **RESUMEN**

La medición de Dureza de Plomo es de utilidad como control de calidad a los tubos de plomo antimoniado (en aleación con pequeños porcentaje de antimonio menores a 1%Sb). Para los rangos de dureza de plomo encontrados (4,5 - 7 HB) el costo de la compra de un durómetro es elevado. El presente trabajo pretende dar una solución a la medición de dureza de tubos de plomo utilizando materiales de bajo costo. En el presente informe se detallará el método usado para medir la dureza de tubos de plomo utilizando una balanza electrónica de cinco kg. El método está basado en la norma española UNE EN-ISO 6506-1 “Ensayo de Dureza Brinell”. En el informe se presentara los materiales utilizados, el diseño creado, la incertidumbre de medición, el análisis precisión y exactitud del método correspondiente para obtener la medición de Dureza Brinell de diferentes medidas de tubo plomo.

Palabras claves. Dureza, plomo antimoniado, Dureza Brinell.



## **CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1 Antecedentes**

El trabajo es basado completamente en la implementación de la norma UNE EN-ISO 6506-1 “Ensayo de Dureza Brinell”.

### **1.2 Objetivos.**

#### **1.2.1 Objetivo General**

Implementar el método UNE EN-ISO 6506-1, para la medición de durezas Brinell de tubos de plomo antimoniado de diferentes medidas, utilizando una balanza electrónica.

#### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Construir un prototipo para la medición de dureza con materiales de bajo costo.
- Determinar la incertidumbre de medición del método de ensayo de dureza.
- Comprobar que el sistema de medición tiene la repetibilidad, la reproducibilidad, la precisión y la exactitud suficientes para el objetivo de aplicación.

## CAPÍTULO 2. JUSTIFICACIÓN

El presente trabajo surge debido a la necesidad de medir la Dureza de Tubo de Plomo antimoniado como parte del control de calidad que se le hace a estos insumos.

Inicialmente se recurrió a 2 posibles soluciones, medir dureza en un laboratorio acreditado externo o comprar un durómetro.

Sobre la primera propuesta, se investigó en el Sistema Nacional de Acreditación (SNA-INACAL) y los laboratorios acreditados para realizar métodos de ensayo de dureza en metales en el Perú son: el Laboratorio de materiales de la PUCP, SIDER PERU y SOLDEXA S.A. [1]. Se realizó las consultas y el único que podía medir en el rango necesitado era el Laboratorio de Materiales de la PUCP sin embargo los resultados no permitían distinguir entre muestras dado que la resolución era de 1 HV y su incertidumbre de medición de  $\pm 3,2$  HV. Debido al rango de trabajo entre 4,5 HV a 7 HV (para este rango es equivalente al mismo valor en Dureza Brinell) no se encontró algún laboratorio que reporte los valores con mejor resolución.

Sobre la segunda solución propuesta, se cotizaron equipos capaces de leer una resolución de 0,01 o 0,1 ya sea Dureza Brinell o Vickers, los equipos encontrados están valorizados en más de 60 mil dólares, lo que no era viable debido a que el equipo solo tendría un único uso.

Finalmente se optó por diseñar un equipo propio capaz de registrar dureza en el rango de 4,5 HB a 7 HB, que muestre una resolución de uno o dos decimales y a bajo costo. Dado los materiales que se contaban se decidió trabajar con Dureza Brinell ya que a diferencia de otros métodos el indentador es una bolilla de acero que es más fácil de conseguir que un punta piramidal que exigían otros métodos.

## **CAPÍTULO 3. FUNDAMENTO TEÓRICO**

### **3.1 Dureza**

La dureza mide la resistencia que un material ofrece para ser deformado plásticamente.

Existen diferentes métodos (Rockwell, Vickers, Brinell, etc.) para realizar este proceso, por lo que los resultados de la medida de la dureza dependen del modo como se realice el ensayo.

Para nuestro caso el método utilizado es el Método de ensayo Brinell.

### **3.2. Método de ensayo de Dureza Brinell [2]**

#### **3.2.1 Principio del Método y Simbología**

El método consiste en presionar con una fuerza  $F$ , un indentador (de diámetro  $D$ ), contra la superficie de una probeta de ensayo, dejando en ella una huella de diámetro  $d$ .

La dureza Brinell es proporcional a la relación obtenida dividiendo la carga entre el área de la superficie curva de la huella.

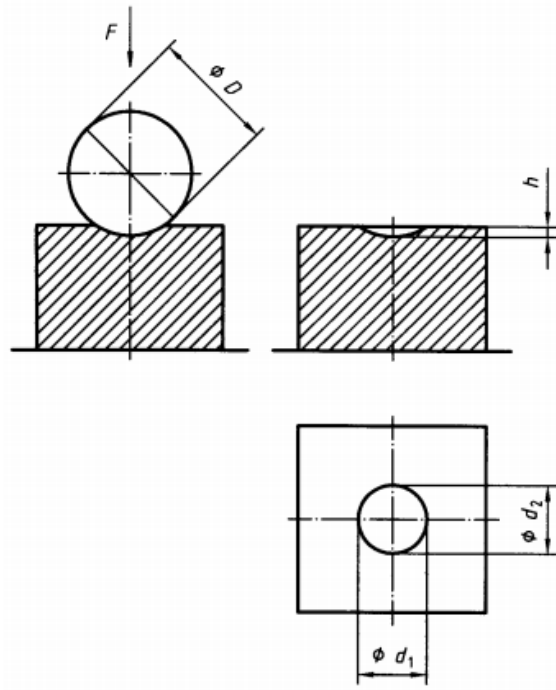


Figura 1 Principio del Ensayo

De la definición la Dureza Brinell (HBW) se calcula de la siguiente manera:

$$HBW = \text{Constante} \times \frac{\text{Carga de Ensayo}}{\text{Área de la superficie de la huella}}$$

Entonces:

$$HBW = 0,102 \times \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1)$$

Donde:

D: Diámetro del indentador (mm).

d: Diámetro de huella (mm), medidos a 90° ( $d = \frac{d_1 + d_2}{2}$ )

h: Profundidad de la huella (mm) ( $\frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2}$ )

Constante:  $\frac{1}{g} = \frac{1}{9,80665} = 0,102$  ; con g: aceleración debida a la gravedad ( $m/s^2$ )

Para detallar las condiciones del ensayo, las letras HBW se complementan luego con un índice que indica las condiciones del ensayo:

HBW param1/param2/param3, donde:

- param1: diámetro de la esfera (mm)
- param2: carga de ensayo (N)
- param3: duración de la aplicación de la carga de ensayo (s)

### **3.2.2 Campo de aplicación**

El presente método es aplicado para materiales metálicos y se aplica hasta el límite de 650 HBW.

### **3.2.3 Máquina de ensayo**

La máquina de ensayo cuenta con las siguientes partes:

- Dispositivo capaz de aplicar una carga entre 9,807 N (mínimo) y 29, 42 kN (máximo).
- Indentador esférico de acero con un diámetro D (ver Anexo A, tabla A.1)
- Dispositivo de medida: que sea capaz de medir de los diámetros de la huella, que para nuestro caso será un microscopio óptico.

### **3.2.4 Probeta de ensayo**

- El ensayo se debe llevar a cabo sobre una superficie que sea lisa, e incluso libre de oxidación, materias extrañas, y en particular de lubricantes. La probeta de ensayo debe tener un acabado superficial que permita una medida precisa del diámetro de la huella
- La preparación se debe realizar de forma que cualquier alteración de la superficie, debida por ejemplo tratamiento en frío o en caliente, se minimice.

- El espesor de la probeta de ensayo debe ser al menos ocho veces la profundidad de la huella. ( Ver Anexo A, tabla A.2)

### **3.2.5 Procedimiento**

- El ensayo se realizará a temperatura ambiente entre los límites de 10 °C y 35 °C. Los ensayos que se realicen en condiciones controladas se deben hacer a una temperatura de  $(23 \pm 5)$  °C.
- La carga de ensayo se debe elegir de forma que el diámetro de huella  $d$  quede comprendido entre los valores  $0,24 D$  y  $0,6 D$ .
- La relación carga-diámetro  $(0,102 \times F/ D^2)$  se debe elegir de acuerdo con el material y el ensayo de dureza, para nuestro caso la relación es de 1 (Ver Anexo A, tabla A.3). Cuando el espesor de la probeta de ensayo lo permita, se preferirá una esfera de 10 mm de diámetro.
- La probeta de ensayo se debe colocar sobre un soporte rígido. Las superficies en contacto deben estar limpias y libres de materias extrañas (escamas, aceite, suciedad, etc.). Es importante que la probeta de ensayo apoye firmemente en el soporte para que no se produzcan desplazamientos durante el ensayo.
- Se coloca la esfera de indentación en contacto con la superficie de ensayo y se aplica la carga de ensayo dirección perpendicular a la superficie, evitando sacudidas, vibraciones o deslizamientos, hasta que la carga aplicada alcance el valor estipulado. El tiempo entre la aplicación inicial de carga y el momento en que se alcanza la carga total de ensayo no será menor de 2 s ni mayor de 8 s. Se mantiene la carga de ensayo entre 10 s y 15 s. Para algunos materiales para los que se requiera un mayor tiempo de aplicación de la carga, este tiempo se debe aplicar con una tolerancia de  $\pm 2$  s.
- A lo largo del ensayo, se debe proteger la máquina de ensayo de golpes o vibraciones importantes, que pudieran influir en el resultado del ensayo.
- La distancia desde el extremo de la probeta de ensayo hasta el centro de cada huella debe tener un mínimo de dos veces y medio el diámetro de la huella. La

distancia entre los centros de dos huellas adyacentes debe ser de al menos tres veces el diámetro medio de la huella.

- Se mide el diámetro de cada huella en dos direcciones perpendiculares entre sí. Se debe tomar la media aritmética de las dos lecturas para el cálculo de la dureza Brinell. Para algunas máquinas se toma la media de un mayor número de medidas, tomadas simétricamente o una estimación del área de indentación proyectada en la superficie del material.

### 3.3. Estimación de la Incertidumbre de la Medición [3]

#### 3.3.1 Modelo Matemático

El modelo físico se representa por un modelo descrito con lenguaje matemático. El modelo matemático supone aproximaciones originadas por la representación imperfecta o limitada de las relaciones entre variables involucradas.

Considerando a la medición como un proceso, se identifican magnitudes de entrada denotadas por el conjunto  $\{X_i\}$ , expresión en el cual el índice  $i$  toma valores entre 1 y el número de magnitudes de entrada  $N$ .

La relación entre las magnitudes de entrada y el mesurando  $Y$  como la magnitud de salida se representa como una función.

$$Y = f(\{X_i\}) = f(X_1, X_2, X_3 \dots X_N)$$

Para nuestro caso el modelo matemático de la ecuación (1) se expresa de la siguiente manera:

$$HB(F, D, d) = 0,102 \times \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2)$$

Donde el mejor estimado del valor del mesurando es el resultado de calcular el valor de la función  $f$  evaluada en el mejor estimado de cada magnitud de entrada.

### 3.3.2 Métodos para cuantificar las fuentes de incertidumbre

Se distinguen 2 métodos para cuantificar las fuentes de incertidumbre: el método de evaluación Tipo A que está basado en un análisis estadístico de una serie de mediciones y el método de evaluación Tipo B que comprende todas las demás maneras de estimar incertidumbre.

#### Evaluación Tipo A

La incertidumbre de una magnitud de entrada  $X_i$  obtenida a partir de observaciones repetidas bajo condiciones de repetibilidad, se estima con base a la dispersión de los resultados individuales.

Si  $X_i$  se determina por  $n$  mediciones independientes, resultados en valores  $q_1, q_2, \dots, q_n$ , el mejor estimado  $x_i$  es la media de los resultados individuales:

$$x_i = \bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j$$

La dispersión de los resultados de medición para la magnitud de entrada se expresa por su desviación estándar experimental:

$$s(q) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2}$$

La incertidumbre estándar  $u(x_i)$  de  $X_i$  se obtiene finalmente mediante el cálculo de la desviación estándar experimental de la media:

$$u(x_i) = s(\bar{q}) = \frac{s(q)}{\sqrt{n}}$$

Así que resulta para la incertidumbre estándar de  $X_i$ :



$$u(x_i) = \frac{1}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2} \quad (3)$$

### **Evaluación Tipo B**

Las fuentes de incertidumbre tipo B son cuantificadas usando información externa u obtenida por experiencia. Estas fuentes de información pueden ser:

- Certificados de calibración.
- Manuales del instrumento de medición, especificaciones del instrumento.
- Normas o literatura.
- Valores de mediciones anteriores.
- Conocimiento sobre las características o el comportamiento del sistema de medición.

Para nuestro caso tenemos las siguientes fuentes de incertidumbre:

### **Incertidumbre de medición de la Fuerza aplicada**

En nuestro caso se tiene una carga inicial y una final registrada de la balanza, del certificado de calibración de la balanza (ver Anexo D) se tiene una incertidumbre de medición expandida dada por la siguiente ecuación:

$$U_{I(g)} = \pm 2 \times \sqrt{1,68E-01 + 2,34E-08 \times I^2}$$

De aquí se obtiene la incertidumbre estándar para cada lectura:

$$u_{I(g)} = \pm \sqrt{1,68E-01 + 2,34E-08 \times I^2} \quad (4)$$

En el cálculo final se considera el promedio de las lecturas, por lo cual la incertidumbre estándar final será el promedio de las incertidumbres estándar de la carga inicial y final. Finalmente este valor se convierte a Newton, obteniendo:

$$u(F) = \left( \frac{uP_i + uP_f}{2} \right) \times \frac{g}{1000} \quad (5)$$

Donde:

$uI_i$ : incertidumbre estándar de la lectura de la carga inicial

$uI_f$ : incertidumbre estándar de la lectura de la carga final

### **Incertidumbre de medición del diámetro del indentador**

Del certificado de calibración del indentador (ver Anexo D) se obtiene la siguiente incertidumbre de medida expandida:

$$U(D) = 0,001 \text{ mm}$$

Entonces la incertidumbre estándar:

$$u(D) = 0,0005 \text{ mm} \quad (6)$$

### **Incertidumbre de medición del diámetro de la huella**

Dado que se toma 2 medidas del diámetro ( $d_1$  y  $d_2$ ) de la huella la incertidumbre asociada es determinada por la desviación estándar de ambas medidas:

$$u_a(d) = \frac{s(d)}{\sqrt{2}} \quad (7)$$

Por otro lado la medición de  $d_1$  y  $d_2$ , tienen una incertidumbre propia que se considera del valor de la incertidumbre del campo visual del microscopio óptico compuesto, la cual se detalla a continuación: [4]

$$u^2(d1) = u^2(d2) = u^2(d_b) = (1 + \sigma^2/2)^2 * u^2(Lm) + Lm^2 u^2(\delta) \quad (8)$$

Donde:

- Lm: promedio de mediciones del campo visual realizado con una regleta de 10  $\mu$ m.
- Para un objetivo y un ocular de 10x de la referencia [4], tenemos que  $\sigma^2 = 1.258 \times 10^{-2}$ .
- $u^2(Lm) = u^2(rep) + u^2(res) + u^2(inst)$

$$u^2(rep) = s(Lm)^2 \text{ ( desviación estandar de las mediciones del campo visual)}$$

$$u^2(res) = \frac{(h/4)^2(1+z^2)}{6}, \text{ con } h : \text{resolucion de la reglta (0,01mm)} \text{ y } Z = 0,5$$

$$u^2(inst) = 0.0001 \text{ mm ( certificado de calibración de la regleta)}$$

$$- u^2(\delta) = \sigma^4/2$$

De (7) y (8):

$$u_c(d) = \sqrt{u_a^2(d) + 2 u^2(d_b)} \quad (9)$$

### 3.3.3 Incertidumbre combinada

El resultado de la combinación de las contribuciones de todas las fuentes es la incertidumbre estándar combinada  $u_c(y)$ , la cual contiene toda la información esencial sobre la incertidumbre del mesurando Y.

La contribución  $u_i(y)$  de cada fuente a la incertidumbre combinada depende de la incertidumbre estándar  $u(x_i)$  de la propia fuente y el impacto de la fuente sobre el mesurando.

Se determina  $u_i(y)$  por el producto de  $u(x_i)$  y su coeficiente de sensibilidad  $c_i$  (o factor de sensibilidad):

$$u_c(y) = c_i * u(x_i) \quad (10)$$

### Propagación de la incertidumbre para magnitudes de entrada no correlacionadas

En el caso de magnitudes de entrada no correlacionadas, la incertidumbre combinada  $u_c(y)$  se calcula por la suma geométrica de las contribuciones particulares:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y)$$

Finalmente la incertidumbre combinada estándar se calcula por la siguiente fórmula:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N [c_i * u(x_i)]^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[ \frac{\partial f}{\partial X_i} * u(x_i) \right]^2} \quad (11)$$

De acuerdo a la ecuación (2) y (4) se tiene lo siguiente:

$$u_c(HB) = \sqrt{\left( \frac{\partial HB}{\partial F} u(F) \right)^2 + \left( \frac{\partial HB}{\partial D} u(D) \right)^2 + \left( \frac{\partial HB}{\partial d} u(d) \right)^2}$$

$$u_c(HB) = \sqrt{(c1u(F))^2 + (c2u(D))^2 + (c3u(d))^2} \quad (12)$$

Donde:

$$c1 = 0,102 x \frac{2}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

$$c2 = 0,102 x \frac{2F(2D - \sqrt{D^2 - d^2} - D^2/\sqrt{D^2 - d^2})}{\pi D^2 (D - \sqrt{D^2 - d^2})^2}$$

$$c3 = -0,102 x \frac{2Fd}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})^2 (\sqrt{D^2 - d^2})}$$

### 3.3.4 Incertidumbre expandida

La forma de expresar la incertidumbre como parte de los resultados de la medición depende de la conveniencia del usuario. A veces se comunica simplemente como la incertidumbre estándar combinada, otras ocasiones como un cierto número de veces tal incertidumbre, algunos casos requieren se exprese en términos de un nivel de confianza dado, etc. En cualquier caso, es indispensable comunicar sin ambigüedades la manera en que la incertidumbre está expresada.

### **Factor de cobertura y nivel de confianza**

La incertidumbre estándar  $u_c$  representa un intervalo centrado en el mejor estimado del mensurando que contiene el valor verdadero con una probabilidad  $p$  de 68% aproximadamente, bajo la suposición de que los posibles valores del mensurando siguen una distribución normal.

Generalmente se desea una probabilidad mayor, lo que se obtiene expandiendo el intervalo de incertidumbre por un factor  $k$ , llamado factor de cobertura. El resultado se llama incertidumbre expandida  $U$ .

$$U = k * u_c \quad (12)$$

La incertidumbre expandida  $U$  indica entonces un intervalo que representa una fracción  $p$  de los valores que puede probablemente tomar el mensurando. El valor de  $p$  es llamado el nivel de confianza y puede ser elegido a conveniencia.

En el medio industrial, a menudo se elige el nivel de confianza de manera tal que corresponda a un factor de cobertura como un número entero de desviaciones estándar en una distribución normal.

Por ejemplo para una distribución normal  $k = 1$  corresponde a  $p = 68,27\%$ ,  $k = 2$  a  $p = 95,45\%$ .

Finalmente para nuestro caso tomaremos la incertidumbre extendida:

$$U(HB) = 2u_c(HB) \quad (11)$$

## **3.4 Análisis del sistema de medición**

### **3.4.1 Repetibilidad de los resultados de las mediciones [5]:**

Cercanía entre los resultados de mediciones sucesivas de la misma magnitud por medir, efectuadas en las mismas condiciones de medición.

- Estas condiciones se llaman condiciones de repetibilidad.

- Las condiciones de repetibilidad incluyen: El mismo procedimiento de medición, el mismo observador, el mismo instrumento de medición utilizado en las mismas condiciones, el mismo lugar y repetición dentro de un período de tiempo corto.
- La repetibilidad se puede expresar en forma cuantitativa, en función de las características de dispersión de los resultados.

### **3.4.2 Reproducibilidad de los resultados de mediciones [5]:**

Cercanía entre los resultados de las mediciones de la misma magnitud por medir, efectuada bajo condiciones de medición diferentes.

- Para que una expresión de la reproducibilidad sea válida, es necesario especificar las condiciones que cambian.
- Las condiciones que cambian pueden ser entre otras: El principio de medición, el método de medición, el observador, el instrumento de medición, el patrón de referencia, el lugar, las condiciones de uso y el tiempo.
- La reproducibilidad se puede expresar en forma cuantitativa, en función de las características de dispersión de los resultados.

### **3.4.3 Estudio de Repetibilidad y Reproducibilidad del sistema de medición (cruzado)**

Un estudio R&R del sistema de medición cruzado estima cuánto de la variación total del proceso es causada por el sistema de medición. La variación total del proceso consta de variación parte a parte (entre muestras) más variación del sistema de medición. [6]

*“Cuando se estima la repetibilidad, cada operador mide cada parte por lo menos dos veces. Cuando se estima la reproducibilidad, por lo menos dos operadores deben medir las partes. Los operadores miden las partes en orden aleatorio, y las partes seleccionadas representan el posible rango de mediciones” [7]*

Los métodos para determinar la repetibilidad y la reproducibilidad de las mediciones están basados en la evaluación estadística de las dispersiones de los resultados, ya sea en forma

de rango o su representación como varianzas o desviaciones estándar. Los métodos que se utilizan son: Rango, Promedio y Rango, y ANOVA (análisis de varianza) [8].

Para nuestro caso utilizaremos el método de ANOVA, usando como herramienta el software MINITAB, el detalle de cómo se usa se describirá en Anexo C, sin embargo es necesario aclarar algunos aspectos teóricos del Análisis por ANOVA.

### **Método de Análisis de Varianza (ANOVA):**

El método Anova, conocido también como análisis de varianza es el método más exacto para calcular la variabilidad de un sistema de medición porque posee la ventaja de cuantificar la variación debida a la interacción entre los operadores y las partes (muestras). Este método está basado en la misma técnica estadística utilizada para analizar los efectos de los diferentes factores en el diseño de experimentos. Para un sistema de medición, el método Anova debe realizarse para estudiar simultáneamente los efectos de dos fuentes de variación: Operadores y Partes [9].

Entre las ventajas de la técnica de ANOVA comparada con el método de Promedio y Rango tenemos que [9]:

Es posible manejar cualquier arreglo o estructura experimental.

Es posible estimar las varianzas más exactamente.

Se obtiene mayor información de los datos experimentales.

Permite conocer la interacción entre la repetibilidad y la reproducibilidad.

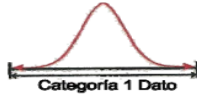

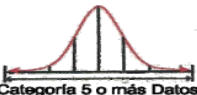
Según la AIAG [10], para estudios de R%R, se debe tener los siguientes criterios para analizar el GRR (Estimación combinada de la repetibilidad y reproducibilidad del sistema de medición):

Tabla 1 Criterios a considerar para la GRR

GRR	Decision	Comentarios
Abajo del 10 por ciento	Generalmente considerado como un sistema de medición aceptable.	Recomendado, especialmente útil cuando se trate de separar ó clasificar partes ó cuando se requiere cerrar el control del proceso.
Del 10 al 30 por ciento	Puede ser aceptable para algunas aplicaciones	La decision debiera basarse en, por ejemplo, importancia de las mediciones en la aplicación, costos de dispositivos de medición, costos de retrabajos ó reparaciones.  Debiera ser aprobado por el cliente.
Arriba del 30 por ciento	Se considera inaceptable	Debiera hacerse todo esfuerzo por mejorar el sistema de medición.  Esta condición puede ser abordada por el uso de una estrategia de mediciones apropiada; por ejemplo, usando el resultado promedio de varias lecturas sobre la misma característica de la parte, a fin de reducir la variación final en las mediciones.

Otro de los parámetros que nos ayudan a realizar un buen análisis del sistema de medición es el número de categorías, según la AIAG [11], se debe tener en cuenta lo siguiente:

Tabla 2 Impacto del Número de Categorías Distintas (NCD) de la Distribución del Proceso en Actividades de Análisis y Control.

Numero de Categorías	Control	Análisis
 <p>Categoría 1 Dato</p>	Puede ser usado solo para control si: <ul style="list-style-type: none"> <li>La variación del proceso es pequeña comparada con las especificaciones.</li> <li>La función de pérdida es plana sobre la variación del proceso esperada.</li> <li>La fuente de variación principal provoca un cambio en el promedio.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>No Aceptable</b> para estimar índices y parámetros del proceso.</li> <li>Sólo indica si el proceso está fabricando partes conformes o no conformes.</li> </ul>
 <p>Categoría 2-4 Datos</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Puede ser usado con técnicas de control de semi-variables basadas en la distribución del proceso.</li> <li>Puede producir gráfica de control de variables no sensibles.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Generalmente no aceptable para estimar parámetro e índices del proceso dado que sólo ofrece estimativos "burdos".</li> </ul>
 <p>Categoría 5 o más Datos</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Puede ser usada con gráficas de control para variables.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><b>Recomendable</b></li> </ul>

[12] El método de ANOVA ofrece información relativa a las causas de la variación de un sistema de medición o gages.

Por ejemplo, si la repetibilidad es grande comparada con la reproducibilidad, las razones pueden ser:

- El instrumento necesita mantenimiento.
- El gage puede requerir ser rediseñado para ser más rígido.
- La sujeción o localización del gage necesita mejorarse.



- Existe una variación dentro de la parte excesiva.

Si la reproducibilidad es grande comparada con la repetibilidad, entonces las posibles causas podrían ser:

- El evaluador necesita ser mejor entrenado en cómo usar y leer el instrumento del gage.
- Las calibraciones del gage no son claras. El dispositivo (de algún tipo) puede requerir la capacitación del evaluador a usar el gage más consistentemente.

En el Anexo C se explica los pasos para realizar análisis de ANOVA en Minitab.

### 3.5 Influencia del Antimonio en el plomo.

Debido a que el plomo es muy suave y dúctil, normalmente se utiliza comercialmente como aleaciones de plomo. El antimonio, estaño, arsénico, y el calcio son los elementos de aleación más comunes. Antimonio generalmente se utiliza para dar mayor dureza y resistencia, como en las redes de almacenamiento de baterías, hoja, tubería y piezas de fundición. El contenido de antimonio de aleaciones sin plomo antimonio pueden variar desde 0,5 a 25%, pero son por lo general 2 a 5%. [13].

De la literatura obtenemos la dureza para el plomo (tabla 3) [14]:

Tabla 3 Propiedades mecánicas de los grados de pureza del plomo.

Lead grade	Hardness HB	Yield strength (0.125) (MPa)	Tensile strength (MPa)	Comp. strength (25%) (MPa)	Elongation (%)	Fatigue strength at 10 <sup>7</sup> cycles (MPa)	Creep strength (0.2%/yr) (MPa)
Pure lead (c)	4.0	5.9	13.1	15.2	45	2.7	
Corroding lead, Pb > 99.94	3.2–4.5	5.5	12–13		30	3.2	
Refined pure (r)	3.8		12.1		53	3.2	1.2
Chemical (c)	5.2	11.3	17.9	20.0	45		
Chemical (r)	5.5		19.3		47	6.9	
Undesilverized (e)			17.2		50		
Undesilverized (r)	4.7	8.6	16.5	17.9	51	5.0	15.8

(r) - rolled; (c) - cast; (e) - extruded

También la relación de dureza para aleaciones con diferentes %Sb (tabla 4) [15]:

Tabla 4 Propiedades mecánicas de la aleación Pb-Sb.

Sb content (wt%)	Tensile strength (MPa)	Elongation at fracture (%)	Hardness HB	Yield strength $R_{p0.125}$ (MPa)	Fatigue strength for $2 \times 10^7$ cycles (MPa)	Creep strength	Young's modulus (GPa)
1 (a)	37.9	20		19.3	7.6	190 h at 20.7 MPa	–
1 (c)	20	50	7.0	–	7.6		–
3 (a)	65.5	10		55.2	–	630 h at 27.6 MPa	–
3 (c)	32.43	15	9.1				–
6 (a)	73.8	8		71.0		1000 h at 27.6 MPa	
6 (c)	47	24	13		17.2		24.15
6 (r)	29.6	42	8.7	15.2	10.3	–	–

(c) cast; (a) cast and stored 30 days at room temperature; (r) rolled

Para nuestro caso el plomo utilizado es plomo químico puro o en aleación de un porcentaje menor al 1% Sb. [16] y placas de plomo refinado electrolíticamente (~ 0 %Sb).

## CAPÍTULO 4. PROCEDIMIENTOS EXPERIMENTALES

### 4.1 Equipos y Materiales utilizados

#### 4.1.1 Máquina de ensayo de dureza.

La Máquina de ensayo consiste un platillo unido a una barra deslizante que pasara por un soporte hueco, el platillo es usado para colocar la carga de ensayo y en la parte inferior de la barra deslizante se encuentra pegado el indentador esférico.

El soporte cuenta con tornillos a los lados que interaccionan con las rendijas diseñadas a los lados de la barra para evitar que esta gire al momento de colocar las cargas de ensayos.

En la parte inferior se cuenta con una porta muestras que ejerce presión sobre la celda de la balanza y donde se coloca las muestras de plomo cortadas.

Finalmente las cargas de ensayo y el tiempo de ensayo se controlan con la balanza electrónica (Figura 2).

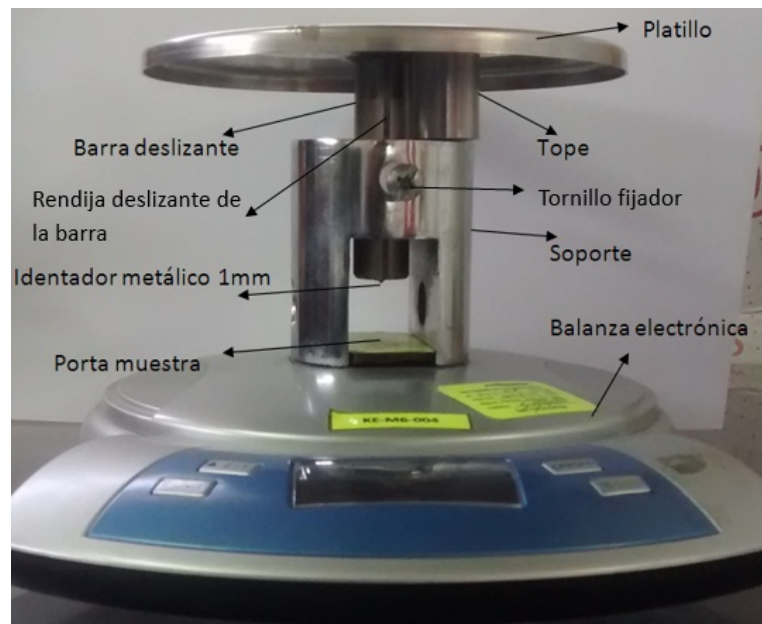


Figura 2 Máquina de ensayo de dureza usando una balanza electrónica Camry.

### 4.1.2 Microscopio Compuesto

El Microscopio compuesto marca Leica modelo DM750, permite leer el diámetro de la huella de manera perpendicular, usando la cámara DFC295 y el Software LAS V4.1, que tiene herramientas de procesamiento de imágenes.



Figura 3 Microscopio Leica Modelo DM750 y una cámara de modelo DFC295

### 4.1.3 Tubo de plomo a analizar

Estos deben ser de mínimo 8 cm de altura, del cual se cortaran muestras de 5 mm de altura. Los tubos de plomo son de 4 tamaños diferentes: 13/ 9, 17/9, 24/14 y 24/16, lo cual hacen referencia al diámetro interno y al diámetro externo del tubo. Cada tubo de plomo es identificado por un número de Control de Calidad.



Figura 4 Tubo de plomo 24/14 y 2 muestras

#### 4.1.4 Indentador de Acero

El indentador de 1 mm de diámetro se encuentra pegado a la barra deslizante del dispositivo de medición. Este indentador dejará la huella circular que luego se medirá en el microscopio, es de acero inoxidable y su medida es de  $1 \pm 0,003$  mm (de acuerdo al Anexo A, tabla A.1)



Figura 5 Indentador de 1 mm

#### 4.1.5 Pesas para aplicar la Fuerza en el ensayo

Cuatro pesas de 200 g y una de 20 g. Son las cargas de ensayo que sumados al peso del platillo, la barra deslizante y el indentador llegan a 1kg.



Figura 6 Pesas utilizadas en el ensayo de Dureza.

#### 4.2 Preparación de las Muestras

- Cortar las muestra de 5mm de espesor, del tubo de plomo a analizar.
- Pulir las muestras con las lijas al agua N° P1000A y N° P800A, de tal manera que la superficie quede lisa, libre de oxidación, materias extrañas y en particular libres de lubricantes.

- Para el caso de los tubos 24/14 y 24/16 las muestras deben ser cortadas por la mitad para que puedan ser colocadas en el porta muestra de la máquina de ensayo de dureza.
- Identificar cada muestra con el número del “1” al número de muestras analizar.



Figura 7 Izquierda: Muestras de tubo de plomo 24/14 pulidas y cortadas.

Derecho: Muestras de tubo de Plomo 13/9 pulidas.

### 4.3 Procedimiento

- Colocar la muestra sobre el porta muestra de la máquina de ensayo.
- Tarar la balanza, con la tecla “▲ Z/T”.
- Programar un tiempo de 20 s en la balanza, usando las teclas “T-SET”, para seleccionar minutos o segundos y las teclas “▲ Z/T” y “▼UNIT”, para aumentar o disminuir.
- Sacar el tope y deslizar el platillo hacia abajo, sin ejercer presión, de tal manera que el indentador pegado en la parte inferior de la barra deslizante este en contacto con la muestra.
- Inicializar el conteo del tiempo, usando “T-SET”.
- Colocar 4 pesas de 200 g y una de 20 g, una por una (no sobrepasar los 8 segundos)
- Anotar el peso registrado por la balanza.
- Al finalizar los 20 s, sonará una alarma y el peso quedará invariante en la pantalla de la balanza. Elevar el platillo y colocar el tope debajo del mismo.
- Anotar el peso final registrado por la balanza.

- Desactivar la alarma con la tecla “T-SET” de la balanza. La balanza retornará al modo pesaje.
- Retirar las pesas del platillo.
- Medir los diámetros de la huellas en el microscopio Leica (ver Anexo B).

## CAPÍTULO 5. RESULTADOS EXPERIMENTALES

### 5.1. Datos obtenidos para el cálculo de la incertidumbre de medición del microscopio.

Al medir el campo visual con una regleta de 0,01 um de resolución se obtuvo los siguientes valores:

Tabla 5 Datos obtenidos en la medición del campo visual del microscopio

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1,20 mm	1,19 mm	1,20 mm	1,20 mm	1,21 mm	1,21 mm	1,20 mm	1,19 mm	1,20 mm	1,20 mm

Se considera como incertidumbre estándar 0,05 um. Haciendo una analogía de la incertidumbre expandida del certificado de calibración mostrada del ejemplo de la referencia [4] para una retícula de 0,1 mm de resolución, se ha dividido ésta entre 10 (y luego divido entre el  $k=2$ ) ya que para nuestro caso la resolución es 10 veces menor.

### 5.2 Datos obtenidos para calcular la incertidumbre de medición y realizar el análisis de repetibilidad y reproducibilidad del sistema de medición.

Para evaluar tanto la incertidumbre de medición como la repetibilidad y reproducibilidad del ensayo se realizó las siguientes pruebas:

Se evaluó 4 tubos de plomo uno por cada medidas de tubos de plomo: 24-14 (C.C 36464), 24-16 (CC 36026), 13-9 (C.C 36093) y 17-9 (C.C 36025) y una placa de plomo químico puro (0%Sb). Los tubos se dividieron en 10 muestras (de 5 mm de espesor) y la placa se dividió en 10 partes iguales, estas muestras fueron evaluadas por 3 operadores diferentes (con más de 6 meses de experiencia) en un corto periodo de tiempo y cada operador realizó 2 ensayos por cada muestra, obteniendo las siguientes tablas de datos experimentales:



Tabla 6 Datos obtenidos para el diámetro de huella  
Operador A – tubo de plomo 24-14

Muestra	Ensayo 1				Ensayo 2			
	Diámetro en la huella( $\mu\text{m}$ )				Diámetro en la huella( $\mu\text{m}$ )			
	d1	$\pm\Delta$ d1	d2	$\pm\Delta$ d2	d1	$\pm\Delta$ d1	d2	$\pm\Delta$ d2
1	426	3	427	3	420	3	422	3
2	432	3	424	3	430	3	426	3
3	435	3	437	3	436	3	435	3
4	414	3	411	3	412	3	410	3
5	417	3	411	3	413	3	415	3
6	412	3	424	3	415	3	423	3
7	440	3	431	3	441	3	435	3
8	430	3	420	3	430	3	422	3
9	412	3	406	3	414	3	407	3
10	422	3	416	3	426	3	416	3

La incertidumbre de la medición para cada medida del microscopio se calculará en la sección 5.4, y será la misma para todas las tablas de la misma características.

Tabla 7 Datos obtenidos para los pesos  
Operador A – tubo de plomo 24-14

Muestra	Ensayo 1				Ensayo 2			
	Carga aplicada (g)				Carga aplicada (g)			
	Pi	$\pm\Delta$ Pi	Pf	$\pm\Delta$ Pf	Pi	$\pm\Delta$ Pi	Pf	$\pm\Delta$ Pf
1	1005,0	0,4	1005,0	0,4	983,0	0,4	980,0	0,4
2	1007,0	0,4	1001,0	0,4	1008,0	0,4	996,0	0,4
3	1005,0	0,4	995,0	0,4	1010,0	0,4	995,0	0,4
4	1005,0	0,4	994,0	0,4	1001,0	0,4	993,0	0,4
5	985,0	0,4	985,0	0,4	983,0	0,4	979,0	0,4
6	986,0	0,4	985,0	0,4	990,0	0,4	981,0	0,4
7	1005,0	0,4	997,0	0,4	1003,0	0,4	995,0	0,4
8	978,0	0,4	969,0	0,4	980,0	0,4	975,0	0,4
9	1005,0	0,4	999,0	0,4	1003,0	0,4	996,0	0,4
10	1002,0	0,4	995,0	0,4	1005,0	0,4	997,0	0,4

La incertidumbre de la medición es obtenida del certificado de calibración de la balanza y así se expresará en las siguientes tablas de la misma característica.

Tabla 8 Datos obtenidos para el diámetro de huella  
Operador B – tubo de plomo 24-14

Muestra	Ensayo 1				Ensayo 2			
	Diámetro en la huella( $\mu\text{m}$ )				Diámetro en la huella( $\mu\text{m}$ )			
	d1	$\pm\Delta$ d1	d2	$\pm\Delta$ d2	d1	$\pm\Delta$ d1	d2	$\pm\Delta$ d2
1	429	3	425	3	430	3	427	3
2	433	3	428	3	433	3	429	3
3	438	3	433	3	439	3	435	3
4	412	3	409	3	410	3	405	3
5	421	3	424	3	420	3	415	3
6	416	3	423	3	420	3	413	3
7	441	3	435	3	441	3	436	3
8	430	3	433	3	430	3	425	3
9	412	3	409	3	412	3	408	3
10	426	3	420	3	426	3	420	3

Tabla 9 Datos obtenidos para los pesos  
Operador B – tubo de plomo 24-14

Muestra	Ensayo 1				Ensayo 2			
	Carga aplicada (g)				Carga aplicada (g)			
	Pi	$\pm\Delta$ Pi	Pf	$\pm\Delta$ Pf	Pi	$\pm\Delta$ Pi	Pf	$\pm\Delta$ Pf
1	1006,0	0,4	996,0	0,4	1006,0	0,4	992,0	0,4
2	1008,0	0,4	996,0	0,4	1006,0	0,4	995,0	0,4
3	1005,0	0,4	996,0	0,4	1007,0	0,4	995,0	0,4
4	999,0	0,4	991,0	0,4	993,0	0,4	989,0	0,4
5	1005,0	0,4	1003,0	0,4	986,0	0,4	978,0	0,4
6	989,0	0,4	983,0	0,4	989,0	0,4	983,0	0,4
7	1003,0	0,4	992,0	0,4	999,0	0,4	992,0	0,4
8	993,0	0,4	988,0	0,4	980,0	0,4	973,0	0,4
9	1003,0	0,4	995,0	0,4	1005,0	0,4	993,0	0,4
10	1005,0	0,4	992,0	0,4	1003,0	0,4	994,0	0,4

Tabla 10 Datos obtenidos para el diámetro de huella  
Operador C – tubo de plomo 24-14

Muestra	Ensayo 1				Ensayo 2			
	Diámetro en la huella( $\mu\text{m}$ )				Diámetro en la huella( $\mu\text{m}$ )			
	d1	$\pm\Delta$ d1	d2	$\pm\Delta$ d2	d1	$\pm\Delta$ d1	d2	$\pm\Delta$ d2
1	427	3	424	3	428	3	421	3
2	431	3	429	3	431	3	426	3
3	430	3	429	3	433	3	431	3
4	408	3	410	3	406	3	410	3
5	416	3	411	3	419	3	416	3
6	415	3	422	3	418	3	420	3
7	441	3	439	3	437	3	436	3
8	428	3	426	3	434	3	430	3
9	414	3	405	3	405	3	410	3
10	426	3	420	3	427	3	423	3

Tabla 11 Datos obtenidos para los pesos  
Operador C – tubo de plomo 24-14

Muestra	Ensayo 1				Ensayo 2			
	Carga aplicada (g)				Carga aplicada (g)			
	Pi	$\pm\Delta$ Pi	Pf	$\pm\Delta$ Pf	Pi	$\pm\Delta$ Pi	Pf	$\pm\Delta$ Pf
1	1006,0	0,4	1001,0	0,4	1005,0	0,4	993,0	0,4
2	1003,0	0,4	1000,0	0,4	1006,0	0,4	995,0	0,4
3	1003,0	0,4	996,0	0,4	1008,0	0,4	990,0	0,4
4	999,0	0,4	992,0	0,4	1006,0	0,4	993,0	0,4
5	988,0	0,4	983,0	0,4	1003,0	0,4	995,0	0,4
6	992,0	0,4	984,0	0,4	9930,0	0,4	986,0	0,4
7	1003,0	0,4	999,0	0,4	1003,0	0,4	999,0	0,4
8	980,0	0,4	972,0	0,4	999,0	0,4	990,0	0,4
9	1005,0	0,4	992,0	0,4	1005,0	0,4	992,0	0,4
10	1003,0	0,4	996,0	0,4	1006,0	0,4	992,0	0,4

Tabla 12 Datos obtenidos para el diámetro de huella  
Operador A – tubo de plomo 24-16

Muestra	Ensayo 1				Ensayo 2			
	Diámetro en la huella( $\mu\text{m}$ )				Diámetro en la huella( $\mu\text{m}$ )			
	d1	$\pm\Delta$ d1	d2	$\pm\Delta$ d2	d1	$\pm\Delta$ d1	d2	$\pm\Delta$ d2
1	466	3	467	3	468	3	465	3
2	472	3	468	3	476	3	473	3
3	456	3	463	3	461	3	462	3
4	450	3	445	3	450	3	442	3
5	474	3	470	3	473	3	470	3
6	471	3	473	3	476	3	471	3
7	435	3	439	3	440	3	436	3
8	453	3	457	3	456	3	459	3
9	447	3	444	3	448	3	442	3
10	457	3	456	3	458	3	455	3

Tabla 13 Datos obtenidos para los pesos  
Operador A – tubo de plomo 24-16

Muestra	Ensayo 1				Ensayo 2			
	Carga aplicada (g)				Carga aplicada (g)			
	Pi	$\pm\Delta$ Pi	Pf	$\pm\Delta$ Pf	Pi	$\pm\Delta$ Pi	Pf	$\pm\Delta$ Pf
1	1006,0	0,4	993,0	0,4	1006,0	0,4	993,0	0,4
2	1005,0	0,4	994,0	0,4	1005,0	0,4	993,0	0,4
3	990,0	0,4	983,0	0,4	1008,0	0,4	1000,0	0,4
4	983,0	0,4	980,0	0,4	986,0	0,4	979,0	0,4
5	1015,0	0,4	1008,0	0,4	1012,0	0,4	1005,0	0,4
6	1003,0	0,4	995,0	0,4	1006,0	0,4	993,0	0,4
7	978,0	0,4	970,0	0,4	986,0	0,4	971,0	0,4
8	987,0	0,4	970,0	0,4	996,0	0,4	990,0	0,4
9	1010,0	0,4	993,0	0,4	1006,0	0,4	999,0	0,4
10	1012,0	0,4	992,0	0,4	1008,0	0,4	1003,0	0,4

Tabla 14 Datos obtenidos para el diámetro de huella  
Operador B – tubo de plomo 24-16

Muestra	Ensayo 1				Ensayo 2			
	Diámetro en la huella( $\mu\text{m}$ )				Diámetro en la huella( $\mu\text{m}$ )			
	d1	$\pm\Delta$ d1	d2	$\pm\Delta$ d2	d1	$\pm\Delta$ d1	d2	$\pm\Delta$ d2
1	468	3	464	3	465	3	465	3
2	471	3	470	3	475	3	472	3
3	454	3	465	3	455	3	462	3
4	452	3	446	3	450	3	447	3
5	474	3	470	3	471	3	470	3
6	470	3	471	3	470	3	469	3
7	440	3	443	3	441	3	436	3
8	459	3	456	3	461	3	453	3
9	445	3	442	3	447	3	444	3
10	459	3	454	3	461	3	456	3

Tabla 15 Datos obtenidos para los pesos  
Operador B – tubo de plomo 24-16

Muestra	Ensayo 1				Ensayo 2			
	Carga aplicada (g)				Carga aplicada (g)			
	Pi	$\pm\Delta$ Pi	Pf	$\pm\Delta$ Pf	Pi	$\pm\Delta$ Pi	Pf	$\pm\Delta$ Pf
1	1008,0	0,4	994,0	0,4	1002,0	0,4	996,0	0,4
2	1001,0	0,4	993,0	0,4	1004,0	0,4	994,0	0,4
3	1005,0	0,4	996,0	0,4	989,0	0,4	982,0	0,4
4	986,0	0,4	978,0	0,4	981,0	0,4	978,0	0,4
5	1015,0	0,4	1005,0	0,4	1013,0	0,4	1003,0	0,4
6	1003,0	0,4	992,0	0,4	999,0	0,4	993,0	0,4
7	999,0	0,4	991,0	0,4	982,0	0,4	976,0	0,4
8	986,0	0,4	974,0	0,4	989,0	0,4	981,0	0,4
9	988,0	0,4	983,0	0,4	1003,0	0,4	999,0	0,4
10	1004,0	0,4	997,0	0,4	1004,0	0,4	996,0	0,4

Tabla 16 Datos obtenidos para el diámetro de huella  
Operador C – tubo de plomo 24-16

Muestra	Ensayo 1				Ensayo 2			
	Diámetro en la huella( $\mu\text{m}$ )				Diámetro en la huella( $\mu\text{m}$ )			
	d1	$\pm\Delta$ d1	d2	$\pm\Delta$ d2	d1	$\pm\Delta$ d1	d2	$\pm\Delta$ d2
1	469	3	469	3	471	3	465	3
2	472	3	466	3	472	3	470	3
3	456	3	464	3	466	3	458	3
4	446	3	451	3	444	3	450	3
5	476	3	471	3	472	3	471	3
6	468	3	473	3	467	3	471	3
7	441	3	439	3	441	3	440	3
8	461	3	452	3	460	3	453	3
9	449	3	442	3	448	3	441	3
10	458	3	452	3	455	3	451	3

Tabla 17 Datos obtenidos para los pesos  
Operador C – tubo de plomo 24-16

Muestra	Ensayo 1				Ensayo 2			
	Carga aplicada (g)				Carga aplicada (g)			
	Pi	$\pm\Delta$ Pi	Pf	$\pm\Delta$ Pf	Pi	$\pm\Delta$ Pi	Pf	$\pm\Delta$ Pf
1	1002,0	0,4	999,0	0,4	1004,0	0,4	998,0	0,4
2	1003,0	0,4	994,0	0,4	1001,0	0,4	996,0	0,4
3	991,0	0,4	983,0	0,4	1005,0	0,4	993,0	0,4
4	985,0	0,4	980,0	0,4	986,0	0,4	981,0	0,4
5	1015,0	0,4	1005,0	0,4	996,0	0,4	991,0	0,4
6	1000,0	0,4	996,0	0,4	1003,0	0,4	996,0	0,4
7	982,0	0,4	977,0	0,4	983,0	0,4	980,0	0,4
8	986,0	0,4	980,0	0,4	984,0	0,4	975,0	0,4
9	1003,0	0,4	999,0	0,4	1003,0	0,4	995,0	0,4
10	1003,0	0,4	997,0	0,4	1006,0	0,4	994,0	0,4

Tabla 18 Datos obtenidos para el diámetro de huella  
Operador A – tubo de plomo 17-9

Muestra	Ensayo 1				Ensayo 2			
	Diámetro en la huella( $\mu\text{m}$ )				Diámetro en la huella( $\mu\text{m}$ )			
	d1	$\pm\Delta$ d1	d2	$\pm\Delta$ d2	d1	$\pm\Delta$ d1	d2	$\pm\Delta$ d2
1	443	3	441	3	445	3	442	3
2	438	3	437	3	439	3	439	3
3	463	3	458	3	469	3	459	3
4	445	3	435	3	445	3	438	3
5	465	3	458	3	460	3	454	3
6	448	3	448	3	450	3	450	3
7	463	3	453	3	460	3	451	3
8	459	3	453	3	459	3	456	3
9	459	3	462	3	459	3	461	3
10	446	3	457	3	446	3	455	3

Tabla 19 Datos obtenidos para los pesos  
Operador A – tubo de plomo 17-9

Muestra	Ensayo 1				Ensayo 2			
	Carga aplicada (g)				Carga aplicada (g)			
	Pi	$\pm\Delta$ Pi	Pf	$\pm\Delta$ Pf	Pi	$\pm\Delta$ Pi	Pf	$\pm\Delta$ Pf
1	1007,0	0,4	992,0	0,4	1001,0	0,2	996,0	0,4
2	1010,0	0,4	1004,0	0,4	1010,0	0,2	1000,0	0,4
3	1005,0	0,4	990,0	0,4	1003,0	0,2	992,0	0,4
4	997,0	0,4	978,0	0,4	1006,0	0,2	1000,0	0,4
5	1010,0	0,4	992,0	0,4	985,0	0,2	980,0	0,4
6	1000,0	0,4	980,0	0,4	996,0	0,2	985,0	0,4
7	1019,0	0,4	992,0	0,4	1011,0	0,2	997,0	0,4
8	999,0	0,4	980,0	0,4	1005,0	0,2	992,0	0,4
9	1009,0	0,4	993,0	0,4	1002,0	0,2	996,0	0,4
10	985,0	0,4	967,0	0,4	986,0	0,2	973,0	0,4

Tabla 20 Datos obtenidos para el diámetro de huella  
Operador B – tubo de plomo 17-9

Muestra	Ensayo 1				Ensayo 2			
	Diámetro en la huella( $\mu\text{m}$ )				Diámetro en la huella( $\mu\text{m}$ )			
	d1	$\pm\Delta$ d1	d2	$\pm\Delta$ d2	d1	$\pm\Delta$ d1	d2	$\pm\Delta$ d2
1	444	3	442	3	446	3	444	3
2	439	3	436	3	435	3	437	3
3	465	3	457	3	463	3	460	3
4	446	3	436	3	445	3	438	3
5	463	3	460	3	461	3	465	3
6	452	3	445	3	450	3	446	3
7	460	3	455	3	461	3	455	3
8	465	3	460	3	460	3	455	3
9	460	3	463	3	460	3	468	3
10	449	3	455	3	447	3	453	3

Tabla 21 Datos obtenidos para los pesos  
Operador B – tubo de plomo 17-9

Muestra	Ensayo 1				Ensayo 2			
	Carga aplicada (g)				Carga aplicada (g)			
	Pi	$\pm\Delta$ Pi	Pf	$\pm\Delta$ Pf	Pi	$\pm\Delta$ Pi	Pf	$\pm\Delta$ Pf
1	988,0	0,4	980,0	0,4	1009,0	0,4	993,0	0,4
2	1010,0	0,4	1003,0	0,4	1009,0	0,4	1001,0	0,4
3	1003,0	0,4	991,0	0,4	999,0	0,4	993,0	0,4
4	992,0	0,4	983,0	0,4	989,0	0,4	985,0	0,4
5	1006,0	0,4	996,0	0,4	1006,0	0,4	1001,0	0,4
6	993,0	0,4	985,0	0,4	990,0	0,4	983,0	0,4
7	1008,0	0,4	1001,0	0,4	1009,0	0,4	998,0	0,4
8	1009,0	0,4	1000,0	0,4	996,0	0,4	982,0	0,4
9	1006,0	0,4	993,0	0,4	1010,0	0,4	993,0	0,4
10	983,0	0,4	972,0	0,4	986,0	0,4	970,0	0,4



Tabla 22 Datos obtenidos para el diámetro de huella  
Operador C – tubo de plomo 17-9

Muestra	Ensayo 1				Ensayo 2			
	Diámetro en la huella( $\mu\text{m}$ )				Diámetro en la huella( $\mu\text{m}$ )			
	d1	$\pm\Delta$ d1	d2	$\pm\Delta$ d2	d1	$\pm\Delta$ d1	d2	$\pm\Delta$ d2
1	445	3	441	3	446	3	440	3
2	440	3	440	3	439	3	442	3
3	462	3	460	3	461	3	462	3
4	442	3	435	3	446	3	438	3
5	459	3	463	3	459	3	463	3
6	450	3	450	3	450	3	445	3
7	461	3	456	3	462	3	454	3
8	456	3	461	3	456	3	461	3
9	461	3	465	3	461	3	462	3
10	448	3	455	3	450	3	455	3

Tabla 23 Datos obtenidos para los pesos  
Operador C – tubo de plomo 17-9

Muestra	Ensayo 1				Ensayo 2			
	Carga aplicada (g)				Carga aplicada (g)			
	Pi	$\pm\Delta$ Pi	Pf	$\pm\Delta$ Pf	Pi	$\pm\Delta$ Pi	Pf	$\pm\Delta$ Pf
1	1006,0	0,4	993,0	0,4	1003,0	0,4	996,0	0,4
2	1010,0	0,4	1003,0	0,4	1013,0	0,4	999,0	0,4
3	1006,0	0,4	996,0	0,4	1006,0	0,4	994,0	0,4
4	985,0	0,4	980,0	0,4	1001,0	0,4	991,0	0,4
5	1006,0	0,4	993,0	0,4	1005,0	0,4	993,0	0,4
6	993,0	0,4	982,0	0,4	993,0	0,4	982,0	0,4
7	1010,0	0,4	1001,0	0,4	1003,0	0,4	992,0	0,4
8	1006,0	0,4	993,0	0,4	999,0	0,4	993,0	0,4
9	1002,0	0,4	996,0	0,4	1005,0	0,4	993,0	0,4
10	983,0	0,4	972,0	0,4	983,0	0,4	972,0	0,4

Tabla 24 Datos obtenidos para el diámetro de huella  
Operador A – tubo de plomo 13-9

Muestra	Ensayo 1				Ensayo 2			
	Diámetro en la huella( $\mu\text{m}$ )				Diámetro en la huella( $\mu\text{m}$ )			
	d1	$\pm\Delta$ d1	d2	$\pm\Delta$ d2	d1	$\pm\Delta$ d1	d2	$\pm\Delta$ d2
1	505	3	498	3	509	3	506	3
2	476	3	461	3	475	3	469	3
3	497	3	488	3	500	3	491	3
4	482	3	476	3	485	3	479	3
5	502	3	500	3	499	3	496	3
6	502	3	485	3	502	3	484	3
7	476	3	480	3	478	3	480	3
8	501	3	506	3	503	3	510	3
9	496	3	505	3	499	3	504	3
10	485	3	490	3	489	3	491	3

Tabla 25 Datos obtenidos para los pesos  
Operador A – tubo de plomo 13-9

Muestra	Ensayo 1				Ensayo 2			
	Carga aplicada (g)				Carga aplicada (g)			
	Pi	$\pm\Delta$ Pi	Pf	$\pm\Delta$ Pf	Pi	$\pm\Delta$ Pi	Pf	$\pm\Delta$ Pf
1	985,0	0,4	978,0	0,4	1010,0	0,4	995,0	0,4
2	1011,0	0,4	998,0	0,4	1013,0	0,4	999,0	0,4
3	982,0	0,4	976,0	0,4	1005,0	0,4	993,0	0,4
4	985,0	0,4	976,0	0,4	988,0	0,4	977,0	0,4
5	1004,0	0,4	993,0	0,4	1003,0	0,4	996,0	0,4
6	992,0	0,4	985,0	0,4	992,0	0,4	986,0	0,4
7	999,0	0,4	981,0	0,4	995,0	0,4	986,0	0,4
8	998,0	0,4	982,0	0,4	993,0	0,4	985,0	0,4
9	992,0	0,4	986,0	0,4	1008,0	0,4	992,0	0,4
10	1002,0	0,4	990,0	0,4	1002,0	0,4	996,0	0,4

Tabla 26 Datos obtenidos para el diámetro de huella  
Operador B – tubo de plomo 13-9

Muestra	Ensayo 1				Ensayo 2			
	Diámetro en la huella(μm)				Diámetro en la huella(μm)			
	d1	±Δ d1	d2	±Δ d2	d1	±Δ d1	d2	±Δ d2
1	508	3	496	3	508	3	501	3
2	478	3	465	3	474	3	470	3
3	499	3	485	3	499	3	487	3
4	482	3	475	3	484	3	481	3
5	504	3	501	3	502	3	501	3
6	506	3	490	3	501	3	488	3
7	479	3	481	3	485	3	480	3
8	501	3	505	3	505	3	508	3
9	499	3	507	3	500	3	508	3
10	486	3	490	3	489	3	488	3

Tabla 27 Datos obtenidos para los pesos  
Operador B – tubo de plomo 13-9

Muestra	Ensayo 1				Ensayo 2			
	Carga aplicada (g)				Carga aplicada (g)			
	Pi	±Δ Pi	Pf	±Δ Pf	Pi	±Δ Pi	Pf	±Δ Pf
1	986,0	0,4	979,0	0,4	1005,0	0,4	993,0	0,4
2	1008,0	0,4	1001,0	0,4	1006,0	0,4	1000,0	0,4
3	983,0	0,4	975,0	0,4	983,0	0,4	972,0	0,4
4	989,0	0,4	979,0	0,4	993,0	0,4	989,0	0,4
5	1004,0	0,4	996,0	0,4	1002,0	0,4	996,0	0,4
6	990,0	0,4	982,0	0,4	990,0	0,4	983,0	0,4
7	996,0	0,4	982,0	0,4	1009,0	0,4	999,0	0,4
8	993,0	0,4	989,0	0,4	993,0	0,4	990,0	0,4
9	993,0	0,4	985,0	0,4	993,0	0,4	986,0	0,4
10	1003,0	0,4	997,0	0,4	1006,0	0,4	992,0	0,4

Tabla 28 Datos obtenidos para el diámetro de huella  
Operador C– tubo de plomo 13-9

Muestra	Ensayo 1				Ensayo 2			
	Diámetro en la huella(μm)				Diámetro en la huella(μm)			
	d1	±Δ d1	d2	±Δ d2	d1	±Δ d1	d2	±Δ d2
1	510	3	501	3	506	3	497	3
2	475	3	470	3	470	3	465	3
3	501	3	488	3	501	3	488	3
4	486	3	480	3	488	3	476	3
5	502	3	500	3	506	3	501	3
6	505	3	492	3	491	3	500	3
7	482	3	481	3	476	3	486	3
8	502	3	502	3	500	3	501	3
9	500	3	506	3	500	3	507	3
10	485	3	490	3	485	3	489	3

Tabla 29 Datos obtenidos para los pesos  
Operador C – tubo de plomo 13-9

Muestra	Ensayo 1				Ensayo 2			
	Carga aplicada (g)				Carga aplicada (g)			
	Pi	±Δ Pi	Pf	±Δ Pf	Pi	±Δ Pi	Pf	±Δ Pf
1	1005,0	0,4	993,0	0,4	986,0	0,4	980,0	0,4
2	1009,0	0,4	996,0	0,4	982,0	0,4	975,0	0,4
3	982,0	0,4	974,0	0,4	1008,0	0,4	1001,0	0,4
4	991,0	0,4	983,0	0,4	989,0	0,4	981,0	0,4
5	1006,0	0,4	993,0	0,4	1008,0	0,4	994,0	0,4
6	991,0	0,4	983,0	0,4	996,0	0,4	984,0	0,4
7	1009,0	0,4	1000,0	0,4	996,0	0,4	989,0	0,4
8	996,0	0,4	989,0	0,4	998,0	0,4	992,0	0,4
9	996,0	0,4	984,0	0,4	994,0	0,4	985,0	0,4
10	1007,0	0,4	997,0	0,4	1005,0	0,4	992,0	0,4

Tabla 30 Datos obtenidos para el diámetro de huella  
Operador A – placa de plomo (~ 0 %Sb)

Muestra	Ensayo 1				Ensayo 2			
	Diámetro en la huella(μm)				Diámetro en la huella(μm)			
	d1	±Δ d1	d2	±Δ d2	d1	±Δ d1	d2	±Δ d2
1	487	3	480	3	491	3	492	3
2	511	3	510	3	507	3	507	3
3	500	3	500	3	501	3	501	3
4	513	3	509	3	512	3	509	3
5	514	3	515	3	515	3	516	3
6	497	3	507	3	500	3	501	3
7	509	3	517	3	511	3	516	3
8	507	3	504	3	503	3	501	3
9	508	3	502	3	500	3	501	3
10	498	3	501	3	499	3	503	3

Tabla 31 Datos obtenidos para los pesos  
Operador A – placa de plomo (~ 0 %Sb)

Muestra	Ensayo 1				Ensayo 2			
	Carga aplicada (g)				Carga aplicada (g)			
	Pi	±Δ Pi	Pf	±Δ Pf	Pi	±Δ Pi	Pf	±Δ Pf
1	944,0	0,4	940,0	0,4	989,0	0,4	981,0	0,4
2	1002,0	0,4	1002,0	0,4	1003,0	0,4	1001,0	0,4
3	1004,0	0,4	994,0	0,4	1002,0	0,4	998,0	0,4
4	972,0	0,4	960,0	0,4	976,0	0,4	970,0	0,4
5	999,0	0,4	995,0	0,4	1010,0	0,4	1000,0	0,4
6	993,0	0,4	980,0	0,4	988,0	0,4	982,0	0,4
7	979,0	0,4	973,0	0,4	992,0	0,4	985,0	0,4
8	995,0	0,4	995,0	0,4	995,0	0,4	990,0	0,4
9	1005,0	0,4	1000,0	0,4	1009,0	0,4	1001,0	0,4
10	994,0	0,4	994,0	0,4	996,0	0,4	991,0	0,4

Tabla 32 Datos obtenidos para el diámetro de huella  
Operador B – placa de plomo (~ 0 %Sb)

Muestra	Ensayo 1				Ensayo 2			
	Diámetro en la huella(μm)				Diámetro en la huella(μm)			
	d1	±Δ d1	d2	±Δ d2	d1	±Δ d1	d2	±Δ d2
1	490	3	493	3	488	3	485	3
2	512	3	505	3	514	3	506	3
3	500	3	505	3	502	3	505	3
4	510	3	517	3	508	3	512	3
5	515	3	518	3	514	3	513	3
6	500	3	493	3	499	3	494	3
7	509	3	511	3	502	3	510	3
8	504	3	507	3	503	3	506	3
9	503	3	506	3	507	3	511	3
10	500	3	502	3	498	3	500	3

Tabla 33 Datos obtenidos para los pesos  
Operador B – placa de plomo (~ 0 %Sb)

Muestra	Ensayo 1				Ensayo 2			
	Carga aplicada (g)				Carga aplicada (g)			
	Pi	±Δ Pi	Pf	±Δ Pf	Pi	±Δ Pi	Pf	±Δ Pf
1	989,0	0,4	981,0	0,4	956,0	0,4	950,0	0,4
2	1006,0	0,4	1000,0	0,4	1005,0	0,4	1000,0	0,4
3	1001,0	0,4	995,0	0,4	999,0	0,4	993,0	0,4
4	988,0	0,4	981,0	0,4	978,0	0,4	960,0	0,4
5	999,0	0,4	991,0	0,4	1003,0	0,4	993,0	0,4
6	988,0	0,4	980,0	0,4	988,0	0,4	983,0	0,4
7	980,0	0,4	975,0	0,4	982,0	0,4	976,0	0,4
8	999,0	0,4	999,0	0,4	1003,0	0,4	995,0	0,4
9	1003,0	0,4	1000,0	0,4	1005,0	0,4	1003,0	0,4
10	995,0	0,4	990,0	0,4	998,0	0,4	993,0	0,4

Tabla 34 Datos obtenidos para el diámetro de huella  
Operador C – placa de plomo (~ 0 %Sb)

Muestra	Ensayo 1				Ensayo 2			
	Diámetro en la huella(μm)				Diámetro en la huella(μm)			
	d1	±Δ d1	d2	±Δ d2	d1	±Δ d1	d2	±Δ d2
1	490	3	483	3	491	3	486	3
2	512	3	510	3	514	3	510	3
3	500	3	501	3	501	3	498	3
4	514	3	509	3	514	3	518	3
5	515	3	511	3	516	3	511	3
6	500	3	496	3	500	3	496	3
7	512	3	505	3	512	3	508	3
8	505	3	506	3	505	3	501	3
9	501	3	506	3	501	3	501	3
10	500	3	501	3	501	3	500	3

Tabla 35 Datos obtenidos para los pesos  
Operador C – placa de plomo (~ 0 %Sb)

Muestra	Ensayo 1				Ensayo 2			
	Carga aplicada (g)				Carga aplicada (g)			
	Pi	±Δ Pi	Pf	±Δ Pf	Pi	±Δ Pi	Pf	±Δ Pf
1	956,0	0,4	949,0	0,4	975,0	0,4	970,0	0,4
2	1006,0	0,4	1000,0	0,4	1006,0	0,4	1000,0	0,4
3	1003,0	0,4	996,0	0,4	1006,0	0,4	991,0	0,4
4	978,0	0,4	971,0	0,4	1000,0	0,4	991,0	0,4
5	999,0	0,4	992,0	0,4	1003,0	0,4	992,0	0,4
6	995,0	0,4	982,0	0,4	991,0	0,4	986,0	0,4
7	982,0	0,4	972,0	0,4	980,0	0,4	976,0	0,4
8	999,0	0,4	993,0	0,4	988,0	0,4	981,0	0,4
9	1006,0	0,4	999,0	0,4	1008,0	0,4	999,0	0,4
10	1006,0	0,4	992,0	0,4	1003,0	0,4	996,0	0,4

### 5.3 Datos obtenidos para el análisis de la exactitud.

El operador A realizó ensayos para 4 tubos de plomo adicionales (10 muestras por cada tubo) y una placa de plomo puro %Sb, con la finalidad de tener más datos que cubran el rango de dureza de trabajo. Además mostraremos los reportes de %Sb para el total de los 10 tubos de plomo analizados. A continuación se muestran los datos obtenidos:

Tabla 36 Datos obtenidos para el diámetro de huella y pesos  
Operador A – Tubo de Plomo 24-14 (CC 36463)

Muestra	Diámetro en la huella( $\mu\text{m}$ )				Carga aplicada (g)			
	d1	$\pm\Delta$ d1	d2	$\pm\Delta$ d2	Pi	$\pm\Delta$ Pi	Pf	$\pm\Delta$ Pf
1	453	3	459	3	982,0	0,4	955,0	0,4
2	443	3	430	3	1000,0	0,4	994,0	0,4
3	455	3	450	3	976,0	0,4	953,0	0,4
4	445	3	446	3	1005,0	0,4	989,0	0,4
5	441	3	436	3	997,0	0,4	980,0	0,4
6	439	3	450	3	981,0	0,4	966,0	0,4
7	438	3	439	3	1006,0	0,4	984,0	0,4
8	446	3	441	3	1005,0	0,4	991,0	0,4
9	456	3	448	3	992,0	0,4	979,0	0,4
10	438	3	437	3	1014,0	0,4	988,0	0,4

Tabla 37 Datos obtenidos para el diámetro de huella y pesos  
Operador A – Tubo de Plomo 24-14 (CC 36022)

Muestra	Diámetro en la huella( $\mu\text{m}$ )				Carga aplicada (g)			
	d1	$\pm\Delta$ d1	d2	$\pm\Delta$ d2	Pi	$\pm\Delta$ Pi	Pf	$\pm\Delta$ Pf
1	497	3	499	3	1005,0	0,4	1004,0	0,4
2	503	3	487	3	985,0	0,4	999,0	0,4
3	499	3	481	3	947,0	0,4	923,0	0,4
4	523	3	508	3	998,0	0,4	999,0	0,4
5	475	3	484	3	985,0	0,4	967,0	0,4
6	484	3	481	3	926,0	0,4	901,0	0,4
7	489	3	486	3	992,0	0,4	969,0	0,4
8	480	3	487	3	998,0	0,4	984,0	0,4
9	494	3	482	3	964,0	0,4	945,0	0,4
10	505	3	503	3	974,0	0,4	987,0	0,4



Tabla 38 Datos obtenidos para el diámetro de huella y pesos  
Operador A – Placa N°2 de plomo (~ 0 %Sb)

Muestra	Diámetro en la huella( $\mu\text{m}$ )				Carga aplicada (g)			
	d1	$\pm\Delta$ d1	d2	$\pm\Delta$ d2	Pi	$\pm\Delta$ Pi	Pf	$\pm\Delta$ Pf
1	511	3	502	3	993,0	0,4	955,0	0,4
2	518	3	513	3	1018,0	0,4	990,0	0,4
3	517	3	517	3	999,0	0,4	940,0	0,4
4	530	3	515	3	947,0	0,4	913,0	0,4
5	545	3	545	3	1011,0	0,4	991,0	0,4
6	508	3	509	3	942,0	0,4	903,0	0,4
7	541	3	525	3	979,0	0,4	945,0	0,4
8	496	3	493	3	954,0	0,4	910,0	0,4
9	514	3	510	3	1008,0	0,4	990,0	0,4
10	509	3	515	3	975,0	0,4	953,0	0,4

Tabla 39 Datos obtenidos para el diámetro de huella y pesos  
Operador A – Tubo de Plomo 13-9 (CC 35897)

Muestra	Diámetro en la huella( $\mu\text{m}$ )				Carga aplicada (g)			
	d1	$\pm\Delta$ d1	d2	$\pm\Delta$ d2	Pi	$\pm\Delta$ Pi	Pf	$\pm\Delta$ Pf
1	460	3	456	3	979,0	0,4	951,0	0,4
2	478	3	470	3	1005,0	0,4	1000,0	0,4
3	474	3	467	3	955,0	0,4	936,0	0,4
4	492	3	487	3	939,0	0,4	923,0	0,4
5	477	3	495	3	967,0	0,4	944,0	0,4
6	487	3	490	3	986,0	0,4	959,0	0,4
7	463	3	471	3	951,0	0,4	926,0	0,4
8	465	3	482	3	1006,0	0,4	998,0	0,4
9	449	3	448	3	982,0	0,4	960,0	0,4
10	442	3	455	3	986,0	0,4	973,0	0,4

Tabla 40 Datos obtenidos para el diámetro de huella y pesos  
Operador A – Tubo de Plomo 24-14 (CC 35333)

Muestra	Diámetro en la huella(μm)				Carga aplicada (g)			
	d1	±Δ d1	d2	±Δ d2	Pi	±Δ Pi	Pf	±Δ Pf
1	405	3	403	3	981,0	0,4	935,0	0,4
2	409	3	400	3	979,0	0,4	957,0	0,4
3	415	3	409	3	1002,0	0,4	979,0	0,4
4	405	3	406	3	987,0	0,4	970,0	0,4
5	408	3	400	3	979,0	0,4	913,0	0,4
6	408	3	411	3	1014,0	0,4	981,0	0,4
7	415	3	408	3	981,0	0,4	954,0	0,4
8	403	3	402	3	1005,0	0,4	970,0	0,4
9	426	3	420	3	960,0	0,4	941,0	0,4
10	413	3	422	3	999,0	0,4	978,0	0,4

Finalmente, mostramos los resultados promedios reportados de % Sb en los tubos y placas analizados:

Tabla 41 Resultados promedio de %Sb

Muestra/Control de Calidad	% Sb promedio	±Δ%Sb
Placa N°1	<<< 0,10	0,03
Tubo 24-14 (CC36464)	0,84	0,03
Tubo 24-16 (CC 36026)	0,68	0,03
Tubo 13-9 (CC 36093)	0,36	0,03
Tubo 17-9 (CC 36025)	0,74	0,03
Tubo 24-14 (CC 36463)	0,57	0,03
Tubo 24-14 (CC 36022)	0,29	0,03
Placa N°2	<<< 0,10	0,03
Tubo 13-9 (CC 35897)	0,41	0,03
Tubo 24-14 (CC 35333)	0,90	0,03

La incertidumbre estándar mostrada es propia del método [17].

#### 5.4 Cálculo de la incertidumbre de medición del microscopio

Se tiene de la tabla 5 lo siguiente:

$$Lm = 1,20 \text{ mm}$$

$$s(Lm) = 2,11 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

$$u^2(rep) = 4,44 \times 10^{-6} \text{ mm}$$

De la ecuación (8) tenemos lo siguiente:

$$\sigma^2 = 1,258 \times 10^{-2}.$$

$$u^2(\delta) = 7,91 \times 10^{-7}$$

$$u^2(inst) = 2,50 \times 10^{-9} \text{ mm}$$

$$u^2(res) = 1,30 \times 10^{-6} \text{ mm}$$

Reemplazando los valores en la ecuación (8):

$$u(d_b) = 3 \text{ um}$$

#### 5.5 Calculo de la Dureza y su incertidumbre de medición

Calcularemos la dureza para la primera muestra del primer ensayo realizado por el operador

A para el tubo 24-14 (tabla 6):

Calculando el diámetro de la huella:

$$d = \left( \frac{d_1 + d_2}{2} \right) \times \frac{1}{1000} \text{ mm}$$

Entonces

$$d = \left( \frac{426 + 427}{2} \right) \times \frac{1}{1000} \text{ mm} = 0,427 \text{ mm}$$

Calculando la fuerza aplicada:

$$F = \left( \frac{P_i + P_f}{2} \right) \times \frac{g}{1000} \text{ N}$$

Entonces corrigiendo los pesos con la ecuación de corrección del certificado de calibración de la balanza (ver Anexo):

$$P_i = 1005 \text{ g} - 2,99\text{E-}04 \times 1005 \text{ g} = 1004,7 \text{ y } P_f = 1005 \text{ g} - 2,99\text{E-}04 \times 1005 \text{ g} = 1004,7$$

Entonces:

$$F = \left( \frac{1004,7 + 1004,7}{2} \right) \times \frac{9,80665}{1000} N = 9,853 N$$

De acuerdo al certificado de calibración el diámetro de la huella (d) es: 0,997 mm

Entonces

$$HBW = 0,102 \times \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} = 6,69 HBW 1/10/12$$

Calcularemos la incertidumbre de medición expandida para la primera muestra del primer ensayo realizado por el operador A para el tubo 24-14, de las ecuaciones de propagación de incertidumbre (5 al 9) e incertidumbre expandida (12):

Tabla 42 Calculo de incertidumbre de medición

Magnitud $x_i$	Estimación $x_i$	Unidades	Incertidumbre Estándar $u(x_i)$	Coficiente de Sensibilidad $c_i$	Contribución a la Incertidumbre estándar $c_i u(x_i)$	Contribución Porcentual %
F	Fi	N	0,0043	0,7	0,003	0,06
D	Di	mm	0,0005	0,7	0,000	0,00
d	di	mm	0,0038	-33,0	-0,124	99,94
					$u(c)$	0,12
					$U = k \cdot u(c)$	0,25

Finalmente la dureza se expresa así:

$$Dureza = 6,7 HBW \pm 0,3 HBW$$

A continuación se mostrara las incertidumbres obtenidas para los datos registrados de las tablas del 6 al 35.

Tabla 43 Datos de Dureza e incertidumbre de medición – Tubo de plomo 24-14

Muestra	Operador A				Operador B				Operador C			
	Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 1		Ensayo 2	
	HB	$\pm\Delta HB$	HB	$\pm\Delta HB$	HB	$\pm\Delta HB$	HB	$\pm\Delta HB$	HB	$\pm\Delta HB$	HB	$\pm\Delta HB$
1	6,7	0,3	6,7	0,3	6,6	0,3	6,6	0,3	6,7	0,3	6,7	0,3
2	6,6	0,4	6,6	0,3	6,5	0,3	6,5	0,3	6,6	0,2	6,6	0,3
3	6,4	0,2	6,4	0,2	6,4	0,3	6,3	0,3	6,6	0,2	6,5	0,2
4	7,2	0,3	7,2	0,3	7,2	0,3	7,3	0,3	7,2	0,3	7,3	0,3
5	7,0	0,3	6,9	0,3	6,8	0,3	6,8	0,3	7,0	0,3	7,0	0,3
6	6,9	0,5	6,8	0,4	6,8	0,4	6,9	0,4	6,8	0,4	6,8	0,3
7	6,4	0,4	6,3	0,3	6,3	0,4	6,3	0,3	6,2	0,2	6,3	0,2
8	6,5	0,4	6,5	0,3	6,4	0,3	6,5	0,3	6,5	0,2	6,5	0,3
9	7,3	0,4	7,2	0,4	7,2	0,4	7,2	0,3	7,3	0,4	7,3	0,3
10	6,9	0,3	6,9	0,4	6,8	0,4	6,8	0,3	6,8	0,3	6,7	0,3

Tabla 44 Datos de Dureza e incertidumbre de medición – Tubo de plomo 24-16

Muestra	Operador A				Operador B				Operador C			
	Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 1		Ensayo 2	
	HB	$\pm\Delta HB$	HB	$\pm\Delta HB$	HB	$\pm\Delta HB$	HB	$\pm\Delta HB$	HB	$\pm\Delta HB$	HB	$\pm\Delta HB$
1	5,5	0,2	5,5	0,2	5,5	0,2	5,5	0,2	5,5	0,3	5,5	0,2
2	5,4	0,2	5,3	0,2	5,4	0,2	5,3	0,2	5,4	0,3	5,4	0,2
3	5,6	0,3	5,7	0,2	5,7	0,4	5,6	0,3	5,6	0,3	5,6	0,3
4	5,9	0,3	5,9	0,3	5,9	0,3	5,9	0,2	5,9	0,3	5,9	0,3
5	5,4	0,2	5,4	0,2	5,4	0,2	5,5	0,2	5,4	0,3	5,3	0,2
6	5,4	0,2	5,3	0,2	5,4	0,2	5,4	0,2	5,4	0,2	5,4	0,2
7	6,2	0,3	6,2	0,3	6,2	0,2	6,2	0,3	6,1	0,2	6,1	0,2
8	5,7	0,2	5,7	0,2	5,6	0,2	5,7	0,3	5,7	0,3	5,7	0,3
9	6,1	0,2	6,1	0,3	6,0	0,2	6,1	0,2	6,1	0,3	6,1	0,3
10	5,8	0,2	5,8	0,2	5,8	0,2	5,7	0,2	5,8	0,3	5,9	0,2

Tabla 45 Datos de Dureza e incertidumbre de medición – Tubo de plomo 17-9

Muestra	Operador A				Operador B				Operador C			
	Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 1		Ensayo 2	
	HB	±ΔHB	HB	±ΔHB	HB	±ΔHB	HB	±ΔHB	HB	±ΔHB	HB	±ΔHB
1	6,2	0,2	6,1	0,2	6,0	0,2	6,1	0,2	6,1	0,2	6,1	0,3
2	6,4	0,2	6,3	0,2	6,4	0,2	6,4	0,2	6,3	0,2	6,3	0,3
3	5,6	0,2	5,6	0,3	5,6	0,3	5,6	0,2	5,7	0,2	5,6	0,2
4	6,2	0,4	6,2	0,3	6,1	0,4	6,1	0,3	6,2	0,3	6,2	0,3
5	5,6	0,3	5,7	0,3	5,6	0,2	5,6	0,2	5,6	0,2	5,6	0,2
6	6,0	0,2	5,9	0,2	5,9	0,3	5,9	0,2	5,9	0,2	5,9	0,3
7	5,8	0,3	5,8	0,3	5,8	0,2	5,7	0,3	5,7	0,2	5,7	0,3
8	5,7	0,3	5,7	0,2	5,6	0,2	5,7	0,2	5,7	0,2	5,7	0,2
9	5,7	0,2	5,7	0,2	5,6	0,2	5,6	0,3	5,6	0,2	5,6	0,2
10	5,8	0,4	5,8	0,3	5,8	0,3	5,8	0,3	5,8	0,3	5,7	0,2

Tabla 46 Datos de Dureza e incertidumbre de medición – Tubo de plomo 13-9

Muestra	Operador A				Operador B				Operador C			
	Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 1		Ensayo 2	
	HB	±ΔHB	HB	±ΔHB	HB	±ΔHB	HB	±ΔHB	HB	±ΔHB	HB	±ΔHB
1	4,6	0,2	4,6	0,2	4,6	0,3	4,7	0,2	4,6	0,2	4,6	0,2
2	5,5	0,4	5,4	0,2	5,4	0,4	5,4	0,2	5,4	0,2	5,4	0,2
3	4,8	0,3	4,8	0,2	4,8	0,3	4,8	0,3	4,8	0,3	4,8	0,2
4	5,1	0,2	5,1	0,2	5,1	0,2	5,1	0,2	5,0	0,2	5,1	0,3
5	4,7	0,2	4,8	0,2	4,7	0,2	4,7	0,2	4,7	0,2	4,7	0,2
6	4,8	0,4	4,8	0,4	4,7	0,4	4,8	0,3	4,7	0,3	4,8	0,2
7	5,2	0,2	5,2	0,2	5,1	0,2	5,1	0,2	5,2	0,2	5,1	0,3
8	4,6	0,2	4,6	0,2	4,6	0,2	4,6	0,2	4,7	0,1	4,7	0,2
9	4,7	0,2	4,7	0,2	4,6	0,2	4,6	0,2	4,6	0,2	4,6	0,2
10	5,0	0,2	5,0	0,2	5,0	0,2	5,0	0,2	5,0	0,2	5,0	0,2

Tabla 47 Datos de Dureza e incertidumbre de medición – Placa de plomo (~ 0%Sb)

Muestra	Operador A				Operador B				Operador C			
	Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 1		Ensayo 2		Ensayo 1		Ensayo 2	
	HB	$\pm\Delta HB$	HB	$\pm\Delta HB$	HB	$\pm\Delta HB$	HB	$\pm\Delta HB$	HB	$\pm\Delta HB$	HB	$\pm\Delta HB$
1	4,8	0,2	4,9	0,2	4,9	0,2	4,8	0,2	4,8	0,2	4,9	0,2
2	4,6	0,1	4,6	0,1	4,6	0,2	4,6	0,2	4,5	0,2	4,5	0,2
3	4,7	0,2	4,7	0,2	4,7	0,2	4,7	0,2	4,7	0,2	4,8	0,2
4	4,4	0,2	4,4	0,2	4,4	0,2	4,4	0,2	4,4	0,2	4,4	0,2
5	4,5	0,1	4,5	0,1	4,4	0,1	4,5	0,1	4,5	0,2	4,5	0,2
6	4,7	0,2	4,7	0,2	4,7	0,2	4,8	0,2	4,7	0,2	4,7	0,2
7	4,4	0,1	4,4	0,2	4,5	0,1	4,5	0,2	4,5	0,2	4,4	0,2
8	4,6	0,1	4,7	0,2	4,6	0,2	4,6	0,2	4,6	0,1	4,6	0,2
9	4,7	0,2	4,8	0,2	4,7	0,2	4,6	0,2	4,7	0,2	4,7	0,2
10	4,7	0,2	4,7	0,2	4,7	0,2	4,7	0,2	4,7	0,2	4,7	0,2

## **CAPÍTULO 6. DISCUSIÓN**

### **6.1 Análisis del Cálculo de Incertidumbre de Dureza.**

De la Tabla 42 podemos se puede notar lo siguiente:

- Como se puede observar la principal fuente de incertidumbre es la asociada a la medición del diámetro de la huella y ésta a su vez depende de la variabilidad de las dos mediciones hechas en el microscopio y de la incertidumbre del campo visual..
- La variabilidad de las 2 mediciones dependen mucho de la forma de la huella, mientras más se aproxime a una circunferencia la variabilidad disminuye.
- Existen factores que no se pueden cuantificar pero si se han observado cualitativamente, estos influyen en la forma de la huella dejada por el indentador. Estos factores son la lubricación de las partes metálicas para que la barra del equipo deslice libremente y la carga pueda aplicarse perpendicularmente. Otro de los factores es colocar las pesas en el centro del platillo una sobre otra. Finalmente las muestras deben estar adecuadamente pulidas y libres de grasa o suciedad.
- Para disminuir esta incertidumbre se debería tomar más mediciones en la huella, sin embargo, esto invertiría más tiempo, por lo que no sería productivo la realización del método dada las cantidades de lotes de plomo que es necesario controlar.

### **6.2 Análisis de Repetibilidad y Reproducibilidad (R&R) en el sistema de medición**

Utilizando los valores de dureza de las tablas de 43 al 47, se realizó el método de ANOVA (cruzado) para realizar un análisis de repetibilidad y reproducibilidad al sistema de medición. Se hizo uso del Software Minitab para procesar la data obteniendo los siguientes resultados:

#### **6.2.1 Análisis de R&R para el tubo 24-14**

Del Minitab se obtiene lo siguiente:



Tabla 48 %Contribución – Tubo de plomo 24-14

**R&R del sistema de medición**

Fuente	CompVar	%Contribución (de CompVar)
Gage R&R total	0.004031	3.76
Repetibilidad	0.001415	1.32
Reproducibilidad	0.002616	2.44
Operador	0.000776	0.72
Operador*Parte	0.001840	1.71
Parte a parte	0.103310	96.24
Variación total	0.107341	100.00

Como resultado el 96,24% de la variación total se debe a las diferencias entre muestras, este porcentaje alto se considera aceptable por lo que se concluye que el sistema puede diferenciar entre muestras.

Tabla 49 % Variación – Tubo de plomo 24-14

Fuente	Desv.Est. (DE)	Var. estudio (6 × DE)	%Var. (%VE)
Gage R&R total	0.063489	0.38093	19.38
Repetibilidad	0.037616	0.22570	11.48
Reproducibilidad	0.051145	0.30687	15.61
Operador	0.027857	0.16714	8.50
Operador*Parte	0.042893	0.25736	13.09
Parte a parte	0.321418	1.92851	98.10
Variación total	0.327629	1.96577	100.00

Número de categorías distintas = 7

Se observa que el % Var de la reproducibilidad es ligeramente mayor al de repetibilidad eso debido a la diferencia entre los operadores, pero esta diferencia no es crítica.

**Como se observa el GRR es de 19,38 % se encuentran en el rango de 10% y 30%, por lo que de acuerdo a la aplicación y al costo del instrumento consideramos al sistema de medición como aceptable.**

Por otro lado el número de categorías distintas es 7, según la AIAG el sistema es aceptable y puede distinguir entre partes.

Finalmente observemos las siguientes graficas:

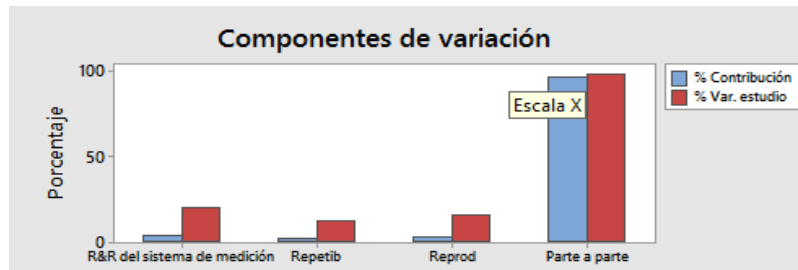


Figura 8 Variación de la componentes – Tubo de plomo 24-14

Como se observa en la Fig. 8 la mayor contribución a la variabilidad se da por la interacción parte a parte (entre muestras), lo que es aceptable dado que el sistema es capaz de diferenciar entre muestras y esta variabilidad es mucho mayor al % Variación del sistema de medición lo que también es aceptable.

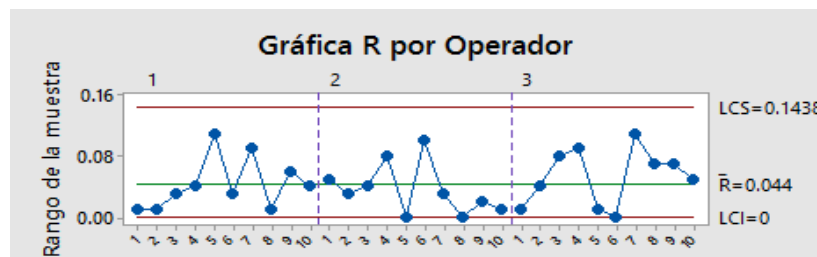


Figura 9 Gráfica de control de rangos – Tubo de Plomo 24-14

Como se observa en la Fig. 9 todos los puntos de medición se encuentran dentro de los límites por lo que concluye que los operadores están tomando medidas con uniformidad.

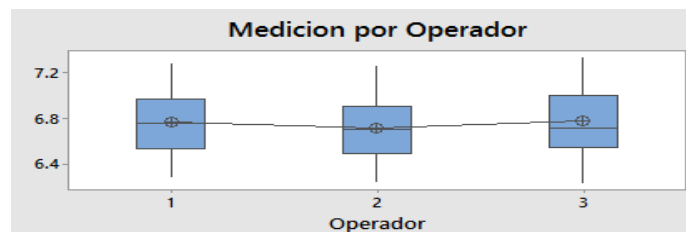


Figura 10 Gráfica por operador – Tubo de Plomo 24-14

Como se puede observar de la Fig. 10, los operadores están midiendo las muestras de forma similar y la dispersión es similar en las mediciones.

## 6.2.2 Análisis de R&R para el tubo 24-16

Del Minitab se obtiene lo siguiente:

Tabla 50 %Contribución – Tubo de plomo 24-16

### R&R del sistema de medición

Fuente	CompVar	%Contribución (de CompVar)
Gage R&R total	0.0013984	1.75
Repetibilidad	0.0007167	0.90
Reproducibilidad	0.0006818	0.85
Operador	0.0000000	0.00
Operador*Parte	0.0006818	0.85
Parte a parte	0.0785879	98.25
Variación total	0.0799863	100.00

Como resultado el 98,25% de la variación total se debe a las diferencias entre muestras, este porcentaje alto se considera aceptable por lo que se concluye que el sistema puede diferenciar entre muestras.

Tabla 51 %Variación – Tubo de plomo 24-16

Fuente	Desv.Est. (DE)	Var. estudio (6 × DE)	%Var. estudio (%VE)
Gage R&R total	0.037396	0.22437	13.22
Repetibilidad	0.026771	0.16062	9.47
Reproducibilidad	0.026111	0.15666	9.23
Operador	0.000000	0.00000	0.00
Operador*Parte	0.026111	0.15666	9.23
Parte a parte	0.280335	1.68201	99.12
Variación total	0.282818	1.69691	100.00

Número de categorías distintas = 10

Se observa que el % Var de la reproducibilidad es similar al de repetibilidad por lo que no hay diferencias críticas por la medición entre operadores.

**Como se observa el GRR es de 13.22 % y se encuentran en el rango de 10% y 30% por lo que de acuerdo a la aplicación y al costo del instrumento consideramos al sistema de medición como aceptable.**

Por otro lado el número de categorías distintas es 10, según la AIAG el sistema es aceptable y puede distinguir entre partes.

Finalmente observemos las siguientes graficas:

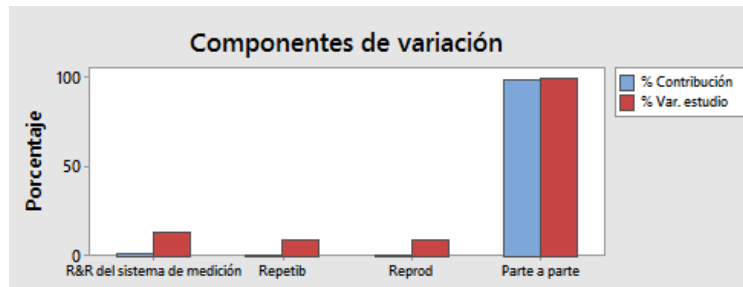


Figura 11 Variación de la componentes – Tubo de Plomo 24-16

Como se observa en la Fig. 11 la mayor contribución a la variabilidad se da por la interacción parte a parte (entre muestras), lo que es aceptable dado que el sistema es capaz de diferenciar entre muestras y esta variabilidad es mucho mayor al % Variación del sistema de medición lo que también es aceptable.

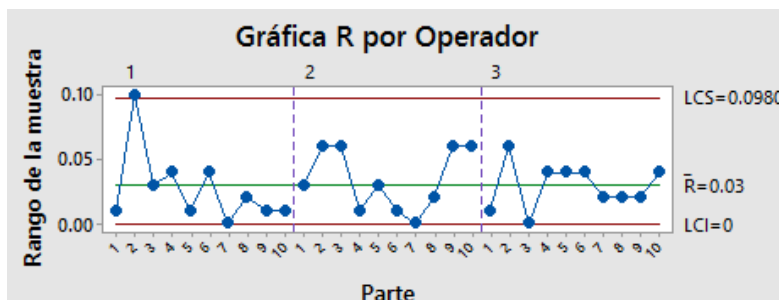


Figura 12 Gráfica de control de rangos – Tubo de plomo 24-16

Como se observa en la Fig. 12. Todos los puntos de medición se encuentran dentro de los límites por lo que concluye que los operadores están tomando medidas con uniformidad.

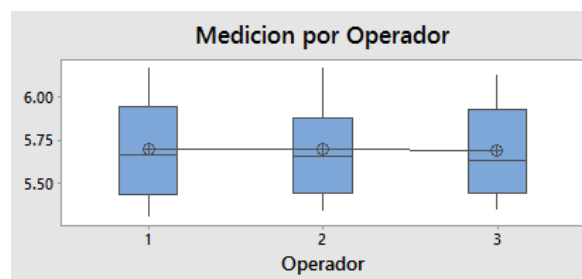


Figura 13 Gráfica por operador – Tubo de Plomo 24-16

Como se puede observar de la Fig. 13, los operadores están midiendo las muestras de forma similar y la dispersión es similar en las mediciones.

### 6.2.3 Análisis de R&R para el tubo 17-9

Del Minitab se obtiene lo siguiente:

Tabla 52 %Contribución – Tubo de plomo 17-9

#### R&R del sistema de medición

Fuente	CompVar	%Contribución (de CompVar)
Gage R&R total	0.0014958	2.28
Repetibilidad	0.0008300	1.27
Reproducibilidad	0.0006658	1.02
Operador	0.0001707	0.26
Operador*Parte	0.0004951	0.76
Parte a parte	0.0640553	97.72
Variación total	0.0655511	100.00

Como resultado el 97,72% de la variación total se debe a las diferencias entre muestras, este porcentaje alto se considera aceptable por lo que se concluye que el sistema puede diferenciar entre muestras.

Tabla 53 %Variación – Tubo de plomo 17-9

Fuente	Desv.Est. (DE)	Var. estudio (6 × DE)	%Var. estudio (%VE)
Gage R&R total	0.038676	0.23206	15.11
Repetibilidad	0.028810	0.17286	11.25
Reproducibilidad	0.025804	0.15482	10.08
Operador	0.013067	0.07840	5.10
Operador*Parte	0.022251	0.13350	8.69
Parte a parte	0.253091	1.51855	98.85
Variación total	0.256030	1.53618	100.00

Número de categorías distintas = 9

Se observa que el % Var de la reproducibilidad es similar al de repetibilidad por lo que no hay diferencias críticas por la medición entre operadores.

**Como se observa el GRR es de 15,11% y se encuentran en el rango de 10% y 30%, por lo que de acuerdo a la aplicación y al costo del instrumento consideramos al sistema de medición como aceptable.**

Por otro lado el número de categorías distintas es 9, según la AIAG el sistema es aceptable y puede distinguir entre partes.

Finalmente observemos las siguientes graficas:

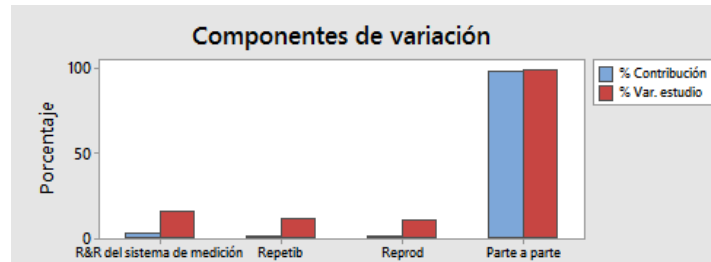


Figura 14 Variación de la componentes – Tubo de Plomo 17-9

Como se observa en la Fig. 14 la mayor contribución a la variabilidad se da por la interacción parte a parte, lo que es aceptable dado que el sistema es capaz de diferenciar entre muestras y esta variabilidad es mucho mayor al % Variación del sistema de medición lo que también es aceptable.

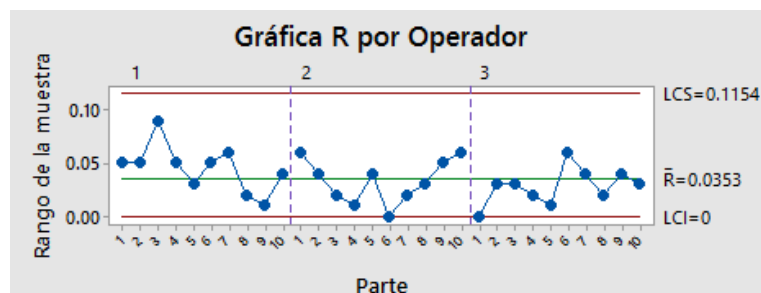


Figura 15 Gráfica de control de rangos – Tubo de Plomo 17-9

Como se observa en la Fig. 15. Todos los puntos de medición se encuentran dentro de los límites por lo que concluye que los operadores están tomando medidas con uniformidad.

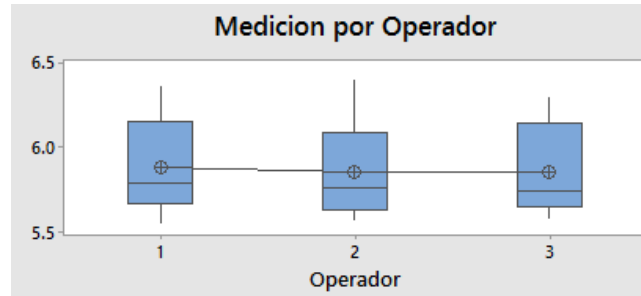


Figura 16 Gráfica por operador – Tubo de Plomo 17-9

Como se puede observar de la Fig. 16, los operadores están midiendo las muestras de forma similar y la dispersión es similar en las mediciones.

### 6.2.4 Análisis de R&R para el tubo 13-9

Del Minitab se obtiene lo siguiente:

Tabla 54 %Contribución – Tubo de plomo 13-9

Fuente	CompVar	%Contribución (de CompVar)
Gage R&R total	0.0014975	2.14
Repetibilidad	0.0008267	1.18
Reproducibilidad	0.0006708	0.96
Operador	0.0000799	0.11
Operador*Parte	0.0005909	0.85
Parte a parte	0.0683265	97.86
Variación total	0.0698240	100.00

Como resultado el 97,86% de la variación total se debe a las diferencias entre muestras, este porcentaje alto se considera aceptable por lo que se concluye que el sistema puede diferenciar entre muestras.

Tabla 55 %Variación – Tubo de plomo 13-9

Fuente	Desv.Est. (DE)	Var. estudio (6 × DE)	%Var. estudio (%VE)
Gage R&R total	0.038698	0.23219	14.64
Repetibilidad	0.028752	0.17251	10.88
Reproducibilidad	0.025900	0.15540	9.80
Operador	0.008939	0.05363	3.38
Operador*Parte	0.024309	0.14585	9.20
Parte a parte	0.261393	1.56836	98.92
Variación total	0.264242	1.58545	100.00

Número de categorías distintas = 9

Se observa que el % Var de la reproducibilidad es similar al de repetibilidad por lo que no hay diferencias críticas por la medición entre operadores.

**Como se observa el GRR y es de 14,64% se encuentran en el rango de 10% y 30%, por lo que de acuerdo a la aplicación y al costo del instrumento consideramos al sistema de medición como aceptable.**

Por otro lado el número de categorías distintas es 9, según la AIAG el sistema es aceptable y puede distinguir entre partes.

Finalmente observemos las siguientes graficas:

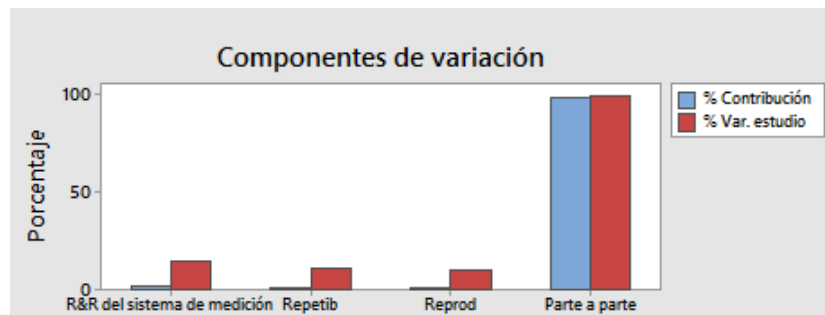


Figura 17 Variación de la componentes – Tubo de plomo 13- 9

Como se observa en la Fig. 17 la mayor contribución a la variabilidad se da por la interacción parte a parte, lo que es aceptable dado que el sistema es capaz de diferenciar entre muestras y esta variabilidad es mucho mayor al % Variación del sistema de medición lo que también es aceptable.

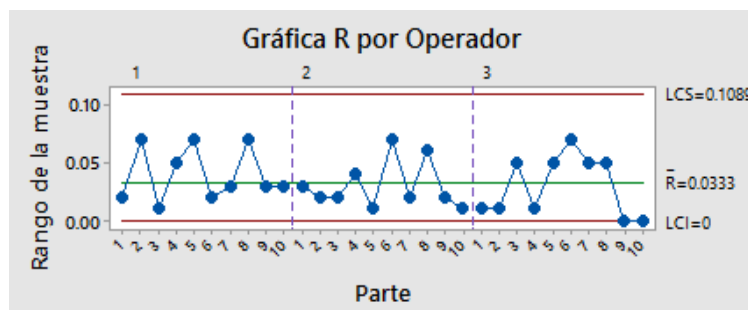


Figura 18 Gráfica de control de rangos – Tubo de plomo 13-9



Como se observa en la Fig. 18. Todos los puntos de medición se encuentran dentro de los límites por lo que concluye que los operadores están tomando medidas con uniformidad.

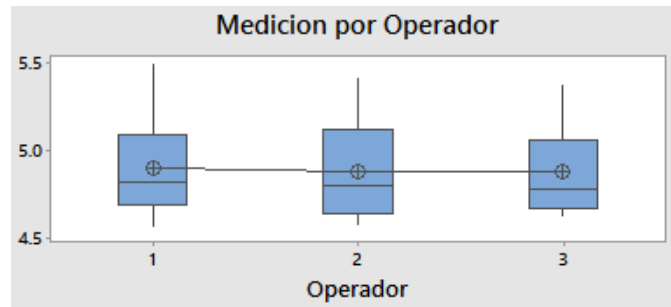


Figura 19 Gráfica por operador – Tubo de Plomo 13-9

Como se puede observar de la Fig. 19, los operadores están midiendo las muestras de forma similar y se observa que el operador 2 (B) tiene ligeramente una mayor dispersión en los resultados probablemente las partes medidas no han estado bien pulidas.

### 6.2.5 Análisis de R&R para la placa de plomo (~ 0%Sb)

Del Minitab se obtiene lo siguiente:

Tabla 56 %Contribución – placa de plomo (~0 %Sb)

#### R&R del sistema de medición

Fuente	CompVar	%Contribución (de CompVar)
Gage R&R total	0.0015690	7.33
Repetibilidad	0.0010033	4.69
Reproducibilidad	0.0005656	2.64
Operador	0.0000000	0.00
Operador*Parte	0.0005656	2.64
Parte a parte	0.0198314	92.67
Variación total	0.0214004	100.00

Como resultado el 92,67% de la variación total se debe a las diferencias entre muestras, este porcentaje alto se considera aceptable por lo que se concluye que el sistema puede diferenciar entre muestras.

Tabla 57 % Variación – placa de plomo (~0 %Sb)

Fuente	Desv.Est. (DE)	Var. estudio (6 × DE)	%Var. estudio (%VE)
Gage R&R total	0.039610	0.237662	27.08
Repetibilidad	0.031675	0.190053	21.65
Reproducibilidad	0.023783	0.142700	16.26
Operador	0.000000	0.000000	0.00
Operador*Parte	0.023783	0.142700	16.26
Parte a parte	0.140824	0.844944	96.26
Variación total	0.146289	0.877732	100.00

Número de categorías distintas = 5

Se observa que el % Var de la repetibilidad es mayor al de reproducibilidad por lo que para este rango de medida se sugiere revisar el sistema de medición para poder estructurar un posible rediseño o determinar la fuente de la variabilidad.

**Como se observa el GRR es de 27,08% se encuentran en el rango de 10% y 30, por lo que de acuerdo a la aplicación y al costo del instrumento consideramos al sistema de medición como aceptable.**

Por otro lado el número de categorías distintas es 5, el sistema es aceptable y puede distinguir entre partes, en esta ocasión se presenta el menor número de partes a distinguir esto debido a que la uniformidad en la placa es mayor que en los tubos de plomo, dado que no está afectado por el antimonio.

Finalmente observemos las siguientes graficas:

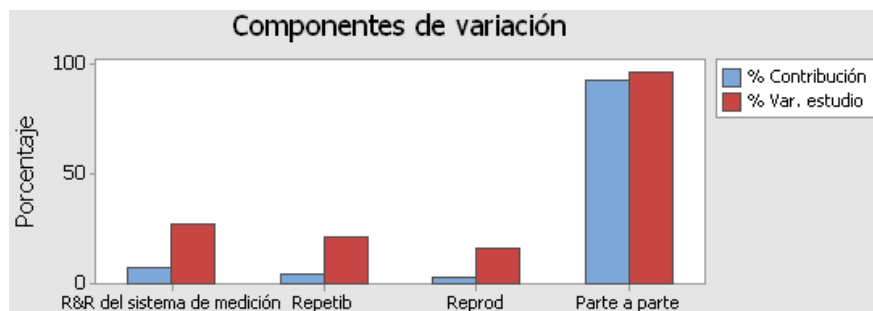


Figura 20 Variación de la componentes – placa de plomo (~ 0%Sb)

Como se observa en la Fig. 20, la mayor contribución a la variabilidad se da por la interacción parte a parte, lo que es aceptable dado que el sistema es capaz de diferenciar entre muestras y esta variabilidad es mucho mayor al % Variación del sistema de medición lo que también es aceptable.

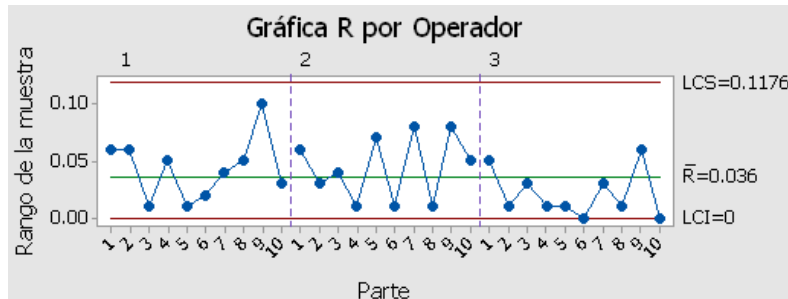


Figura 21 Gráfica de control de rangos – placa de plomo (~ 0%Sb)

Como se observa en la Fig. 21 Todos los puntos de medición se encuentran dentro de los límites por lo que concluye que los operadores están tomando medidas con uniformidad.

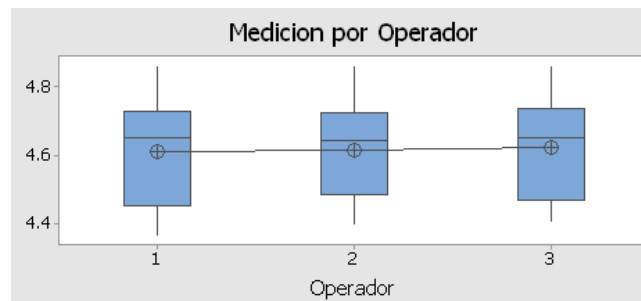


Figura 22 Gráfica por operador – placa de plomo (~ 0%Sb)

Como se puede observar de la Fig. 22, los operadores están midiendo las muestras de forma similar y sin embargo se observa mayor dispersión en los operadores 1 (A) y 3 (C).

Finalmente, para este análisis revisaremos la gráfica medición por parte:

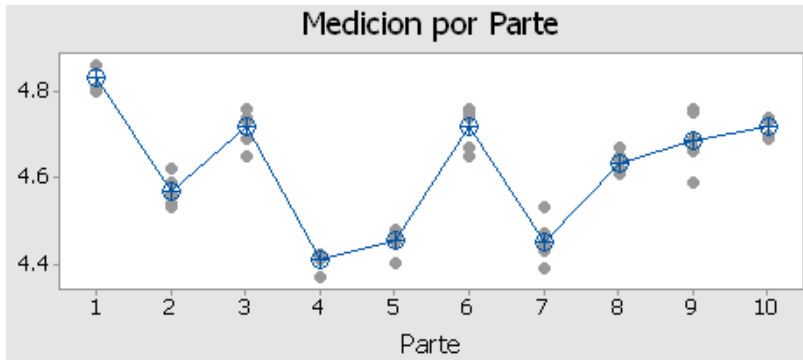


Figura 23: Grafica medición por parte - placa de plomo (~ 0%Sb)

Como se puede observar en la Fig.23, las partes 3, 6, 7 y 9 presentan una variabilidad mayor en las mediciones, esto afecta en gran medida al % repetibilidad y al no reproducirse en las demás muestras podemos concluir que esta variabilidad no es debido a los operadores, sino es propia de las muestras a analizar y es el factor principal que produce que el %repetibilidad sea mayor al %reproducibilidad. A pesar que en su conjunto hay una menor dispersión comparador con los tubos de plomo antimoniado, existen partes de la placa donde hay mayor variabilidad.

### 6.3 Evaluación de la Dureza vs %Sb

De la tabla 43 al 47 obtenemos los siguientes valores de dureza:

**Tabla 58 Resultados de dureza de 4 tubos de plomo adicionales y una placa de plomo**

Muestra	24-14 CC 36463		24-14 CC 36022		Placa N°2		13-9 CC35897		24-14 CC35333	
	HBW	±ΔHBW	HBW	±ΔHBW	HBW	±ΔHBW	HBW	±ΔHBW	HBW	±ΔHBW
1	5,6	0,2	4,8	0,2	4,5	0,2	5,5	0,2	7,2	0,3
2	6,3	0,4	4,8	0,3	4,5	0,2	5,3	0,3	7,2	0,4
3	5,7	0,2	4,6	0,4	4,3	0,1	5,1	0,2	7,1	0,4
4	6,1	0,2	4,4	0,3	4,0	0,3	4,6	0,2	7,2	0,3
5	6,2	0,3	5,1	0,2	3,9	0,1	4,8	0,4	7,1	0,4
6	6,0	0,4	4,7	0,2	4,2	0,1	4,9	0,2	7,3	0,3
7	6,3	0,2	4,9	0,2	4,0	0,3	5,2	0,3	7,0	0,4
8	6,1	0,3	5,1	0,2	4,5	0,2	5,4	0,4	7,4	0,3
9	5,8	0,3	4,8	0,3	4,5	0,2	5,8	0,2	6,5	0,3
10	6,3	0,2	4,6	0,2	4,4	0,2	5,9	0,4	6,9	0,4

De la tabla 58, tomando los valores para el Operador A y el primer ensayo tenemos lo siguiente:

Muestra	Ensayo 1	
	HBW	$\pm\Delta$ HBW
1	5,6	0,2
2	6,3	0,4
3	5,7	0,2
4	6,1	0,2
5	6,2	0,3
6	6,0	0,4
7	6,3	0,2
8	6,1	0,3
9	5,8	0,3
10	6,3	0,2

Calculando el promedio de las 10 mediciones obtenemos: 6,8 HWB  $\pm$  0,3 HWB.

Tomando los valores de dureza para el operador A para el primer ensayo de las tablas del 43 al 47, los resultados de la tabla 58 y los valores de %Sb de la tabla 41 (multiplicando la incertidumbre estándar por 2 para obtener la incertidumbre expandida), tenemos los siguientes promedios:

Tabla 59 Resultados de dureza de vs %Sb – Sistema de Medición

N°	Muestra/Control de Calidad	HBWpromedio	$\pm\Delta$ HBW	% Sbpromedio	$\pm\Delta$ %Sb
1	Placa N°2	4,3	0,2	$\ll 0,10$	0,06
2	Placa N°1	4,6	0,2	$\ll 0,10$	0,06
3	Tubo 24-14 (CC 36022)	4,8	0,2	0,29	0,06
4	Tubo 13-9 (CC 36093)	4,9	0,2	0,36	0,06
5	Tubo 13-9 (CC 35897)	5,2	0,3	0,41	0,06
6	Tubo 24-16 (CC 36026)	5,7	0,2	0,68	0,06
7	Tubo 17-9 (CC 36025)	5,9	0,3	0,74	0,06
8	Tubo 24-14 (CC 36463)	6,0	0,3	0,57	0,06
9	Tubo 24-14 (CC36464)	6,8	0,3	0,84	0,06
10	Tubo 24-14 (CC 35333)	7,1	0,3	0,90	0,06

De la tabla 3 y 4, se tiene lo siguiente:

Tabla 60 Valores de %Sb y Dureza - Teóricos

Material	%SB	Dureza HBW
Plomo refinado	0	3,8
Plomo antimoniado	1	7
Plomo antimoniado	3	9,1
Plomo antimoniado	6	13

Grafiando los valores teóricos tenemos lo siguiente:

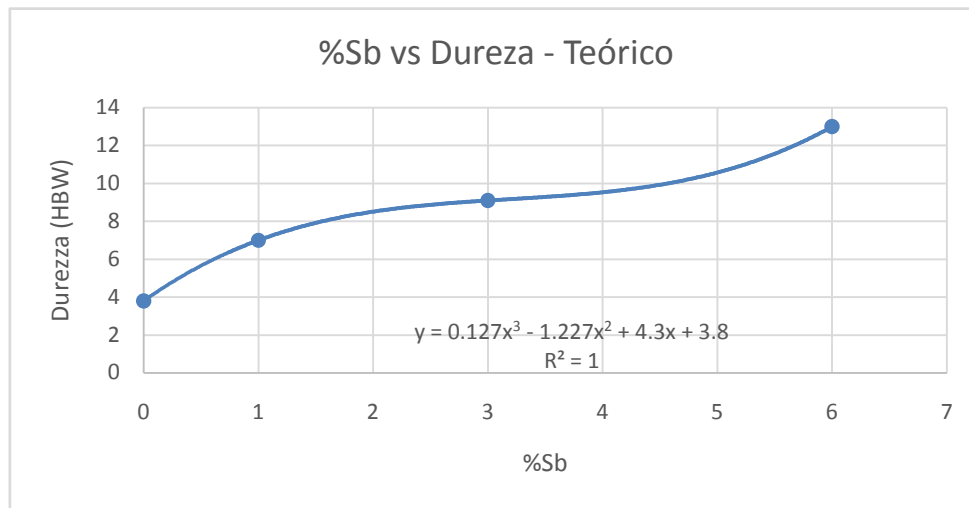


Figura 23 Porcentaje de antimonio vs Dureza, de la tabla de valores teóricos

Utilizando la ecuación de aproximación y los valores de la tabla 57, tenemos la siguiente gráfica:

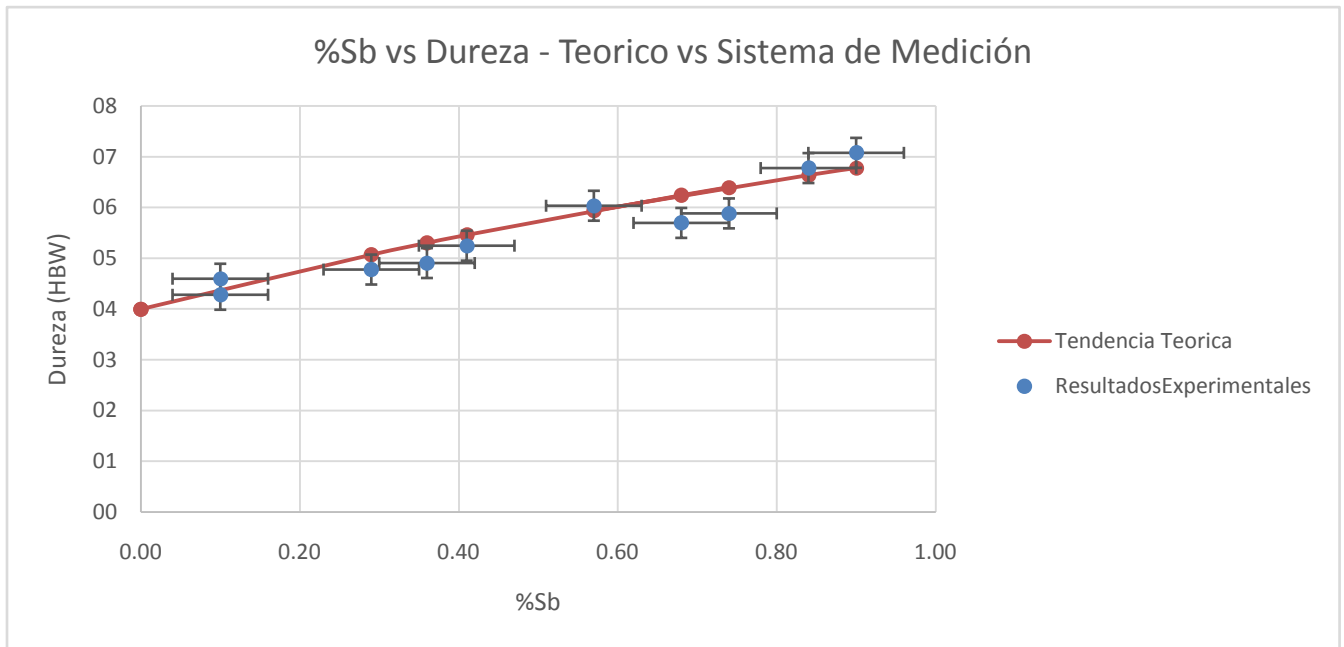


Figura 24 Porcentaje de antimonio vs Dureza, comparativo experimental y teórico.

Como se observa para los resultados obtenidos en las placas refinadas electrolíticamente los valores obtenidos se encuentran dentro del rango de valores de dureza para los diferentes grados de plomo puro (3,2 HBW a 5.5 HBW) y va depender mucho del proceso el grado de pureza de la misma.

Para las 8 muestras restantes, 6 valores se cruzan con la tendencia teórica, esto nos indica que los valores de durezas obtenidas tienen concordancia con lo esperado según la literatura. Hay que tomar en cuenta que la línea de tendencia es una aproximación muy gruesa dada la poca cantidad de datos que se tiene para elaborar la gráfica además el proceso de producción del plomo analizado puede influir también para dar resultados diferentes, sin embargo como se observa las diferencias no son críticas.

De la ecuación teórica calculada obtenemos la siguiente tabla:

Tabla 61 Valores de %Sb y Dureza - Teóricos

<b>%Sb</b>	<b>HBWteorico</b>	<b>HBWexperimental</b>	<b>Error%</b>
0,10	4,2	4,3	1,5
0,10	4,2	4,6	9,0
0,29	4,9	4,8	3,4
0,36	5,2	4,9	5,5
0,41	5,4	5,2	2,2
0,68	6,2	5,7	8,0
0,74	6,4	5,9	7,5
0,57	5,9	6,0	2,7
0,84	6,6	6,8	2,4
0,90	6,8	7,1	4,6

Como se observa hay un error porcentual menor a 10%.

En el Perú no hay un patrón de medición u otro equipo capaz de obtener la misma resolución para poder corroborar la exactitud del método. Nuestro siguiente trabajo es poder llevar nuestras muestras a un laboratorio en el extranjero para poder corroborar nuestros resultados.



## **CAPITULO 7. CONCLUSIONES**

- Se implementó el método UNE EN-ISO 6506-1, para la medición de dureza Brinell de Tubos de Plomo antimoniado, como parte del control de calidad de estos, utilizando una balanza electrónica.
- Se construyó un prototipo utilizando piezas metálicas y una balanza electrónica de bajo costo para implementar el método UNE EN-ISO 6506-1.
- Se determinó la incertidumbre de medición del método identificando las fuentes de error del mismo.
- Se realizó un análisis de repetibilidad y reproducibilidad del sistema de medición resultando aceptable debido a la aplicación y el bajo costo del equipo, por lo que se determinó que el sistema de medición es preciso.
- Se realizó un comparativo de los resultados obtenidos con valores teóricos de plomo y aleación de plomo-antimonio obteniendo un porcentaje de error menor a a 10%.

## CAPÍTULO 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] <http://sistemas.inacal.gob.pe:8080/crtacre/> (consultado 13/09/2015).
- [2] AENOR. Norma Española UNE-EN-ISO 6506-1 Materiales Metálicos Ensayo de Dureza Brinell Parte 1: Método de Ensayo (ISO 6506-1:1999). AENOR, Madrid. Pag. 6-9, (2000).
- [3] Wolfgang A. Schmid y Ruben J. Lazos Martínez. Guía para la estimar la incertidumbre de la Medición. Revision 1. CENAM, México. Pag.6-17 (2004).
- [4] Luis C. Martorelli, Jaavier R. Bergamini y Alejandro Paola. Evaluación de la incertidumbre en la determinación del campo visual de un microscopio óptico compuesto. Centro Nacional de Metrología, La Plata. Pag 1-7 (2010)
- [5] L. Llamosa, L. Meza y M. Botero, Scientia et Technica (Universidad Tecnológica de Pereira) Año XIII, **35**, 456, (2007).
- [6] <http://www.minitab.com/uploadedFiles/Documents/samplematerials/TrainingSampleMeasurementSystemsMTB16ES.pdf> (consultado 13/09/2015)
- [7]. L. Llamosa, L. Meza y M. Botero, Scientia et Technica (Universidad Tecnológica de Pereira) Año XIII, **35**, 456, (2007).
- [8]. M. Botero O. Albeláez, J. Mendoza. Scientia et Technica (Universidad Tecnológica de Pereira) Año XIII, **37**, 434, (2007).
- [9] MetAs & Metrólogos Asociados, La Guía Metas Año 3, **11**, (2003).
- [10] Grupo de Trabajo de Análisis de Sistemas de Medición (MSA). Analisis de Sistema de Medición. Cuarta Edición. Pag. 78 (2010).
- [11] Grupo de Trabajo de Análisis de Sistemas de Medición (MSA). Analisis de Sistema de Medición. Cuarta Edición. Pag. 47 (2010).
- [12] Grupo de Trabajo de Análisis de Sistemas de Medición (MSA). Analisis de Sistema de Medición. Cuarta Edición. Pag. 128 (2010).
- [13] <http://www.totalmateria.com/Article10.htm> (consultado el 13/09/2015)
- [14] Werne Martienssen y Hans Warlimont. Springer Handbook of Condensed Matter and Materials Data. Springer, Berlin. Pag.408 (2005).

[15] Werne Martienssen y Hans Warlimont. Springer Handbook of Condensed Matter and Materials Data. Springer, Berlin. Pag.413 (2005).

[16] [http://www.metico.com.pe/es/plomo\\_tubo.html](http://www.metico.com.pe/es/plomo_tubo.html) (consultado el 13/5/2015)

[17] The Standards Association of Australia Standards House. Australian Standard 1671.1 - 1987 Lead Alloys Part 1 Determination of Antimony Content – Flame Atomic Absorption Spectrometric Method. The Standards Association of Australia, Sidney. Pag. 6, (1987).

[18] Asociación Mercosur de Normalización. NM ISO 6506-2:2010 Materiales metálicos - Ensayo de dureza Brinell Parte 2: Verificación y calibración de máquinas de ensayo (ISO 6506-2:2005, IDT). UNIT, Montevideo. Pag. 4, (2010).

[19] AENOR. Norma Española UNE-EN-ISO 6506-1 Materiales Metálicos Ensayo de Dureza Brinell Parte 1: Método de Ensayo (ISO 6506-1:1999). AENOR, Madrid. Pag. 13, (2000).

## ANEXO A: Parámetros para el Método de Ensayo

El diámetro se debe determinar tomando el valor medio de al menos tres valores individuales del diámetro medido en distintas posiciones de la esfera. Ningún valor individual debe diferir del diámetro nominal por encima de la tolerancia indicada en la Tabla A.1. [18]

Tabla A 1 Tolerancias para distintos diámetros de la esfera

Diámetro de esfera / Diâmetro da esfera mm	Tolerancia / Tolerância mm
10	± 0,005
5	± 0,004
2,5	± 0,003
1	± 0,003

La probeta de ensayo debe tener un espesor mínimo, la siguiente tabla ayuda a elegir el espesor mínimo de la probeta de ensayo [19]

Tabla A 2 Espesor mínimo de la probeta de ensayo (mm)

Diámetro medio de la huella <i>d</i>	Espesor mínimo de la probeta de ensayo			
	Diámetro de la esfera			
	<i>D</i> = 1	<i>D</i> = 2,5	<i>D</i> = 5	<i>D</i> = 10
0,2	0,08			
0,3	0,18			
0,4	0,33			
0,5	0,54			
0,6	0,8	0,29		
0,7		0,4		
0,8		0,53		
0,9		0,67		
1		0,83		
1,1		1,02		
1,2		1,23	0,58	
1,3		1,46	0,69	
1,4		1,72	0,8	
1,5		2	0,92	
1,6			1,05	
1,7			1,19	
1,8			1,34	
1,9			1,5	
2			1,67	
2,2			2,04	
2,4			2,46	1,17
2,6			2,92	1,38
2,8			3,43	1,6
3			4	1,84
3,2				2,1
3,4				2,38
3,6				2,68
3,8				3
4				3,34
4,2				3,7
4,4				4,08
4,6				4,48
4,8				4,91
5				5,36
5,2				5,83
5,4				6,33
5,6				6,86
5,8				7,42
6				8

Tabla A 3 Relación carga-diámetro para distintos materiales metálicos

<b>Material</b>	<b>Dureza Brinell HBW</b>	<b>Relación carga-diámetro</b> $0,102 \times F/D^2$ <b>N/mm<sup>2</sup></b>
Aleaciones acero – níquel Aleaciones de titanio		30
Hierro fundido <sup>a</sup>	< 140	10
	≥ 140	30
Cobre y aleaciones de cobre	< 35	5
	35 a 200	10
	> 200	30
Metales ligeros y sus aleaciones	< 35	2,5
		5
	35 a 80	10
		15
	> 80	10
		15
Plomo, estaño		1
Metales sinterizados	Véase la Norma ISO 4498-1	

a En ensayos de hierro fundido el diámetro nominal de la esfera debe ser 2,5 mm, 5 mm ó 10 mm.

## ANEXO B: Mediciones en el Microscopio Leica

- 1 Escoger la lente de 10x para medición de la huella (Fig. B 1).

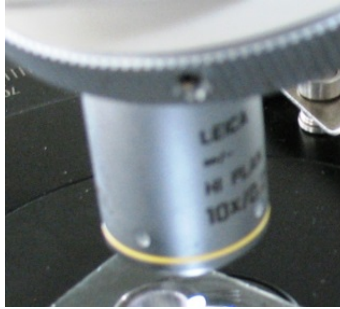


Figura B 1 Lente de 10x

- 2 Colocar la muestra sobre una porta muestras y llevarla a la platina del microscopio (Fig. B 2).



Figura B 2 Muestra colocado sobre una porta muestras en la platina del microscopio.

- 3 Visualizar la muestra mediante de la cámara del microscopio y el programa LAS V4.1.
- 4 Utilizando la luz direccional del microscopio dirigir el objetivo a la huella deseada (Fig. B 3)

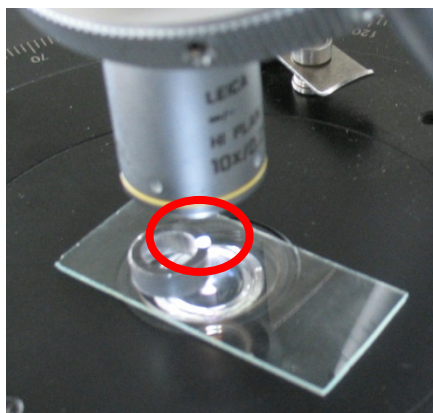


Figura B 3 Luz dirección del microscopio incidiendo en la huella deseada.

- 5 Acercar o alejar la muestra mediante los ajustes micrométricos y micrométricos del microscopio, hasta que se logre la nitidez de la imagen en la pantalla (Fig. B 4.)

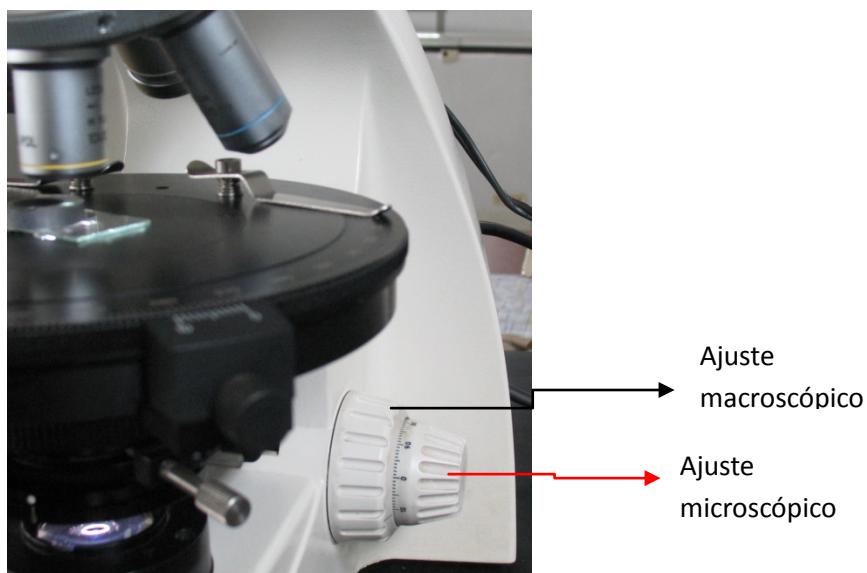


Figura B 4 Ajuste macroscópico y microscópico del microscopio.

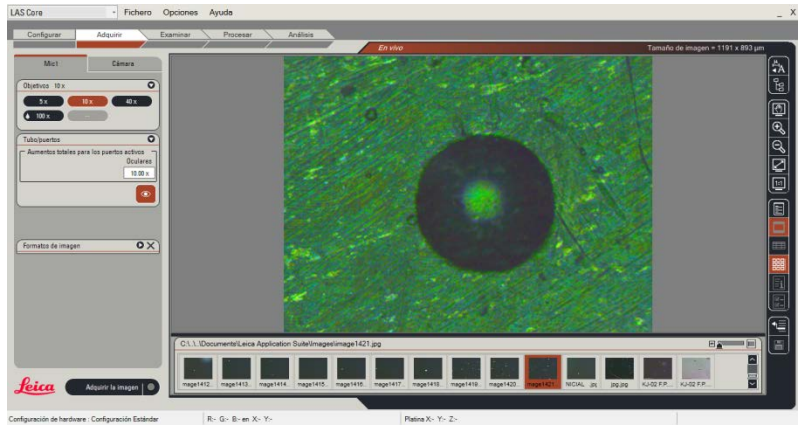


Figura B 5 Visualización de la huella en el programa LAS V4.1

6 Capturar la imagen utilizando el LAS V4.1. Esto se realiza en la pestaña “Adquirir”

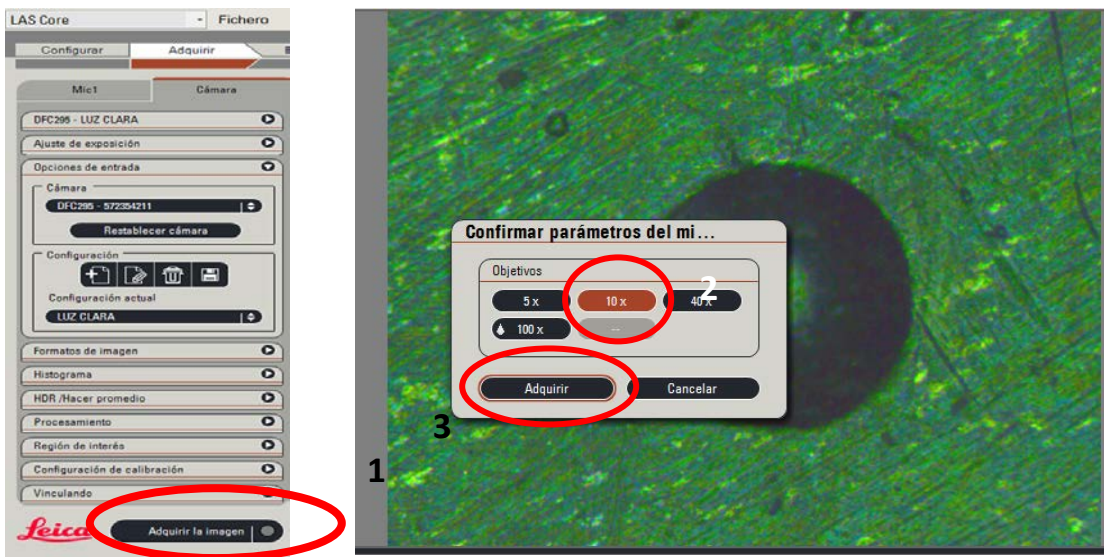


Figura B 6 Capturando la imagen utilizando el Programa LAS V4.1 del Microscopio Leica. Apretar “Adquirir Imagen” y luego confirmar apretando Objetivo “10x” y “Adquirir”

7 Colocar el nombre a la imagen adquirida. Esto se realiza en la pestaña en la pestaña “Examinar”



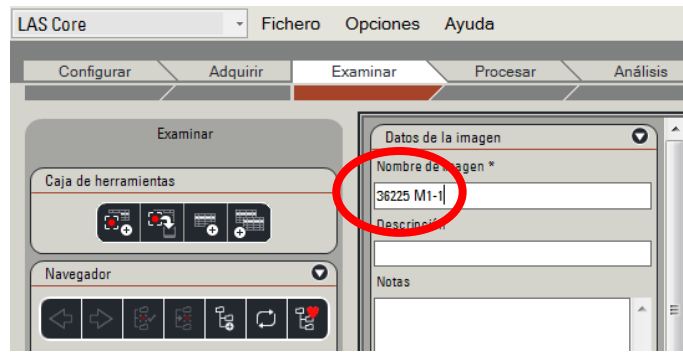
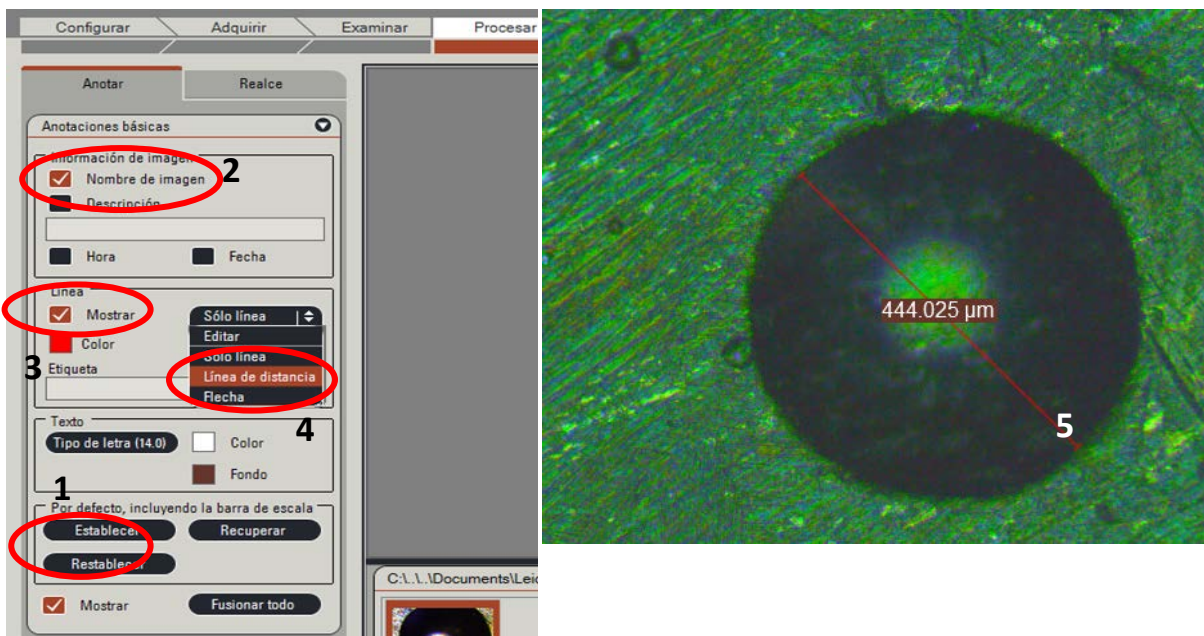


Figura B 7 Insertando el nombre de la imagen.

- 8 Medir el diámetro de la huella, utilizando la pestaña “Procesar” del programa LAS V4.1 del microscopio.



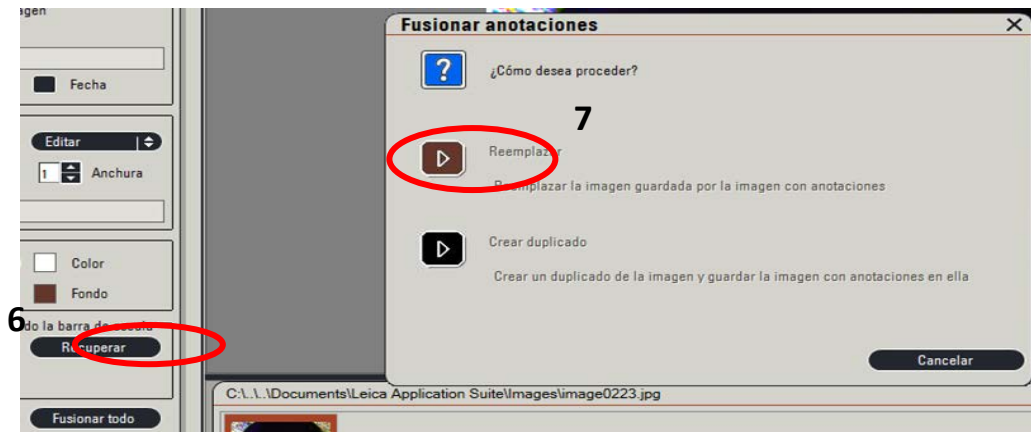


Figura B 8 Trazando línea de distancia y capturando imagen en el programa LAS V4.1 del microscopio LEICA

9 Trazar dos diámetros perpendiculares para determinar el diámetro promedio.

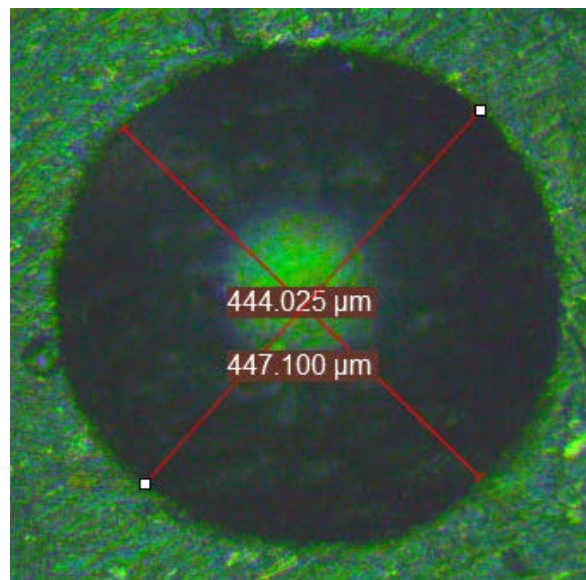


Figura B 9 Trazando 2 diámetros en la huella, utilizando el Programa LAS V4.1.

10 Registrar los valores.

## ANEXO C: Análisis de R&R en el MINITAB

1. Ingresar los valores como se observa en la Fig. C 1:

↓	C1	C2	C3
	Parte	Operador	Medición
1	1	1	4.63
2	1	1	4.61
3	2	1	5.48
4	2	1	5.41
5	3	1	4.81
6	3	1	4.84
7	4	1	5.10
8	4	1	5.05
9	5	1	4.72

Figura C 1 Ordenamiento de los valores de parte (muestra), operador y medición.

2. Ir a la barra de Estadísticas -> Herramientas de Control de Calidad -> Estudio de Sistema de Medición -> Estudio de R&R del sistema de medición (cruzado) (Fig. C.2)

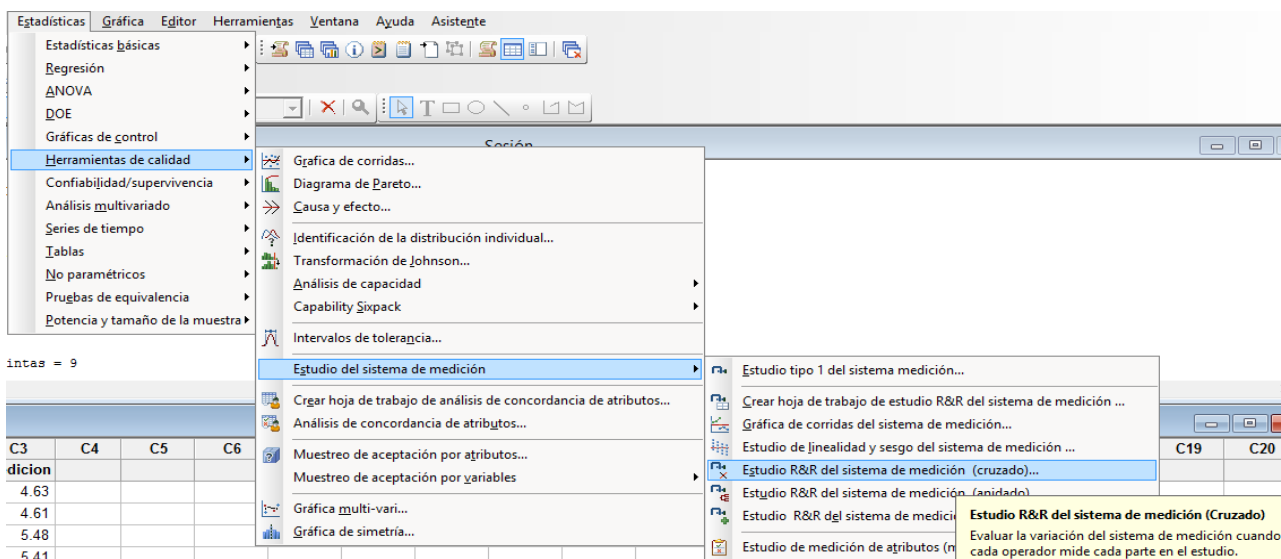


Figura C 2 Ruta para realizar análisis de R&R en Minitab.

3. Se muestra el siguiente cuadro:

Estudio R&R del sistema de medición (cruzado)

C1 Parte	Números de parte:	Parte	Información del sistema de medición...
C2 Operador	Operadores:	Operador	Opciones...
C3 Medicion	Datos de medición:	Medicion	Int. de conf...

Método de análisis

ANOVA

Xbarra y R

Selecionar

Ayuda

Aceptar

Cancelar

Almacenamiento...

Figura C 3 Cuadro de R&R – Minitab.

4. Dar a aceptar y se muestran las tablas de resultados y los gráficos.

## **ANEXO D: Documentación Utilizada**

A continuación se muestra la Norma UNE EN-ISO 6506-1 “Ensayo de Dureza Brinell utilizada para implementar el presente trabajo, así como los Informes de calibración de la balanza electrónica, el indentador y las pesas utilizadas:

## N° 605-ICF-2014

Fecha de Emisión	2014-12-27
Solicitante	FAMESA EXPLOSIVOS SAC
Instrumento de Medición	BALANZA
Marca	CAMRY
Modelo	EK5350
Tipo	ELECTRÓNICA
Identificación	KE-M6-004
Número de Serie	C12020217731
Ubicación	LABORATORIO DE METROLOGÍA
Alcance de Indicación	5 kg
División de Escala	1 g
División de verificación de escala ( e )	1 g
Procedencia	CHINA
Clase de exactitud	III
Fecha de Calibración	2014-12-20

La incertidumbre reportada en el presente informe es la incertidumbre expandida de medición que resulta de multiplicar la incertidumbre estándar por el factor de cobertura  $k=2$ . La incertidumbre fue determinada según la "Guía para la expresión de la incertidumbre en la medición".

Generalmente, el valor de la magnitud está dentro del intervalo de los valores determinados con la incertidumbre expandida con una probabilidad de aproximadamente 95 %.

La periodicidad de la calibración depende del uso mantenimiento y conservación del instrumento de medición.

**Método de Calibración**

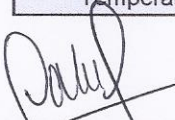
Según el "Procedimiento Para la Calibración de Balanzas de Funcionamiento no Automático Clase III y IIII" - PC-001, 3ra Edición - Enero 2009, del Servicio Nacional de Metrología SNM – INDECOPI.


**Lugar de Calibración**

Laboratorio de Metrología - Control de Calidad, de FAMESA EXPLOSIVOS SAC.

**Condiciones Ambientales**

	Inicial	Final
Temperatura ( °C )	22,1	22,5

  
\_\_\_\_\_  
Jefe de Control de Calidad

  
\_\_\_\_\_  
Jefe de Metrología



**N° 605-ICF-2014**
**Patrones de referencia**

Trazabilidad	Patrón utilizado	Certificado de calibración
Patrones de referencia del SNM-INDECOPI	Pesas patrones de 100 mg a 2 kg (Clase de exactitud M2)	FAMESA EXPLOSIVOS SAC 329-ICF-2014
Patrones de referencia del SNM-INDECOPI	Pesa patrón de 5 kg (Clase de exactitud M2)	FAMESA EXPLOSIVOS SAC 542-ICF-2014
Patrones de referencia del SNM-INDECOPI	Termohigrómetro patrón de resolución 0,1 °C / 1 %HR	FAMESA EXPLOSIVOS SAC 207-ICF-2013

**Observaciones**

Los errores máximos permitidos (e.m.p.) para esta balanza corresponden a los e.m.p., según la Norma Metroológica Peruana 003 - "Instrumentos de pesaje de funcionamiento no automático"

**Los resultados obtenidos en la calibración de la balanza son conformes.**

Con fines de identificación se colocó una etiqueta autoadhesiva, el cual hace referencia al número del presente informe de calibración.

Verificar la indicación de cero y la nivelación de la balanza antes de cada medición.

**RESULTADOS**

<b>Fecha de Calibración :</b>	2014-12-20
-------------------------------	------------

**INSPECCION VISUAL**

<b>Ajuste de Cero</b>	TIENE
<b>Oscilación Libre</b>	NO TIENE
<b>Plataforma</b>	TIENE
<b>Sistema de Traba</b>	NO TIENE

<b>Escala</b>	NO TIENE
<b>Cursor</b>	NO TIENE
<b>Nivelación</b>	NO TIENE

**ENSAYO DE REPETIBILIDAD**

Temp (°C)

<b>Inicial</b>	<b>Final</b>
22,1	22,2

N° de Evento	Carga (g)	I (g)	ΔL (mg)	E (mg)
1	2 500	2 500	800	-300
2		2 500	800	-300
3		2 500	800	-300
4		2 500	800	-300
5		2 500	800	-300
6		2 500	800	-300
7		2 500	800	-300
8		2 500	800	-300
9		2 500	800	-300
10		2 500	800	-300
<b>E. Máx. - E. Mín.</b>			0	mg
<b>e.m.p</b>			± 3 000	mg

N° de Evento	Carga (g)	I (g)	ΔL (mg)	E (mg)
1	5 000	5 002	900	1 600
2		5 002	900	1 600
3		5 002	900	1 600
4		5 002	900	1 600
5		5 002	900	1 600
6		5 002	900	1 600
7		5 002	900	1 600
8		5 002	900	1 600
9		5 002	900	1 600
10		5 002	900	1 600
<b>E. Máx. - E. Mín.</b>			0	mg
<b>e.m.p</b>			± 3 000	mg

SEGUIMIENTO Y MEDICIÓN / METROLOGÍA

FAMESA EXPLOSIVOS S.A.C.

Telf.: 61-39800 Anexo 526; e-mail: vpintado@famesa.com.pe, dtguillen@famesa.com.pe

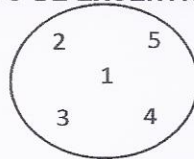



Nº 605-ICF-2014

**RESULTADOS**
**ENSAYO DE PESAJE**

Temp (°C)	Inicial	Final
	22,3	22,3

Nº de Evento	Carga (g)	Prueba de Ascenso				Prueba de Descenso				e.m.p. (±mg)
		I (g)	ΔL (mg)	E (mg)	Ec (mg)	I (g)	ΔL (mg)	E (mg)	Ec (mg)	
1	10	10	500	0,0						
2	50	50	600	-100,0	-100	50	500	0	0	1 000
3	100	100	600	-100,0	-100	100	500	0	0	1 000
4	500	500	600	-100,0	-100	500	600	-100	-100	1 000
5	1 000	1 000	700	-200,0	-200	1 000	600	-100	-100	2 000
6	1 500	1 500	600	-100,0	-100	1 500	600	-100	-100	2 000
7	2 000	2 001	800	700,0	700	2 001	700	800	800	2 000
8	2 500	2 501	800	700,0	700	2 501	700	800	800	3 000
9	3 000	3 001	900	600,0	600	3 001	800	700	700	3 000
10	4 000	4 002	900	1 600,0	1 600	4 002	900	1 600	1 600	3 000
11	5 000	5 002	900	1 600,0	1 600	5 002	900	1 600	1 600	3 000

**ENSAYO DE EXCENTRICIDAD**


VISTA FRONTAL

Temp (°C)	Inicial	Final
	22,4	22,5

Ubic.de Carga	Determinación del Error Inicial Eo				Determinación del Error Corregido Ec				e.m.p. (±mg)	
	Carga (g)	I (g)	ΔL (mg)	Eo (mg)	Carga (g)	I (g)	ΔL (mg)	E (mg)		Ec (mg)
1	10	10,0	500	0	1 700	1 701	600	900	900	2 000
2		10,0	600	-100		1 700	500	0	100	
3		10,0	500	0		1 701	600	900	900	
4		10,0	600	-100		1 700	500	0	100	
5		10,0	500	0		1 700	500	0	0	

Donde : e.m.p. Error Máximo Permitido para Balanzas de Funcionamiento No Automático Con Clase de Exactitud III

I Lectura o Indicación de la Balanza

ΔL Carga Añadida

E Error Encontrado

Eo Error en Cero

Ec Error Corregido

Lectura Corregida :  $I_{\text{corregida}} (g) = I - 2,99E-04 \times I$

Incertidumbre de Medición:  $U_{I(g)} = \pm 2 \times \sqrt{1,68E-01 + 2,34E-08 \times I^2}$





## N° 610-ICF-2014

Fecha de Emisión **2015-12-27**

Solicitante **FAMESA EXPLOSIVOS SAC**

Instrumento de Medición **PESAS**

Valor Nominal **20 g y 200 g (04 u)**

Clase de Exactitud **M2**

Marca **NO INDICA**

Procedencia **NO INDICA**

Cantidad **05**

Identificación **LM-139**

Ubicación **LABORATORIO DE METROLOGÍA**

Fecha de Calibración **2015-12-22**

La incertidumbre reportada en el presente informe es la incertidumbre expandida de medición que resulta de multiplicar la incertidumbre estándar por el factor de cobertura  $k=2$ . La incertidumbre fue determinada según la "Guía para la expresión de la incertidumbre en la medición".

Generalmente, el valor de la magnitud está dentro del intervalo de los valores determinados con la incertidumbre expandida con una probabilidad de aproximadamente 95 %.

La periodicidad de la calibración depende del uso mantenimiento y conservación del instrumento de medición.

**Método de Calibración**

Según el "Procedimiento Para la Calibración de Pesas de Trabajo Clases M2, M2-3 Y M3"- PC-008, 2da Edición - Enero 2009, del Servicio Nacional de Metrología SNM – INDECOPI.

**Lugar de Calibración**

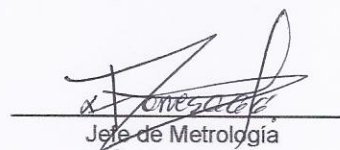
Laboratorio de Metrología- Control de Calidad, de FAMESA EXPLOSIVOS SAC

**Condiciones Ambientales**

	Inicial	Final
Temperatura ( °C )	20,3	20,9



Jefe de Control de Calidad



Jefe de Metrología



**N° 610-ICF-2014**
**Patrones de referencia**

Trazabilidad	Patrón utilizado	Certificado de calibración
Patrones de referencia del SNM-INDECOPI	Pesas patrones 1 mg a 1 kg (Clase F1)	SNM-INDECOPI LM-542-2014
Patrones de referencia del SNM-INDECOPI	Balanza Electrónica de resolución 0,01 mg	QUIMICA SUIZA INDUSTRIAL M0249-2014
Patrones de referencia del SNM-INDECOPI	Termohigrómetro patrón de resolución 0,1 °C / 1 %HR	FAMESA EXPLOSIVOS SAC 207-ICF-2013

**Observaciones**

Los errores máximos permitidos (e.m.p.) para estas pesas corresponden a los e.m.p., para Pesas de las Clases E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 Y M3, según la Norma Metrológica Peruana 004.

**Los resultados obtenidos en la calibración de las pesas, son conformes.**

Con fines de identificación se colocó en el estuche que contiene las pesas una etiqueta autoadhesiva, el cual hace referencia al número del presente informe de calibración.

**RESULTADOS**

Identificación	Valor Nominal	Masa convencional	Incertidumbre	Forma	Material	Cavidad de ajuste	e.m.p M <sub>2</sub>
---	20 g	20 g - 0,4 mg	0,1 mg	Cilindrica	Acero	No tiene	8 mg
1	200 g	200 g + 18,4 mg	0,3 mg	Cilindrica	Acero	No tiene	30 mg
2	200 g	200 g + 20,0 mg	0,3 mg	Cilindrica	Acero	No tiene	30 mg
3	200 g	200 g + 23,0 mg	0,3 mg	Cilindrica	Acero	No tiene	30 mg
4	200 g	200 g + 23,0 mg	0,3 mg	Cilindrica	Acero	No tiene	30 mg




## N° 612-ICF-2014

Fecha de Emisión **2014-12-27**

Solicitante **FAMESA EXPLOSIVOS SAC**

Instrumento de Medición **INDENTADOR DE ACERO**

Valor Nominal **1 mm**

Marca **NO INDICA**

Identificación **LM-140**

Ubicación **LABORATORIO DE EMTROLOGÍA**

Procedencia **NO INDICA**

Cantidad **01**

Fecha de Calibración **2014-12-22**

La incertidumbre reportada en el presente informe es la incertidumbre expandida de medición que resulta de multiplicar la incertidumbre estándar por el factor de cobertura  $k=2$ . La incertidumbre fue determinada según la "Guía para la expresión de la incertidumbre en la medición".

Generalmente, el valor de la magnitud está dentro del intervalo de los valores determinados con la incertidumbre expandida con una probabilidad de aproximadamente 95 %.

La periodicidad de la calibración depende del uso mantenimiento y conservación del instrumento de medición.

**Método de Calibración**

Por comparación con un micrómetro patrón, tomando como referencia "Procedimiento de Calibración de Micrómetros de Exteriores" - PC-013, 2da Edición - Diciembre 2001, del Servicio Nacional de Metrología SNM – INDECOPI.

**Lugar de Calibración**

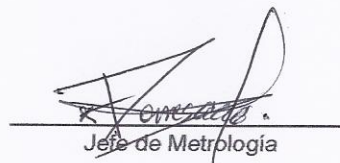
Laboratorio de Metrología - Control de Calidad, de FAMESA EXPLOSIVOS SAC.

**Condiciones Ambientales**

	Inicial	Final
Temperatura ( °C )	21,5	21,8
Humedad Relativa (%HR)	40	40



Jefe de Control de Calidad



Jefe de Metrología



**N° 612-ICF-2014**
**Patrones de referencia**

Trazabilidad	Patrón utilizado	Certificado de calibración
Patrones de referencia del SNM-INDECOPI	Micrómetro patrón, de resolución 0,001 mm	FAMESA EXPLOSIVOS SAC 301-ICF-2014
Patrones de referencia del SNM-INDECOPI	Termohigrómetro patrón de resolución 0,1 °C / 1 %HR	FAMESA EXPLOSIVOS SAC 207-ICF-2013

**Observaciones**

Con fines de identificación se colocó una etiqueta autoadhesiva, el cual hace referencia al número del presente informe de calibración.

Los resultados obtenidos en la calibración del indentador de acero son conformes.

**RESULTADOS**

Valor Nominal (mm)	Identificación	Material	Forma	Corrección (mm)	Incertidumbre ± (mm)
1,000	LM-140	Acero	Esferico	-0,003	0,001

**Valor Convencionalmente Verdadero = Valor Nominal + Corrección**

(\*) Se considera como tolerancia permitida  $\pm 3 \mu\text{m}$ , según el uso previsto para los bloques.