



Dan Beninson

Instituto de Tecnología Nuclear

**“Empleo del Sistema de Gestión de la Calidad para la determinación de la incertidumbre en la reducción de área de tubos laminados”**

**CARRERA: ESPECIALIZACIÓN EN REACTORES NUCLEARES  
Y SU CICLO DE COMBUSTIBLE**

Alumno: Ing. Gabriel A. Carus Zega  
Director: Mag. Ing. Hernán Garonis  
Co-director: Ing. Daniel R. Bianchi

Septiembre de 2015



UNSAM  
UNIVERSIDAD  
NACIONAL DE  
SAN MARTÍN

## ÍNDICE

### General

<b>0</b>	<b>Introducción</b>	<b>6</b>
0.1	Antecedentes	6
0.2	Objetivo General	6
0.3	Objetivos Específicos	6
<b>1</b>	<b>Modelo físico</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Modelo matemático</b>	<b>9</b>
<b>3</b>	<b>Identificación de las fuentes de incertidumbre</b>	<b>10</b>
3.1	Calibración del Instrumento	12
3.1.1	Micrómetro	12
3.1.2	Equipo de ultrasonidos	13
3.2	Resolución del instrumento	14
3.2.1	Micrómetro	14
3.2.2	Equipo de ultrasonidos	14
3.3	Estabilidad del instrumento	15
3.3.1	Micrómetro	15
3.3.2	Equipo de ultrasonidos	22
3.4	Repetibilidad y Reproducibilidad de operadores	23
3.4.1	Distribución rectangular	23
3.4.2	ANOVA	30
3.4.3	Norma ISO 5725-2	47
3.4.4	Norma ISO 13.528:2005	58
3.4.5	Estadística Robusta – Análisis de Caja y bigotes	65
3.4.6	Comparación de Métodos	67
3.5	Constante de dilatación térmica	70
3.5.1	$\varnothing$ Máx	70
3.5.2	$\varnothing$ mín	70
3.5.3	$\tau$ Máx	70
3.5.4	$\tau$ mín	71
3.6	Error de método	72
3.6.1	Reducción de Área Máxima	72
3.6.2	Reducción de Área mínima	73
3.6.3	Incertidumbre asociada al error del método	75
<b>4</b>	<b>Cuantificación de la incertidumbre combinada</b>	<b>76</b>
4.1	Cálculo de $u_{2\varnothing$ Máx	79
4.2	Cálculo de $u_{2\varnothing}$ mín	80
4.3	Cálculo de $u_{2\tau}$ Máx	80
4.4	Cálculo de $u_{2\tau}$ mín	81
4.5	Cálculo de $u_c$ y $y_2$	82
4.6	Cálculo de la incertidumbre combinada $u_c$	84
4.7	Cálculo de la incertidumbre expandida $U_p$	86
<b>5</b>	<b>Elementos del Sistema de Gestión de la Calidad</b>	<b>92</b>
5.1	Instrumentos	92

5.2	Producción .....	99
5.3	Gestión.....	101
<b>6</b>	<b>Análisis de los Resultados .....</b>	<b>108</b>
6.1	Especificación .....	108
<b>7</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>110</b>
7.1	Perspectiva Metrológica .....	110
7.2	Perspectiva de la Gestión de la Calidad.....	110
<b>8</b>	<b>Anexo I – Estudio para el caso de la especificación de diámetros .....</b>	<b>112</b>
8.1	Diámetro Máximo .....	112
8.2	Diámetro mínimo.....	112
<b>9</b>	<b>Anexo II – Estudio para el caso de la especificación de espesor .....</b>	<b>114</b>
9.1	Espesor Máximo .....	114
9.2	Espesor mínimo .....	114
<b>10</b>	<b>Bibliografía .....</b>	<b>116</b>

#### **Tablas**

Tabla 1-	Mediciones originales de verificación de micrómetro.....	15
Tabla 2 -	Mediciones empleadas para límites de carta de control .....	15
Tabla 3 -	Valores para gráfico Rankit de carta de control de micrómetro .....	17
Tabla 4 -	Valores de Media y Rango para carta de control de micrómetro .....	18
Tabla 5 -	Mediciones originales de diámetros máximos por operador .....	23
Tabla 6 -	Probabilidades asociadas a la función F de Diámetros Máximos .....	24
Tabla 7 -	Mediciones originales de diámetros mínimos por operador .....	25
Tabla 8 -	Probabilidades asociadas a la función F de diámetros mínimos .....	25
Tabla 9 -	Mediciones originales de espesores máximos por operador .....	27
Tabla 10 -	Probabilidades asociadas a la función F de espesores máximos .....	27
Tabla 11 -	Mediciones originales de espesores mínimos por operador .....	28
Tabla 12 -	Probabilidades asociadas a la función F de espesores mínimos.....	29
Tabla 13 -	Valores de Operador 1 - Diámetro Máximo para Rankit .....	30
Tabla 14 -	Valores de Operador 2 - Diámetro Máximo para Rankit .....	31
Tabla 15-	Valores de Operador 3 - Diámetro Máximo para Rankit .....	31
Tabla 16 -	Valores de Operador 4 - Diámetro Máximo para Rankit .....	32
Tabla 17 -	Valores de Operador 5 - Diámetro Máximo para Rankit .....	33
Tabla 18 -	Valores de Operador 6 - Diámetro Máximo para Rankit .....	33
Tabla 19 -	Valores de Operador 1 - Diámetro mínimo para Rankit.....	35
Tabla 20 -	Valores de Operador 2 - Diámetro mínimo para Rankit.....	36
Tabla 21-	Valores de Operador 3 - Diámetro mínimo para Rankit.....	36
Tabla 22 -	Valores de Operador 4 - Diámetro mínimo para Rankit.....	37
Tabla 23 -	Valores de Operador 5 - Diámetro mínimo para Rankit.....	38
Tabla 24 -	Valores de Operador 6 - Diámetro mínimo para Rankit.....	38
Tabla 25 -	Valores de Operador 1 - Espesor Máximo para Rankit.....	40
Tabla 26 -	Valores de Operador 2 - Espesor Máximo para Rankit.....	40
Tabla 27 -	Valores de Operador 3 - Espesor Máximo para Rankit.....	41
Tabla 28 -	Valores de Operador 4 - Espesor Máximo para Rankit.....	42
Tabla 29 -	Valores de Operador 1 - Espesor mínimo para Rankit .....	43
Tabla 30 -	Valores de Operador 2 - Espesor mínimo para Rankit .....	44
Tabla 31 -	Valores de Operador 3 - Espesor mínimo para Rankit .....	44
Tabla 32 -	Valores de Operador 4 - Espesor mínimo para Rankit .....	45
Tabla 33 –	Media de Operadores.....	47
Tabla 34 –	Desvío estándar de operadores.....	47
Tabla 35 -	$h_{ij}$ de operadores .....	48

Tabla 36 - $k_{ij}$ de Operadores.....	49
Tabla 37 - $h_{ij}$ filtrado .....	50
Tabla 38 - $k_{ij}$ filtrado.....	51
Tabla 39 – Test de Cochran de la totalidad de las mediciones.....	52
Tabla 40 - Test de Cochran de mediciones filtradas.....	52
Tabla 41 - Test de Cochran de mediciones filtradas II.....	52
Tabla 42 – Valores medios sin outliers de diámetros .....	54
Tabla 43 – Desvíos estándar sin outliers de diámetros .....	54
Tabla 44 - Media general de diámetros .....	54
Tabla 45 – Repetibilidad de diámetros .....	54
Tabla 46 - Reproducibilidad de diámetros .....	55
Tabla 47- Valores medios sin outliers de espesores .....	55
Tabla 48 – Desvíos estándar sin outliers de espesores .....	55
Tabla 49 – Media general de diámetros .....	56
Tabla 50 - Repetibilidad de espesores .....	56
Tabla 51 – Reproducibilidad de espesores.....	56
Tabla 52 – Algoritmo iterativo para Diámetro Máximo .....	60
Tabla 53 – Valores de $z'$ para Diámetro Máximo.....	60
Tabla 54- Algoritmo iterativo para Diámetro mínimo.....	61
Tabla 55 – Valores de $z'$ para Diámetro mínimo .....	62
Tabla 56 – Algoritmo iterativo para Espesor Máximo .....	62
Tabla 57– Valores de $z'$ para Espesor Máximo .....	63
Tabla 58 – Algoritmo iterativo para Espesor mínimo .....	63
Tabla 59– Valores de $z'$ para Espesor mínimo.....	64
Tabla 60 - Resumen de fuentes de incertidumbre del Diámetro Máximo .....	87
Tabla 61- Resumen de fuentes de incertidumbre del Diámetro mínimo .....	88
Tabla 62 - Resumen de fuentes de incertidumbre del Espesor Máximo.....	89
Tabla 63 - Resumen de fuentes de incertidumbre del Espesor mínimo.....	90
Tabla 64 - Resumen de fuentes de incertidumbre de la Reducción de Área .....	91

## Figuras

Figura 1 - Esquema genérico de tubo .....	7
Figura 2 – Esquema de mediciones de tubo laminado .....	8
Figura 3 - Corte de tubo laminado .....	8
Figura 4 – Espina de pescado de fuentes de incertidumbre .....	11
Figura 5 – Test de Ryan-Joiner de carta de control.....	16
Figura 6 – Test de Anderson-Darling de carta de control .....	16
Figura 7 - Rankit Carta de Control.....	17
Figura 8 – Carta de Control: Gráfico de valores medidos .....	19
Figura 9 – Carta de Control: Gráfico de rangos .....	20
Figura 10 – Controles para Carta de Control en Minitab ®.....	20
Figura 11 – Carta de Control generada con Minitab ® .....	21
Figura 12 – Carta de Control con todos los valores registrados .....	22
Figura 13 – Gráfico de Intervalos medidos para Diámetro Máximo .....	24
Figura 14 - Gráfico de Intervalos medidos para Diámetro mínimo.....	26
Figura 15 - Gráfico de Intervalos medidos para Espesor Máximo .....	27
Figura 16 - Gráfico de Intervalos medidos para Espesor mínimo .....	29
Figura 17 – Ryan-Joiner y Rankit de Operador 1 - Diámetro Máximo .....	30
Figura 18 – Ryan-Joiner y Rankit de Operador 2 - Diámetro Máximo .....	31
Figura 19 – Ryan-Joiner y Rankit de Operador 3 - Diámetro Máximo .....	32
Figura 20 – Ryan-Joiner y Rankit de Operador 4 - Diámetro Máximo .....	32
Figura 21 – Ryan-Joiner y Rankit de Operador 5 - Diámetro Máximo .....	33
Figura 22 – Ryan-Joiner y Rankit de Operador 6 - Diámetro Máximo .....	33
Figura 23 – Ryan-Joiner y Rankit de Operador 1 - Diámetro mínimo .....	35
Figura 24 – Ryan-Joiner y Rankit de Operador 2 - Diámetro mínimo .....	36
Figura 25 – Ryan-Joiner y Rankit de Operador 3 - Diámetro mínimo .....	37
Figura 26 – Ryan-Joiner y Rankit de Operador 4 - Diámetro mínimo .....	37

Figura 27 – Ryan-Joiner y Rankit de Operador 5 - Diámetro mínimo .....	38
Figura 28 – Ryan-Joiner y Rankit de Operador 6 - Diámetro mínimo .....	38
Figura 29 – Ryan-Joiner y Rankit de Operador 1 - Espesor Máximo.....	40
Figura 30 – Ryan-Joiner y Rankit de Operador 2 - Espesor Máximo.....	41
Figura 31 – Ryan-Joiner y Rankit de Operador 3 - Espesor Máximo.....	41
Figura 32 – Ryan-Joiner y Rankit de Operador 4 - Espesor Máximo.....	42
Figura 33 – Ryan-Joiner y Rankit de Operador 1 - Espesor mínimo.....	43
Figura 34 – Ryan-Joiner y Rankit de Operador 2 - Espesor mínimo.....	44
Figura 35 – Ryan-Joiner y Rankit de Operador 3 - Espesor mínimo.....	45
Figura 36 – Ryan-Joiner y Rankit de Operador 4 - Espesor mínimo.....	45
Figura 37- Gráfico de $h_{ij}$ .....	48
Figura 38- Gráfico de $k_{ij}$ .....	49
Figura 39- Gráfico de $h_{ij}$ .....	50
Figura 40- Gráfico de $k_{ij}$ (filtrado) .....	51
Figura 41- $z'$ de Diámetro Máximo .....	61
Figura 42 - $z'$ de Diámetro mínimo .....	62
Figura 43- $z'$ de Espesor Máximo.....	63
Figura 44 - - $z'$ de Espesor mínimo .....	64
Figura 45 – Diagrama de Caja y Bigotes: Diámetro Máximo .....	65
Figura 46 – Diagrama de Caja y Bigotes: Diámetro mínimo.....	65
Figura 47 – Diagrama de Caja y Bigotes: Espesor Máximo.....	66
Figura 48 – Diagrama de Caja y Bigotes: Espesor mínimo .....	66
Figura 49 -Rankit Reducción de Área: Máximo- Promedio.....	72
Figura 50 - Rankit Reducción de Área: Máximo- Promedio (filtrado).....	73
Figura 51 - Error de método en Reducción de Área: Máximo- Promedio .....	73
Figura 52 Rankit Reducción de Área: Promedio - mínimo.....	74
Figura 53 - Rankit Reducción de Área: Promedio – mínimo (filtrado).....	74
Figura 54 - Error de método en Reducción de Área: Promedio - mínimo .....	75
Figura 55 - Contribución % a la varianza del Diámetro Máximo .....	79
Figura 56 - Contribución % a la varianza del Diámetro mínimo .....	80
Figura 57- Contribución % a la varianza del Espesor Máximo.....	81
Figura 58- Contribución % a la varianza del Espesor mínimo .....	82
Figura 59 - Contribución % a la varianza de la Medición de la Reducción de Área .....	83
Figura 60 - Contribución % de las fuentes de incertidumbre a la varianza de la Medición de la Reducción de Área.....	83
Figura 61 - Contribución % a la varianza de la Reducción de Área .....	84
Figura 62 - Contribución % a la varianza de la Reducción de Área (desarrollada) .....	85
Figura 63 - Contribución % de las fuentes de incertidumbre a la varianza de la Medición .....	85
Figura 64 - Reducción de área: Especificación vs. Incertidumbre expandida .....	108
Figura 65 - Diámetro Máximo: Especificación vs. Incertidumbre expandida .....	112
Figura 66 - Diámetro mínimo: Especificación vs. Incertidumbre expandida.....	113
Figura 67 – Espesor Máximo: Especificación vs. Incertidumbre expandida .....	114
Figura 68 - Espesor mínimo: Especificación vs. Incertidumbre expandida .....	115

## **0 Introducción**

### **0.1 Antecedentes**

Un requisito de la norma IRAM-ISO 9001:2008 [9] establece que se debe “determinar el seguimiento y la medición a realizar y los equipos de seguimiento y medición necesarios para proporcionar la evidencia de la conformidad del producto con los requisitos determinados”. Asimismo es necesario “establecer procesos para asegurarse de que el seguimiento y medición pueden realizarse y se realizan de una manera coherente con los requisitos”

En la Planta Piloto de Fabricación de Aleaciones Especiales (PPFAE) al momento de aceptar los requisitos establecidos por el cliente para realizar la laminación de un lote de tubos de aleación de circonio, en base a la experiencia de trabajos anteriores, se definieron las condiciones y el equipamiento para realizar el seguimiento y la medición del producto.

En este trabajo se emplearán los elementos provistos por el Sistema de Gestión de la Calidad para confirmar, con datos empíricos, si el seguimiento se realizó de manera eficaz.

### **0.2 Objetivo General**

El objetivo de este trabajo es emplear los elementos provistos por un Sistema de Gestión de la Calidad para verificar que la incertidumbre asociada a la determinación de reducción de área de tubos laminados permite cumplir con la especificación del cliente.

### **0.3 Objetivos Específicos**

Los siguientes conceptos conforman los objetivos específicos que tendrá el presente trabajo:

- Calcular la incertidumbre asociada a la determinación de la reducción de área de tubos laminados
- Poner de manifiesto las distintas partes del Sistema de Gestión de la Calidad que permiten realizar el cálculo de la incertidumbre de la medición de manera eficaz
- Verificar la concordancia entre los valores calculados y la especificación del cliente
- Extraer conclusiones, tanto desde el punto de vista metrológico, como desde la Gestión de la Calidad

## 1 Modelo físico

En este trabajo se determinará la incertidumbre asociada a la determinación de la Reducción de Área asociada a un tubo de aleación de circonio al cual se la ha realizado un proceso de laminación.

El proceso de laminación, en lo que concierne a este trabajo, a partir de un tubo inicial (“extrudado”), solo produce una modificación dimensional reduciendo sus diámetros y espesores de acuerdo a la especificaciones del producto (“tubo laminado”). Estas modificaciones se ven reflejadas en una modificación del área entre el tubo extrudado y el laminado.

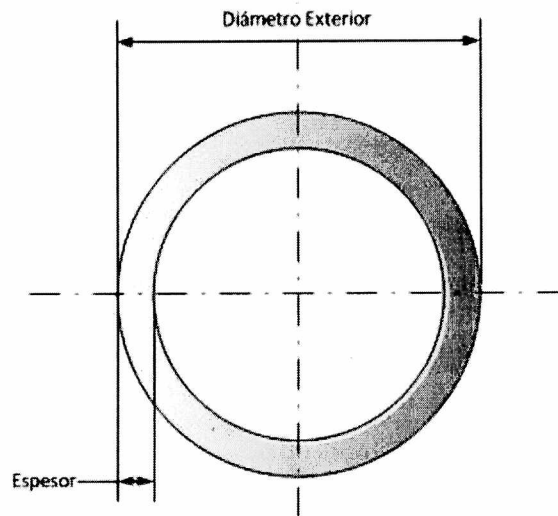


Figura 1 - Esquema genérico de tubo

$$\begin{aligned} \text{Área} &= \pi * \left[ \left( \frac{\text{Diámetro Exterior}}{2} \right)^2 - \left( \frac{\text{Diámetro Exterior}}{2} - \text{Espesor} \right)^2 \right] \\ \text{Área} &= \pi * \left[ \left( \frac{\text{Diámetro Exterior}}{2} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. - \left[ \left( \frac{\text{Diámetro Exterior}}{2} \right)^2 - 2 * \frac{\text{Diámetro Exterior}}{2} * \text{Espesor} + \text{Espesor}^2 \right] \right] \\ \text{Área} &= \pi * \left[ \left( \frac{\text{Diámetro Exterior}}{2} \right)^2 - \left( \frac{\text{Diámetro Exterior}}{2} \right)^2 + \text{Diámetro Exterior} * \text{Espesor} \right. \\ &\quad \left. - \text{Espesor}^2 \right] \\ \text{Área} &= \pi * [\text{Diámetro Exterior} * \text{Espesor} - \text{Espesor}^2] \end{aligned}$$

La Reducción de Área especificada por el cliente establece los valores admitidos para la modificación (reducción) porcentual entre el área del tubo extrudado y el área del tubo laminado. El método de medición contempla determinar los diámetros y espesores del tubo laminado en aproximadamente 10 posiciones del tubo

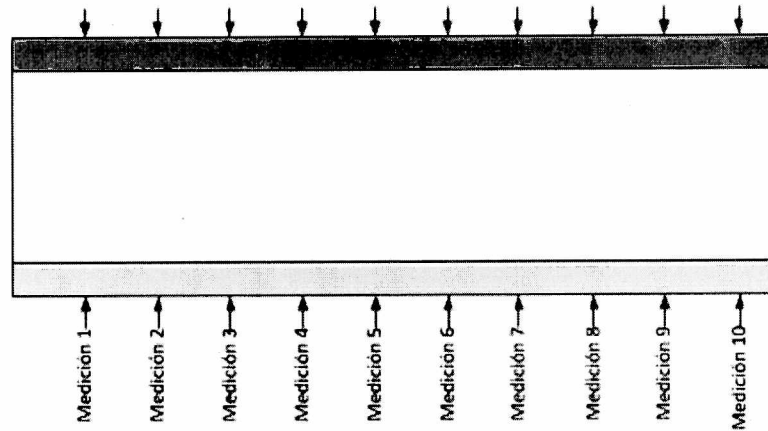


Figura 2 – Esquema de mediciones de tubo laminado

Dadas las características propias del proceso productivo, el tubo producido no será perfectamente circular, sino que tendrá una leve ovalidad. En función de ello, el método de medición establecido contempla, en cada posición de medición, realizar cuatro mediciones ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  y  $135^\circ$ ), a partir de las cuales se determinarán espesores y diámetros máximos y mínimos:

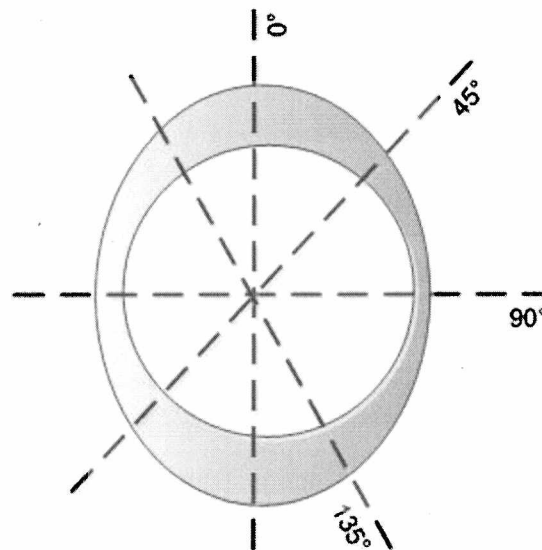


Figura 3 - Corte de tubo laminado

## 2 Modelo matemático

Definición del Mensurando:

El mensurando “Reducción de área” (y) se determina a partir de las magnitudes Diámetro Exterior Inicial del Tubo Extrudado, Diámetro Exterior Final del Tubo Laminado, Espesor Inicial del Tubo Extrudado y Espesor Final del Tubo Laminado según la siguiente fórmula:

$$y = 100 * \left( \frac{\text{Área inicial} - \text{Área Final}}{\text{Área inicial}} \right) = 100 * \left( \frac{(\tau_i \phi_i - \tau_i^2) - (\tau_f \phi_f - \tau_f^2)}{\tau_i \phi_i - \tau_i^2} \right)$$

$$y = 100 * \left( 1 - \frac{\tau_f (\phi_f - \tau_f)}{\tau_i (\phi_i - \tau_i)} \right) = 100 * \left( 1 - \frac{\tau_f \phi_f - \tau_f^2}{\tau_i \phi_i - \tau_i^2} \right)$$

$\phi_i$ : Diámetro Exterior Inicial del Tubo Extrudado.

$\phi_f$ : Diámetro Exterior Final del Tubo Laminado.

$\tau_i$ : Espesor Inicial del Tubo Extrudado.

$\tau_f$ : Espesor Final del Tubo Laminado.

Siendo

$$\phi_f = \frac{\phi_{Máx} + \phi_{mín}}{2}$$
$$\tau_f = \frac{\tau_{Máx} + \tau_{mín}}{2}$$

Dado que los valores de  $\phi_i$  y  $\tau_i$  son provistos por el cliente, se asumirá que las incertidumbres ( $u$ ) asociadas a estas mediciones son iguales a las incertidumbres de las mediciones realizadas en el tubo laminado, por lo tanto:

$$u(\phi_i) = u(\phi_f) \quad \text{y}$$
$$u(\tau_i) = u(\tau_f)$$

Las magnitudes de entrada que influyen en la determinación del mensurando son las asociadas a la medición de los diámetros y espesores, siendo ellas:

- Diámetros medidos.
- Espesores medidos
- temperatura de medición

### **3 Identificación de las fuentes de incertidumbre**

Dado que la determinación de la temperatura al momento de la medición no forma parte del proceso de medición, se la incorporará como una fuente de incertidumbre junto con las propias de la medición del diámetro y el espesor, a saber:

- Instrumento
  - o Resolución del instrumento
  - o Calibración del instrumento
  - o Estabilidad del instrumento, en caso de corresponder
- Operadores
  - o Repetibilidad de un operador
  - o Reproducibilidad de los operadores

Por otra parte, y dada las características del método de medición (informar un valor de reducción de área promedio por tubo laminado), se incorpora como fuente de incertidumbre el valor asociado a las distintas reducciones de área que se presentan en todas las posiciones de medición ("error del método de medición").

Estas magnitudes se consideran no correlacionadas y por lo tanto la incertidumbre estándar combinada se calcula según 5.1.2 de la norma IRAM 35050 [8].

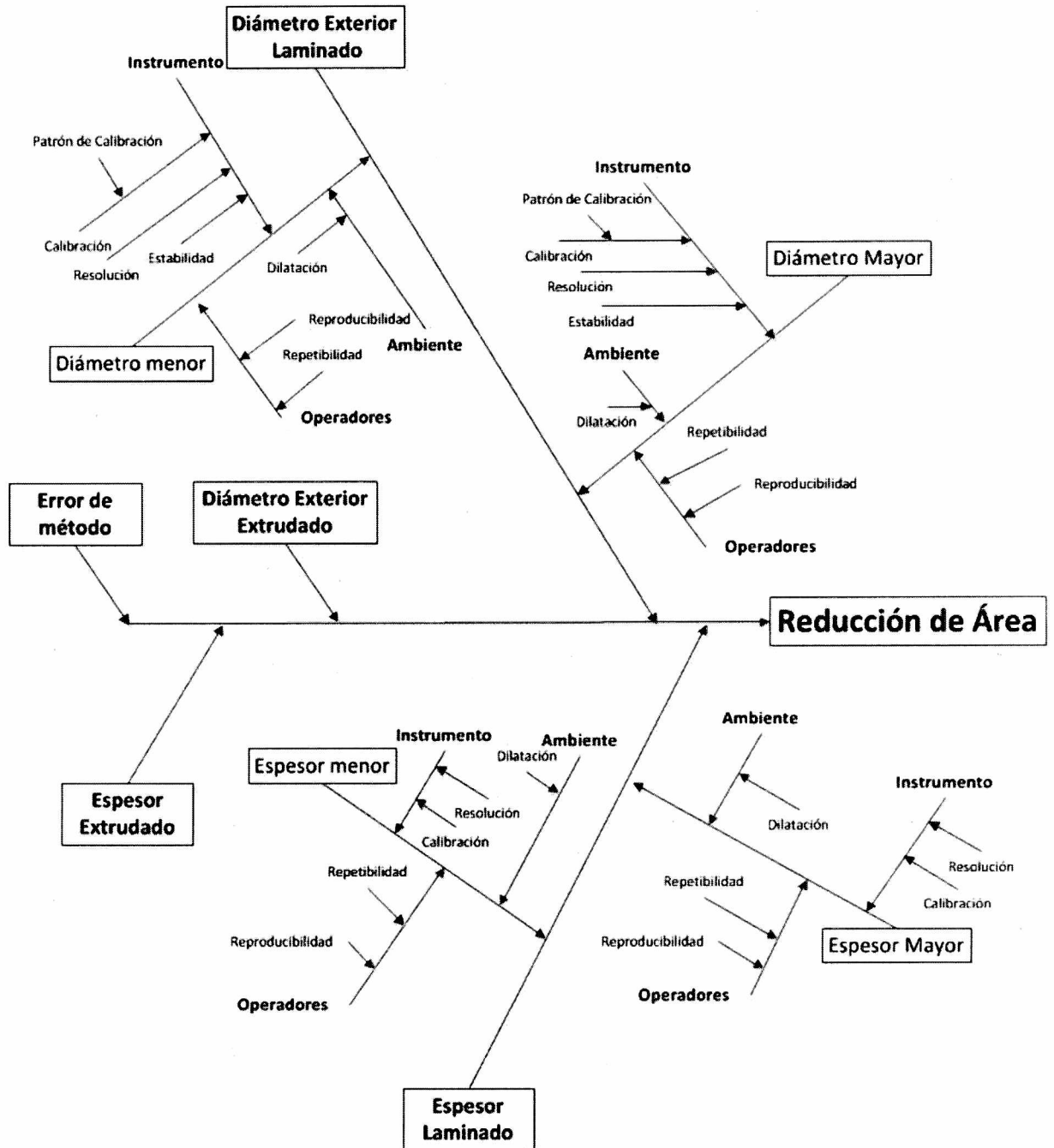


Figura 4 – Espina de pescado de fuentes de incertidumbre

### 3.1 Calibración del Instrumento

#### 3.1.1 Micrómetro

Tal como se establece en la bibliografía de referencia ([3], punto 7.3.3), luego de calibrar un instrumento, es posible evitar la corrección de cada medición según lo indicado en el certificado e incorporar el desvío (de cada posición) a la incertidumbre de la medición si el “error del patrón es menor en 2 órdenes de magnitud que el error del instrumento bajo calibración”

Del certificado de calibración (certificado número 184/14 del laboratorio de calibración de la firma CONUAR S.A.) se obtiene que:

- La incertidumbre total del instrumento ( $k=2$ ) es de  $0,975 \mu m$
- Para la calibración de este instrumento se empleó bloque adicional de 100 mm, por lo que en la posición de medición empleada en este trabajo (115 mm) corresponde asumir el desvío indicado para el patrón “15,0”, esto es  $0,40 \mu m$  y su desvío máximo  $1 \mu m$ .

La incertidumbre del patrón de calibración resulta ser:

$$u_p = \sqrt{u_{\text{bloque patrón}}^2 + u_{\text{bloque adicional}}^2}$$
$$u_p = \sqrt{\left(\frac{0,07}{2}\right)^2 + \left(\frac{-0,21}{2}\right)^2} = 0,11 \mu m$$

Como se indicó al principio:

Incertidumbre del patrón de calibración  $\ll$  Desvío Máximo (se asume una distribución rectangular) + Incertidumbre del instrumento

$$0,11 \mu m \ll \frac{1}{2\sqrt{3}} \mu m + \frac{0,975}{2} \mu m$$

$$0,11 \mu m \ll 0,289 \mu m + 0,488 \mu m$$

$$0,11 \mu m \ll 0,78 \mu m$$

Si bien estrictamente este requisito no se cumple, en la práctica se incorpora el desvío en la posición de medición (promedio:  $0,40 \mu m$ , máximo:  $1 \mu m$ ) a la incertidumbre de la calibración del instrumento ya que, como se verá, esta fuente contribuye de manera insignificante ( $< 1\%$ ) a la incertidumbre de la medición del diámetro.

$$u_{\text{calibr microm}} = \text{Desvío Máximo (asumiendo distribución cuadrada)} + \text{incertidumbre del instrumento}$$

$$u_{\text{calibr microm}} = \frac{1}{2\sqrt{3}} \mu m + \frac{0,975}{2} \mu m$$

$$u_{\text{calibr microm}} = 0,289 \mu m + 0,488 \mu m$$

$$u_{\text{calibr microm}} = 0,776 \mu m = 0,000776 mm \quad (3.1.1)$$

### 3.1.2 Equipo de ultrasonidos

En este caso no se calibra el equipo, sino el patrón con el cual se ajusta el equipo de medición. Esto es así debido a que la técnica de ultrasonidos requiere realizar ajustes en función de las propiedades físicas (relacionadas con la transmisión del sonido) del elemento a medir.

Para realizar la medición se ajusta el equipo con un material de referencia de las mismas características del tubo a medir y espesor conocido.

El valor del espesor es el indicado en el certificado de calibración (ver 5.1) y el desvío estándar es 0,004 mm ( $k=2$ ), por lo que asumiendo una distribución normal:

$$u_{calibr us} = \frac{0,004}{2} mm = 0,002 mm \quad (3.1.2)$$

### **3.2 Resolución del instrumento**

#### **3.2.1 Micrómetro**

La resolución del instrumento es 0,01 mm, en función de ello tomando como referencia una distribución rectangular

$$u_{\text{resolución microm}} = \frac{0,01}{2\sqrt{3}} = 0,0029 \text{ mm (3.2.1)}$$

#### **3.2.2 Equipo de ultrasonidos**

La resolución del instrumento es 0,01 mm, luego tomando en cuenta una distribución rectangular:

$$u_{\text{resolución us}} = \frac{0,01}{2\sqrt{3}} = 0,0029 \text{ mm (3.2.2)}$$

### 3.3 Estabilidad del instrumento

#### 3.3.1 Micrómetro

Con el objeto de poder considerar las variaciones temporales que experimenta el instrumento, se emplea un material de referencia para registrar estas, cuya única propiedad requerida es la estabilidad en el tiempo. En el caso de que ese material de referencia indicase un valor nominal, no se pretende que el instrumento reproduzca ese valor, sino solamente poder seguir la evolución estadística del conjunto instrumento-material de referencia. En el caso de obtener valores fuera de control la única conclusión que podría extraerse es que el conjunto ha sido alterado y deberán buscarse las causas, ya sea que se ha alterado el material de referencia (ejemplo: caída) o el instrumento (ejemplo: pérdida de la calibración) o ambos.

A partir de los datos de la carta de control se obtiene, según la teoría de Sheewart, el valor del desvío estándar de la variación del instrumento a lo largo del tiempo.

Construcción de la carta de control:

A partir de la medición diaria de un mismo material de referencia con el instrumento se obtuvieron los siguientes resultados (ver 5.1) (unidad: mm)

Tabla 1- Mediciones originales de verificación de micrómetro

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
125,004	125,000	124,990	125,010	125,030	125,000	125,050	125,000	124,995	125,000
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
124,997	125,000	125,000	125,000	124,990	124,980	124,995	124,995	124,995	124,995
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
124,995	124,990	124,995	124,995	124,995	124,995	124,995	125,000	124,995	125,000
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
124,995	125,020	125,000	125,000	125,200	125,000	125,010	124,990	125,010	125,000
41									
125,01									

De ellos se tomaron valores representativos de una distribución normal para calcular los límites de la carta de control

Tabla 2 - Mediciones empleadas para límites de carta de control

1	2	3	4	9	10	11	32	33	34
125,004	125,000	124,990	125,010	124,995	125,000	124,997	125,020	125,000	125,000
36	37	38	39	40	41				
125,000	125,010	124,990	125,010	125,000	125,01				

Con estos valores se realizó el test de de Ryan-Joiner para verificar la ausencia de valores fuera de límites (outliers) y la normalidad de los valores seleccionados. El resultado es el siguiente:

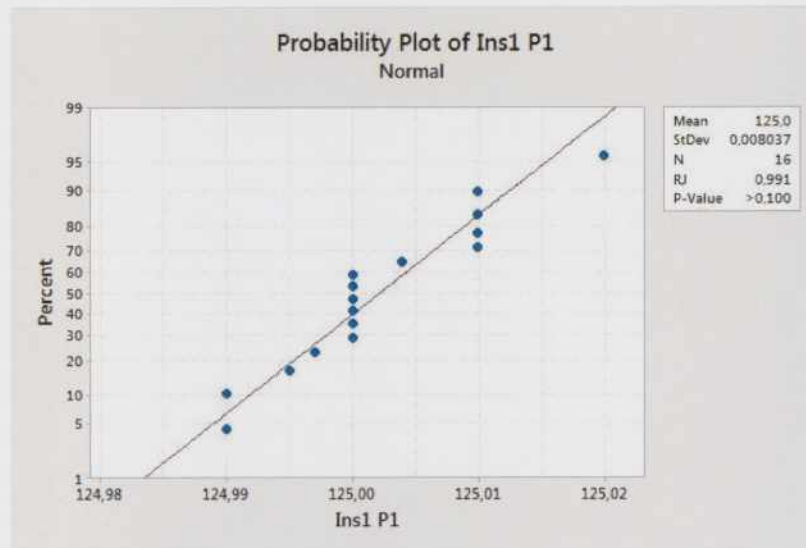


Figura 5 – Test de Ryan-Joiner de carta de control

Y para mayor confirmación se realiza el test de normalidad de Anderson-Darling

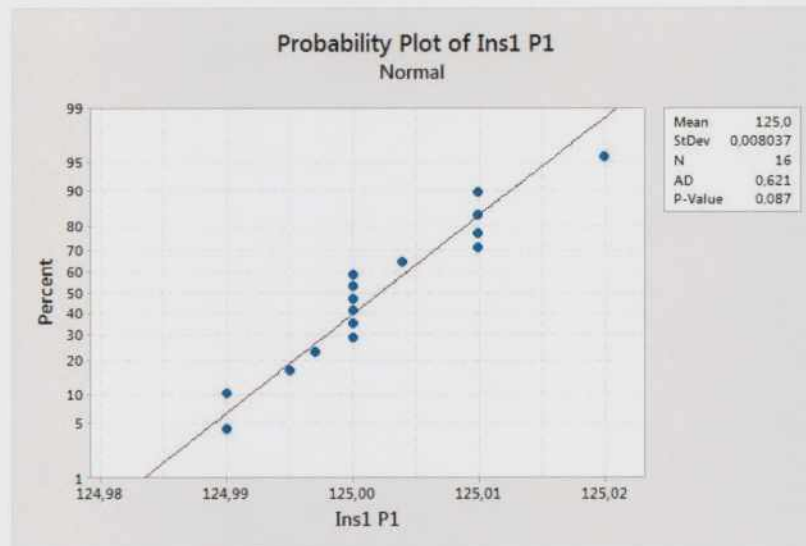


Figura 6 – Test de Anderson-Darling de carta de control

Donde se puede apreciar que, en ambos casos, el valor P-Value es mayor que 0,05, por lo que se concluye que los valores son representativos de un proceso normal.

Asimismo se verificó la normalidad según el método Rankit. Los cálculos y el gráfico resultante se presentan a continuación:

Tabla 3 - Valores para gráfico Rankit de carta de control de micrómetro

Observación número	Información original [mm]	Frecuencia acumulada	Normalizado	Z
3	124,990	2	0,117647	-1,186831
38	124,990	2	0,117647	-1,186831
9	124,995	3	0,176471	-0,928899
11	124,997	4	0,235294	-0,721522
2	125,000	10	0,588235	0,223008
10	125,000	10	0,588235	0,223008
33	125,000	10	0,588235	0,223008
34	125,000	10	0,588235	0,223008
36	125,000	10	0,588235	0,223008
40	125,000	10	0,588235	0,223008
1	125,004	11	0,647059	0,377392
4	125,010	15	0,882353	1,186831
37	125,010	15	0,882353	1,186831
39	125,010	15	0,882353	1,186831
41	125,010	15	0,882353	1,186831
32	125,020	16	0,941176	1,564726

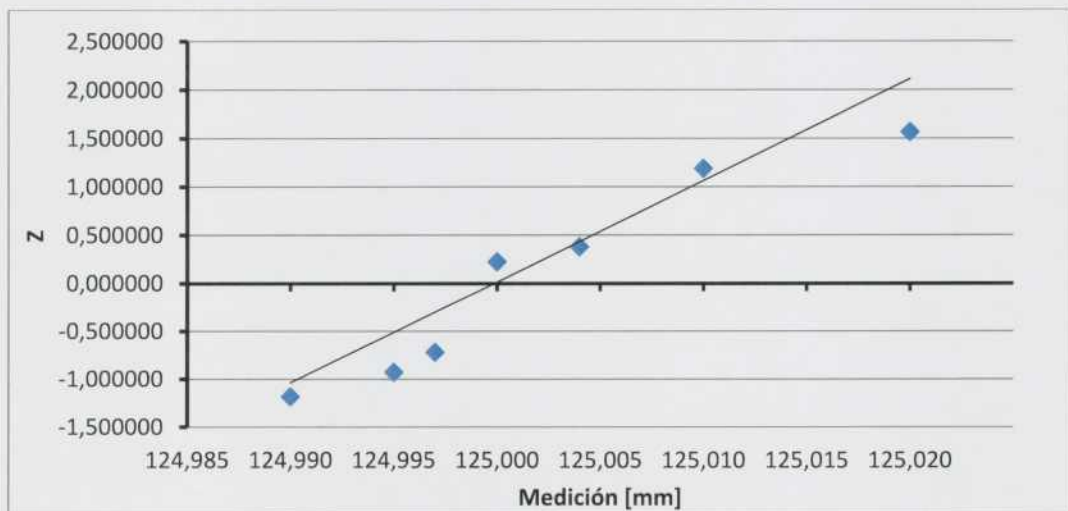


Figura 7 - Rankit Carta de Control

No se observan dispersiones significativas respecto de la línea central, por lo que se confirma la normalidad de los valores seleccionados.

Tabla 4 - Valores de Media y Rango para carta de control de micrómetro

Observación número	Medición [mm]	Rango (n=1)
1	125,004	-
2	125,000	0,004
3	124,990	0,01
4	125,010	0,02
9	124,995	0,015
10	125,000	0,005
11	124,997	0,003
32	125,020	0,023
33	125,000	0,02
34	125,000	0
36	125,000	0
37	125,010	0,01
38	124,990	0,02
39	125,010	0,02
40	125,000	0,01
41	125,010	0,01
Promedio [mm]	$\bar{X} = 125,002$	$\bar{R} = 0,011333$

En base a estos antecedentes se procede a calcular los límites de las cartas de control empleando las fórmulas de Shewhart [2]

$$\text{Límite Superior de Control Valor Medio (LSC}_X) = \bar{X} + \frac{3}{d_2\sqrt{n}}\bar{R}$$

$$\text{Límite Inferior de Control Valor Medio (LIC}_X) = \bar{X} - \frac{3}{d_2\sqrt{n}}\bar{R}$$

$$\text{Límite Superior de Control Rango (LSC}_R) = D_4\bar{R}$$

$$\text{Límite Inferior de Control Rango (LIC}_R) = D_3\bar{R}$$

$$\text{Límite Superior de Advertencia Valor Medio (LSA}_X) = \bar{X} + \frac{2}{d_2\sqrt{n}}\bar{R}$$

$$\text{Límite Inferior de Advertencia Valor Medio (LIA}_X) = \bar{X} - \frac{2}{d_2\sqrt{n}}\bar{R}$$

$$\text{Límite Superior de Control Rango (LSA}_R) = D_{4w}\bar{R}$$

$$\text{Límite Inferior de Control Rango (LIA}_R) = D_{3w}\bar{R}$$

De la literatura se determina que para n=2 (no hay valores para n=1)  $d_2 = 1,128$ ;  $D_4 = 3,267$ ;  $D_{4w} = 2,512$ ;  $D_3 = 0$ ;  $D_{3w} = 0$ .

$$LSC_X = 125,002 + \frac{3}{1,128\sqrt{1}}0,011333 = 125,032 \text{ mm}$$

$$LIC_X = 125,002 - \frac{3}{1,128\sqrt{1}} 0,011333 = 124,972 \text{ mm}$$

$$LSC_R = 3,267 \times 0,011333 = 0,0376 \text{ mm}$$

$$LIC_R = 0 \times 0,011333 = 0$$

$$LSA_X = 125,002 + \frac{2}{1,128\sqrt{1}} 0,011333 = 125,022 \text{ mm}$$

$$LIA_X = 125,002 - \frac{2}{1,128\sqrt{1}} 0,011333 = 124,982 \text{ mm}$$

$$LSA_R = 2,512 \times 0,011333 = 0,028 \text{ mm}$$

$$LIA_R = 0 \times 0,011333 = 0$$

A partir del valor del rango medio se calcula el desvío estándar

$$\text{Desvío Estándar Estimado} = s_p = \frac{1}{d_2\sqrt{n}} \bar{R} = \frac{0,011333 \text{ mm}}{1,128} = 0,010 \text{ mm}$$

Los gráficos con los límites calculados y lo valores que los generaron son los siguientes:

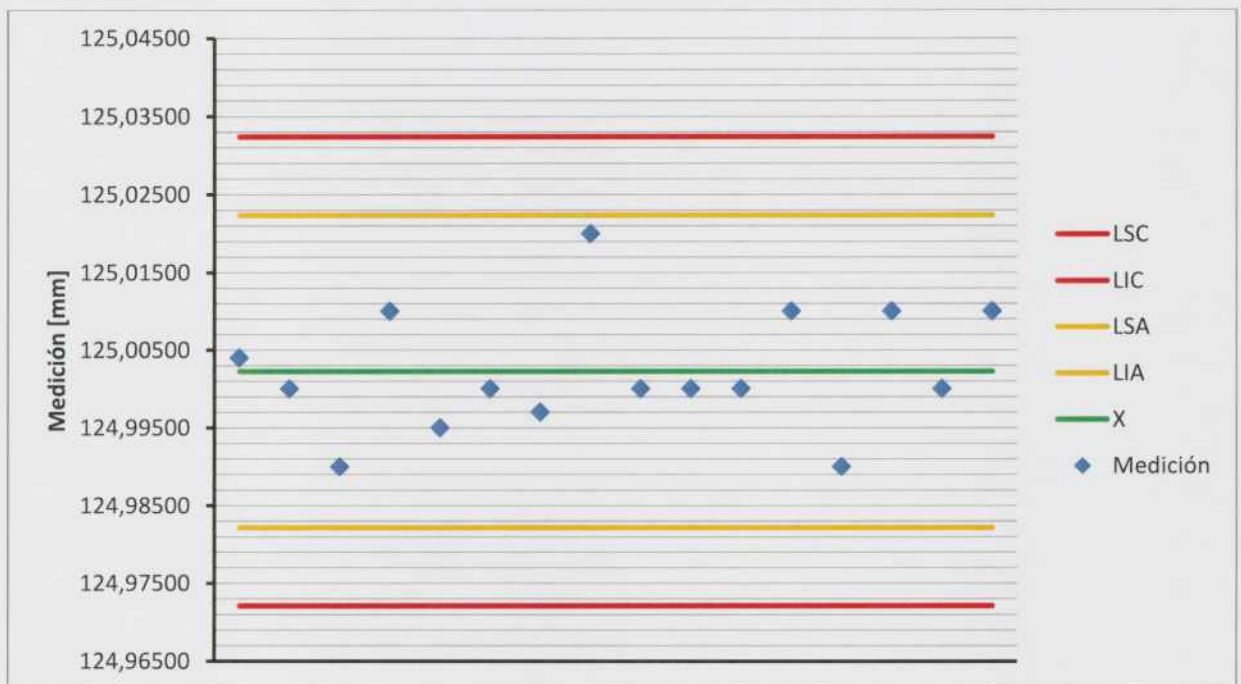


Figura 8 – Carta de Control: Gráfico de valores medidos

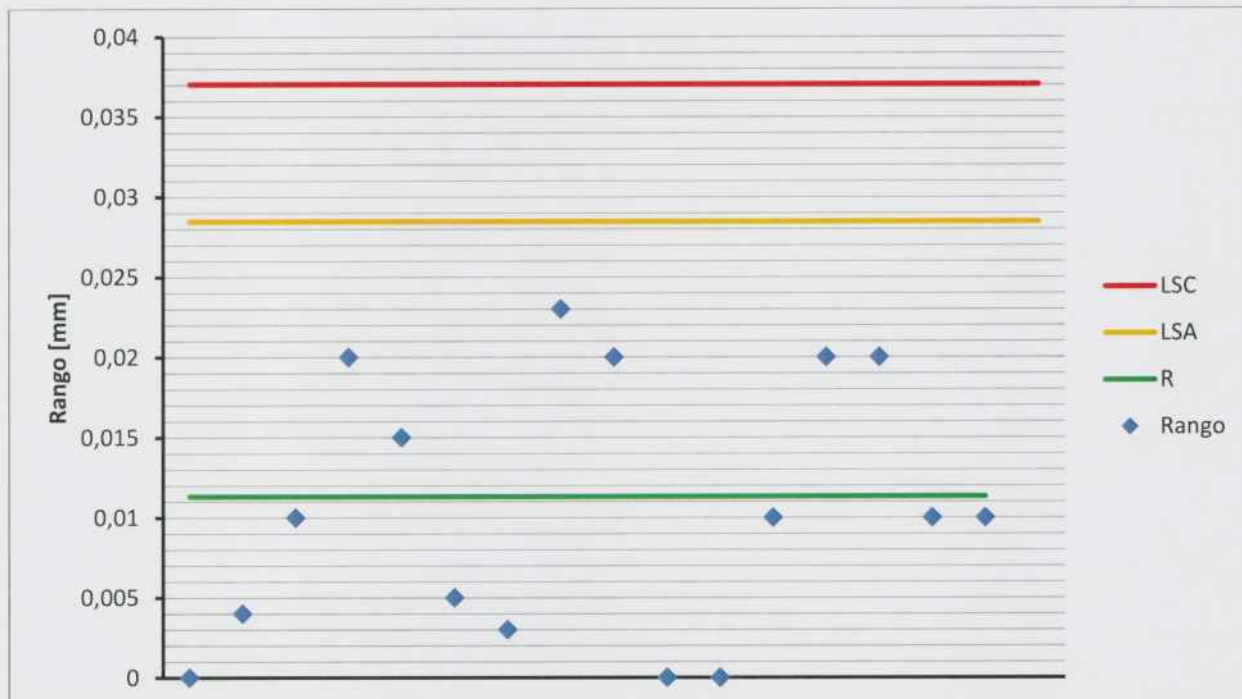


Figura 9 – Carta de Control: Gráfico de rangos

Para verificar estos cálculos, con los mismos datos empleados para calcular los límites, utilizando el software Minitab ® se confecciona una carta de control con media y rango móvil de tamaño de ventana =1 y las siguientes restricciones:

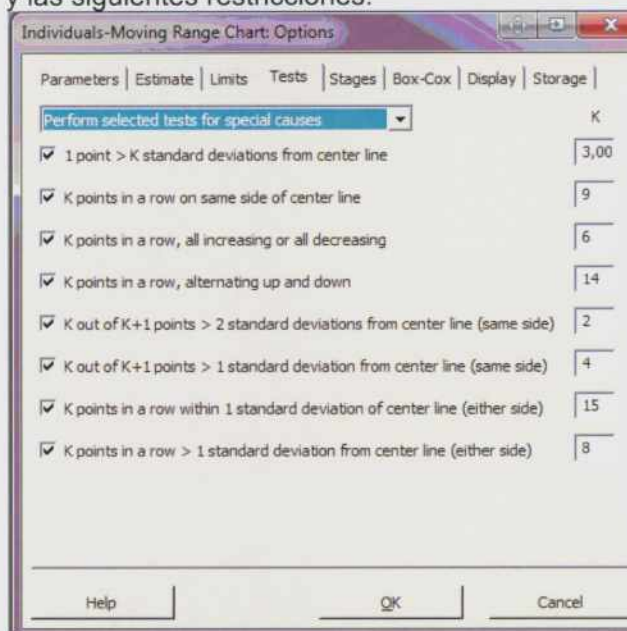


Figura 10 – Controles para Carta de Control en Minitab ®

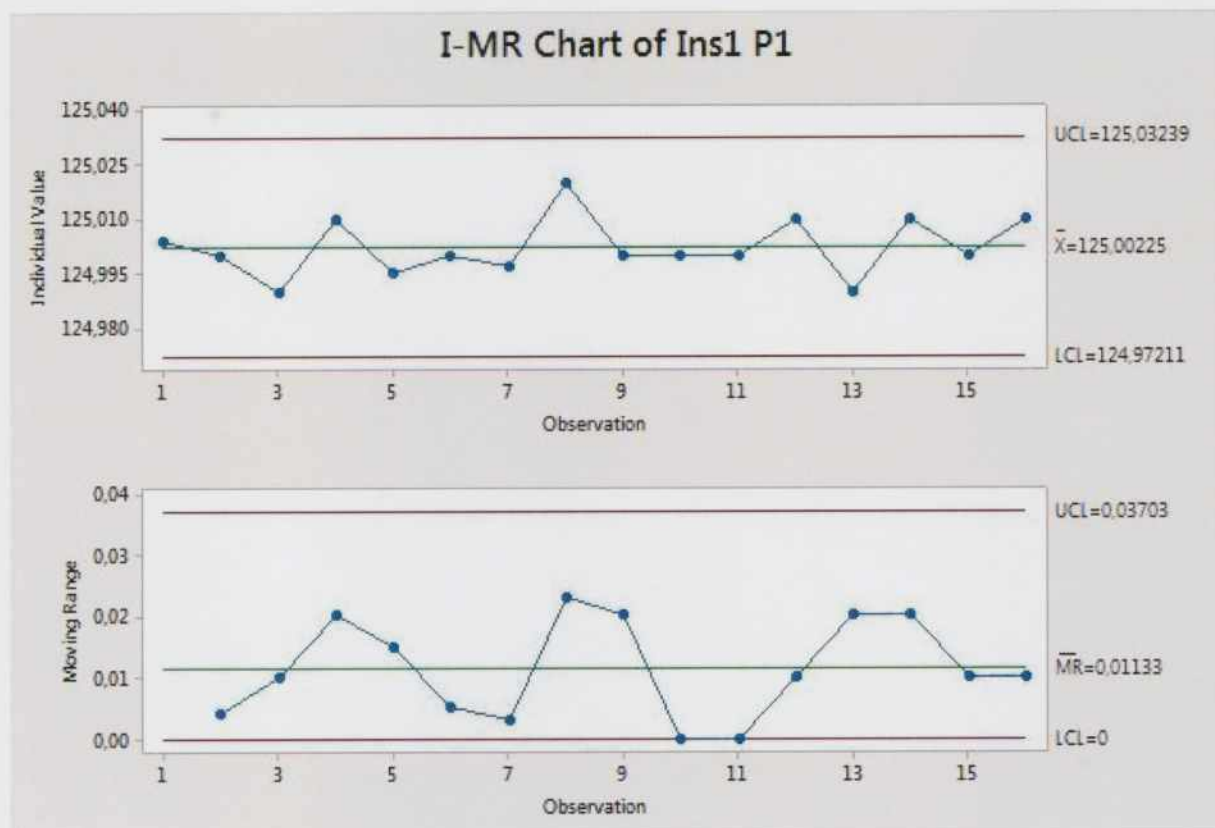


Figura 11 – Carta de Control generada con Minitab ®

A continuación, empleando el mismo programa informático con las mismas restricciones se grafican todas las mediciones (es decir, incluyendo las omitidas para calcular los límites)

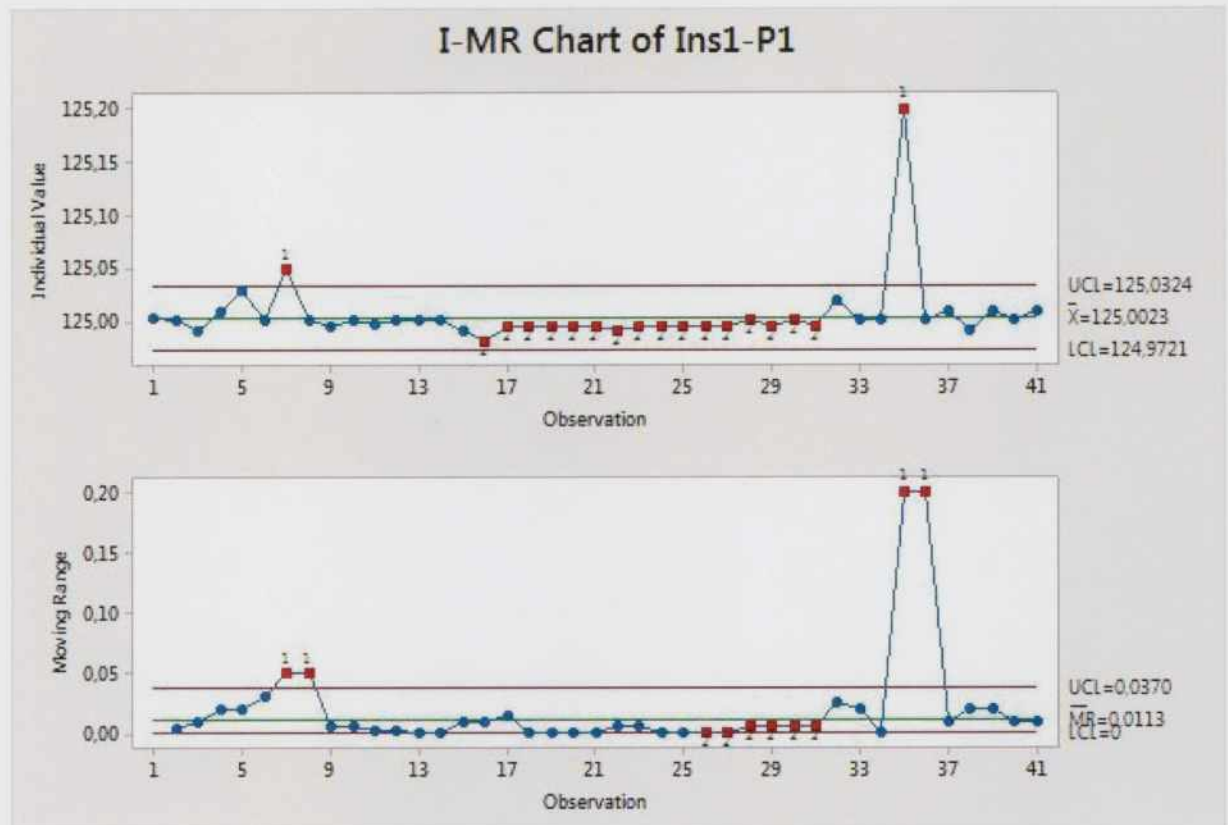


Figura 12 – Carta de Control con todos los valores registrados

NOTA: Los valores señalados en rojo por el programa informático no han sido empleados. La determinación indicada como 36 si fue empleada, dado que, en la carta de rango es correcto y esperable que se indique como fuera de límites ya que la medición anterior (35, que sí fue excluida) es un valor no válido.

4.2.4 Siguiendo los lineamientos de la norma IRAM 35050:2001 [8], como se indica en el punto

$$u_{\text{estabilidad microm}} = \frac{s_p}{\sqrt{n}} = \frac{0,010 \text{ mm}}{\sqrt{16}} = 0,0025 \text{ mm} \quad (3.3.1)$$

### 3.3.2 Equipo de ultrasonidos

Dadas las características de la técnica de medición, este equipo se verifica (y de ser necesario, se ajusta) antes de cada uso mediante el empleo de un material de referencia de iguales características metalúrgicas que el elemento a medir y de dimensiones conocidas, las cuales se encuentran determinadas en el certificado correspondiente (ver punto 5.1.2), es por ello que no se realiza un estudio de estabilidad de este equipo.

### 3.4 Repetibilidad y Reproducibilidad de operadores

Para realizar estos cálculos, todos los operadores, midieron en un mismo punto un tubo laminado con el procedimiento habitual de medición, respetando las condiciones necesarias de repetibilidad (mismo procedimiento de medición, el mismo instrumento, bajo las mismas condiciones ambientales en un periodo corto de tiempo).

A fines académicos se emplearán cinco alternativas posibles para evaluar los valores de repetibilidad y reproducibilidad:

- Datos sin procesamiento estadístico (distribución rectangular)
- Análisis de varianza
- Empleo de la norma ISO 5725-2:1994 [10]
- Empleo de la norma ISO 13.528: 2005 [11]
- Análisis no paramétrico: gráficos de caja y bigotes

#### 3.4.1 Distribución rectangular

##### 3.4.1.1 $\varnothing_{M\acute{a}x}$

##### 3.4.1.1.1 Reproducibilidad

Tabla 5 - Mediciones originales de diámetros máximos por operador

Medición	Op1_Ø Max [mm]	Op2_Ø Max [mm]	Op3_Ø Max [mm]	Op4_Ø Max [mm]	Op5_Ø Max [mm]	Op6_Ø Max [mm]
1	114,81	114,81	114,81	114,78	114,80	114,86
2	114,81	114,80	114,80	114,77	114,80	114,82
3	114,80	114,80	114,80	114,78	114,80	114,80
4	114,79	114,80	114,81	114,82	114,79	
5	114,79	114,79	114,79	114,80	114,78	
6	114,81	114,79	114,80	114,76		
7	114,81	114,80	114,79	114,77		
8	114,80	114,80	114,79	114,75		
9	114,80	114,79	114,79	114,76		
10	114,81	114,80	114,80	114,77		
Promedio [mm]	114,803	114,798	114,798	114,776	114,794	114,827
desvío estándar [mm]	0,00823	0,00632	0,00789	0,02066	0,00894	0,03055
Varianza [mm <sup>2</sup> ]	6,778E-05	4,000E-05	6,222E-05	4,267E-04	8,000E-05	9,333E-03

Se realizó el test de Fisher para determinar si existe diferencia significativa (con un 95% de confianza) entre las varianzas de los distintos operadores.

En este test se comparan las varianzas. En el caso de idénticas desviaciones estándar,  $F=1$ . Se seleccionan las varianzas de manera que  $s_1 > s_2$

$$F = \frac{s_1^2}{s_2^2}$$

En la Tabla 6 se presentan las probabilidades asociadas a los valores de F y los grados de libertad asociados, para ello se empleó la fórmula de Excel ® FDIST(F; n<sub>1</sub>-1; n<sub>2</sub>-1)

Tabla 6 - Probabilidades asociadas a la función F de Diámetros Máximos

	Op1_Ø Max	Op2_Ø Max	Op3_Ø Max	Op4_Ø Max	Op5_Ø Max	Op6_Ø Max
Op1_Ø Max		0,22209	0,45036	0,00572	0,38201	0,00183
Op2_Ø Max			0,26040	0,00081	0,17820	0,00027
Op3_Ø Max				0,00423	0,34489	0,00136
Op4_Ø Max					0,06100	0,16818
Op5_Ø Max						0,02142
Op6_Ø Max						

En color rojo se ha indicado los casos donde se puede considerar que existe diferencia significativa (p>0,05) entre operadores (en naranja se indica un valor cuestionable). De los resultados se puede concluir que los operadores 4 y 6 presentan una diferencia con respecto al resto de los valores

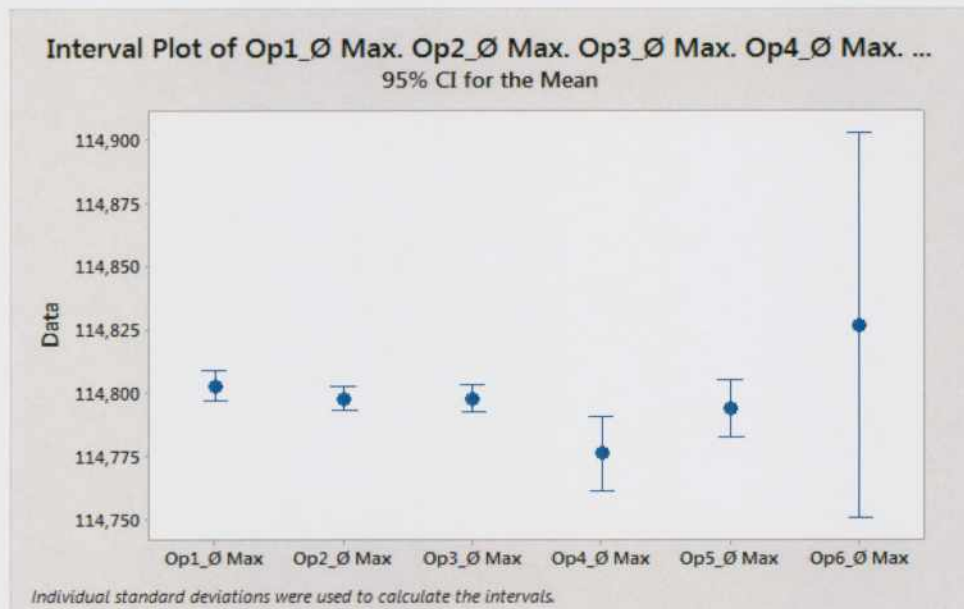


Figura 13 – Gráfico de Intervalos medidos para Diámetro Máximo

Valor mínimo de los promedios de las mediciones de los operadores =114,776 mm

Valor máximo de los promedios de las mediciones de los operadores =114,827 mm

Tomando como referencia una distribución rectangular:

$$u_{\text{reproducibilidad } \Phi_{\text{Máx}}} = \frac{|\overline{\Phi_{\text{Máx}}} \text{ máximo} - \overline{\Phi_{\text{Máx}}} \text{ mínimo}|}{2\sqrt{3}}$$

$$u_{\text{reproducibilidad } \Phi_{\text{Máx}}} = \frac{|114,827 - 114,776|}{2\sqrt{3}} = 0,015 \text{ mm} \quad (3.4.1.1.1)$$

3.4.1.1.2 Repetibilidad

Se tomarán las mediciones del operador 6, dado que representan la mayor dispersión. A partir de los datos de la tabla 5, el valor del desvío estándar es el siguiente

$$S_{\text{repetibilidad } \phi_{M\acute{a}x}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [q_i - \bar{q}]^2}$$

$$S_{\text{repetibilidad } \phi_{M\acute{a}x}} = 0,031 \text{ mm}$$

$$u_{\text{repetibilidad } \phi_{M\acute{a}x}} = \frac{S_{\text{repetibilidad } \phi_{M\acute{a}x}}}{\sqrt{n}} = \frac{0,03055}{\sqrt{3}} = 0,018 \text{ mm} \quad (3.4.1.1.2)$$

3.4.1.2  $\phi_{\text{mín}}$

3.4.1.2.1 Reproducibilidad

Tabla 7 - Mediciones originales de diámetros mínimos por operador

Medición	Op1_Ø mín [mm]	Op2_Ø mín [mm]	Op3_Ø mín [mm]	Op4_Ø mín [mm]	Op5_Ø mín [mm]	Op6_Ø mín [mm]
1	114,76	114,77	114,76	114,71	114,76	114,77
2	114,77	114,76	114,77	114,74	114,76	114,78
3	114,78	114,77	114,75	114,75	114,75	114,77
4	114,77	114,77	114,75	114,78	114,77	
5	114,78	114,76	114,77	114,75	114,77	
6	114,78	114,77	114,76	114,73		
7	114,77	114,77	114,77	114,72		
8	114,78	114,77	114,77	114,73		
9	114,76	114,78	114,76	114,74		
10	114,77	114,75	114,75	114,74		
<b>Promedio [mm]</b>	114,772	114,767	114,761	114,739	114,763	114,773
desvío estándar [mm]	0,00789	0,00823	0,00876	0,01912	0,00837	0,00577
Varianza [mm <sup>2</sup> ]	6,222E-05	6,778E-05	7,667E-05	3,656E-04	7,000E-05	3,333E-05

Se realizó el test de Fisher para determinar si existe diferencia significativa (con un 95% de confianza) entre las varianzas de los distintos operadores

Tabla 8 - Probabilidades asociadas a la función F de diámetros mínimos

	Op1_Ø mín	Op2_Ø mín	Op3_Ø mín	Op4_Ø mín	Op5_Ø mín	Op6_Ø mín
Op1_Ø mín		0,45036	0,38045	0,00728	0,40321	0,39719
Op2_Ø mín			0,42868	0,00974	0,44134	0,37296
Op3_Ø mín				0,01464	0,50354	0,33969
Op4_Ø mín					0,06319	0,08632
Op5_Ø mín						0,34763
Op6_Ø mín						

En color rojo se ha indicado los casos donde se puede considerar que existe diferencia significativa ( $p > 0,05$ ) entre operadores (en naranja se indica un valor cuestionable). De los resultados se puede concluir que el operador 4 presenta una diferencia con respecto al resto de los valores

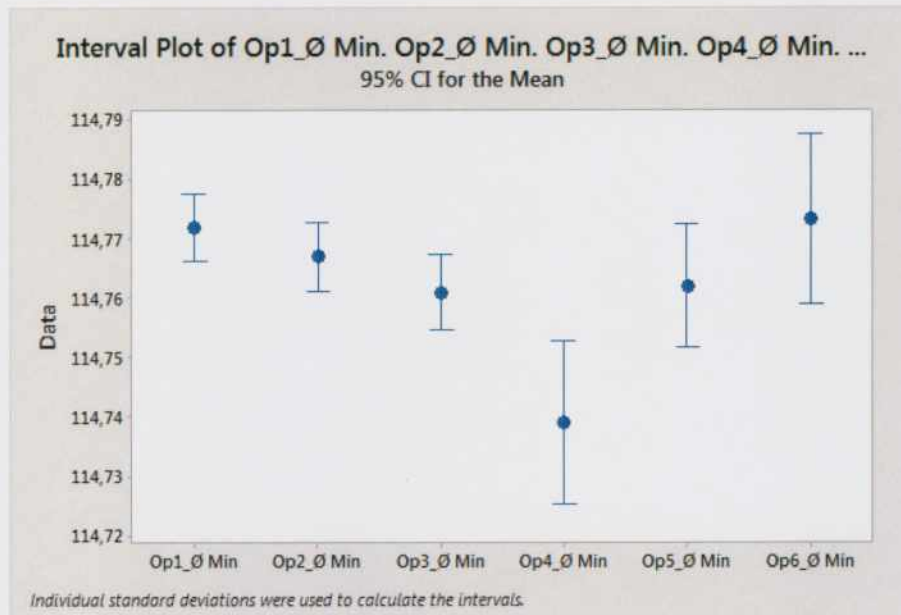


Figura 14 - Gráfico de Intervalos medidos para Diámetro mínimo

Valor mínimo de los promedios de las mediciones de los operadores = 114,739 mm  
 Valor máximo de los promedios de las mediciones de los operadores = 114,772 mm

Tomando una distribución rectangular:

$$u_{\text{reproducibilidad } \phi_{\text{mín}}} = \frac{|\overline{\phi_{\text{mín}}} \text{ máximo} - \overline{\phi_{\text{mín}}} \text{ mínimo}|}{2\sqrt{3}}$$

$$u_{\text{reproducibilidad } \phi_{\text{mín}}} = \frac{|114,772 \text{ mm} - 114,739 \text{ mm}|}{2\sqrt{3}} = 0,0095 \text{ mm} \quad (3.4.1.2.1)$$

### 3.4.1.2.2 Repetibilidad

Se calculará la Repetibilidad empleando las mediciones del operador 4, dado que representan la mayor dispersión. Empleando los datos de la tabla 7, el valor del desvío estándar es el siguiente

$$S_{\text{repetibilidad } \phi_{\text{mín}}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [q_i - \bar{q}]^2}$$

$$S_{\text{repetibilidad } \phi_{\text{mín}}} = 0,019 \text{ mm}$$

$$u_{\text{repetibilidad } \phi_{\text{mín}}} = \frac{S_{\text{repetibilidad } \phi_{\text{mín}}}}{\sqrt{n}} = \frac{0,01912}{\sqrt{10}} = 0,0060 \text{ mm} \quad (3.4.1.2.2)$$

3.4.1.3  $\tau_{M\acute{a}x}$

3.4.1.3.1 Reproducibilidad

Tabla 9 - Mediciones originales de espesores máximos por operador

Medición	Op1_t Máx [mm]	Op2_t Máx [mm]	Op3_t Máx [mm]	Op4_t Máx [mm]
1	5,04	5,06	5,05	5,04
2	5,06	5,07	5,06	5,03
3	5,05	5,05	5,07	5,04
4	5,04	5,05	5,04	5,06
5	5,05	5,06	5,05	5,06
6	5,06	5,05	5,06	5,04
7	5,06	5,07	5,05	5,05
8	5,06	5,05	5,05	5,06
9	5,06	5,05	5,05	5,04
10	5,06	5,05	5,05	5,05
Promedio [mm]	5,054	5,056	5,053	5,047
Desvío estándar [mm]	0,00843274	0,00843274	0,00823273	0,0105935
Varianza [ $mm^2$ ]	7,11111E-05	7,1111E-05	6,7778E-05	0,00011222

Realizando el test de Fisher no se observan operadores que significativamente difieran del resto:

Tabla 10 - Probabilidades asociadas a la función F de espesores máximos

	Op1_t Máx	Op2_t Máx	Op3_t Máx	Op4_t Máx
Op1_t Máx		0,50000	0,47208	0,25371
Op2_t Máx			0,47208	0,25371
Op3_t Máx				0,23210
Op4_t Máx				

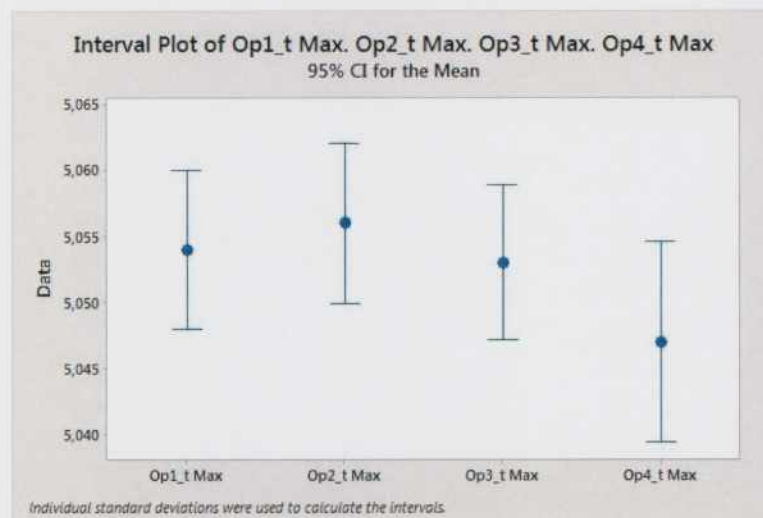


Figura 15 - Gráfico de Intervalos medidos para Espesor Máximo

Empleo del Sistema de Gestión de la Calidad para la determinación de la incertidumbre en la reducción de área de tubos laminados

*Instituto Dan Beninson – Especialización en Reactores y su Ciclo de Combustible*

Valor mínimo de los promedios de las mediciones de los operadores =5,047 mm

Valor máximo de los promedios de las mediciones de los operadores =5,056 mm

Tomando como referencia una distribución rectangular:

$$u_{\text{reproducibilidad } \tau_{M\acute{a}x}} = \frac{|\overline{\tau_{M\acute{a}x}} \text{ máximo} - \overline{\tau_{M\acute{a}x}} \text{ mínimo}|}{2\sqrt{3}}$$

$$u_{\text{reproducibilidad } \tau_{M\acute{a}x}} = \frac{|5,056 \text{ mm} - 5,047 \text{ mm}|}{2\sqrt{3}} = 0,0026 \text{ mm} \quad (3.4.1.3.1)$$

#### 3.4.1.3.2 Repetibilidad

Se utilizarán las mediciones del operador 4, dado que representan la mayor dispersión. Tomado los datos de la tabla 9, el valor del desvío estándar es el siguiente:

$$S_{\text{repetitibilidad } \tau_{M\acute{a}x}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [q_i - \bar{q}]^2}$$

$$S_{\text{repetitibilidad } \tau_{M\acute{a}x}} = 0,011 \text{ mm}$$

$$u_{\text{repetitibilidad } \tau_{M\acute{a}x}} = \frac{S_{\text{repetitibilidad } \tau_{M\acute{a}x}}}{\sqrt{n}} = \frac{0,011 \text{ mm}}{\sqrt{10}} = 0,0033 \text{ mm} \quad (3.4.1.3.2)$$

#### 3.4.1.4 $\tau_{\text{mín}}$

##### 3.4.1.4.1 Reproducibilidad

Tabla 11 - Mediciones originales de espesores mínimos por operador

Medición	Op1_t mín [mm]	Op2_t mín [mm]	Op3_t mín [mm]	Op4_t mín [mm]
1	5,00	5,01	5,02	5,01
2	5,00	5,02	5,00	5,01
3	5,01	5,00	5,01	5,01
4	5,00	5,00	5,01	5,01
5	5,00	5,02	5,01	5,01
6	5,00	5,01	5,02	5,01
7	5,01	5,00	5,02	4,96
8	5,01	5,02	5,02	4,97
9	5,00	5,02	5,01	5,01
10	5,01	5,00	5,01	5,01
Promedio [mm]	5,004	5,010	5,013	5,001
Desvío estándar [mm]	0,005163978	0,00942809	0,00674949	0,01911951
Varianza [mm <sup>2</sup> ]	2,66667E-05	8,8889E-05	4,5556E-05	0,00036556

En este caso, realizando el test de Fisher se observa que el operador 4 significativamente (p>0.05) difiere del resto:

Tabla 12 - Probabilidades asociadas a la función F de espesores mínimos

	Op1_t mín	Op2_t mín	Op3_t Max	Op4_t mín
Op1_t mín		0,04374	0,21862	0,00030
Op2_t mín			0,16686	0,02341
Op3_t mín				0,00239
Op4_t mín				

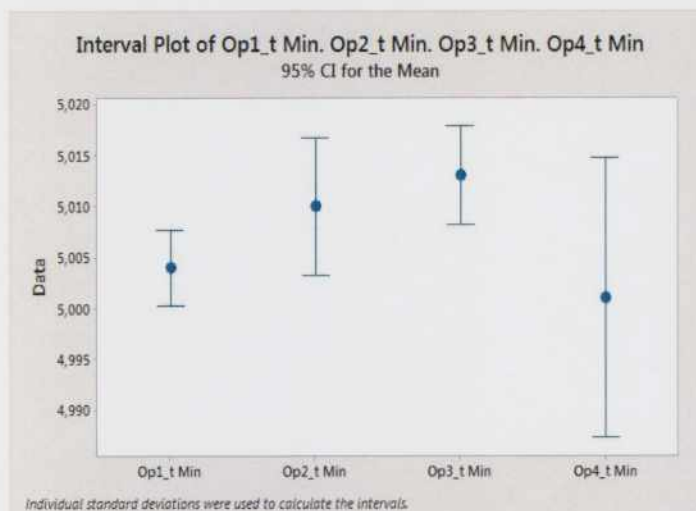


Figura 16 - Gráfico de Intervalos medidos para Espesor mínimo

Valor mínimo de los promedios de las mediciones de los operadores =5,001 mm  
 Valor máximo de los promedios de las mediciones de los operadores =5,013 mm

Tomando como base una distribución rectangular:

$$u_{\text{reproducibilidad } \tau_{\text{mín}}} = \frac{|\overline{\tau_{\text{mín}}} \text{ máximo} - \overline{\tau_{\text{mín}}} \text{ mínimo}|}{2\sqrt{3}}$$

$$u_{\text{personal } \tau_{\text{mín}}} = \frac{|5,001 \text{ mm} - 5,013 \text{ mm}|}{2\sqrt{3}} = 0,0035 \text{ mm} \quad (3.4.1.4.1)$$

#### 3.4.1.4.2 Repetibilidad

Se tomarán las mediciones del operador 4, dado que representan la mayor dispersión. Utilizando los datos de la tabla 11, el valor del desvío estándar es el siguiente:

$$S_{\text{repetibilidad } \tau_{\text{mín}}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [q_i - \bar{q}]^2}$$

$$S_{\text{repetibilidad } \tau_{\text{mín}}} = 0,019 \text{ mm}$$

$$u_{\text{repetibilidad } \tau_{\text{mín}}} = \frac{S_{\text{repetibilidad } \tau_{\text{mín}}}}{\sqrt{n}} = \frac{0,01911951}{\sqrt{10}} = 0,0060 \text{ mm} \quad (3.4.1.4.2)$$

### 3.4.2 ANOVA

Para poder realizar este análisis primeramente se procederá a verificar la condición necesaria para su utilización: los datos deben estar distribuidos de manera normal. Luego, en caso de ser posible, se calcularán los valores de reproducibilidad y repetibilidad

#### 3.4.2.1 $\phi_{M\acute{a}x}$

Tabla 13 - Valores de Operador 1 - Diámetro Máximo para Rankit

Medición	Op1 $\phi$ Máx [mm]	Frecuencia acumulada	Normalizado	Z
4	114,79	2	0,182	-0,908
5	114,79	2	0,182	-0,908
3	114,80	5	0,455	-0,114
8	114,80	5	0,455	-0,114
9	114,80	5	0,455	-0,114
1	114,81	10	0,909	1,335
2	114,81	10	0,909	1,335
6	114,81	10	0,909	1,335
7	114,81	10	0,909	1,335
10	114,81	10	0,909	1,335

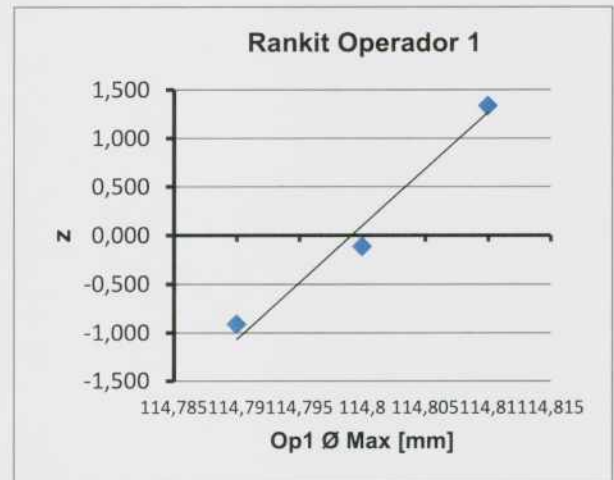
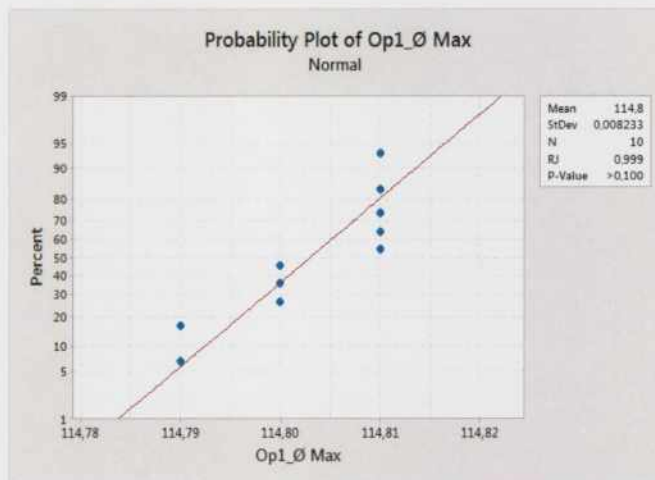


Figura 17 – Ryan-Joiner y Rankit de Operador 1 - Diámetro Máximo

Tabla 14 - Valores de Operador 2 - Diámetro Máximo para Rankit

Medición	Op2 Ø Max [mm]	Frecuencia acumulada	Normalizado	Z
5	114,79	3	0,273	-0,605
6	114,79	3	0,273	-0,605
9	114,79	3	0,273	-0,605
2	114,80	9	0,818	0,908
3	114,80	9	0,818	0,908
4	114,80	9	0,818	0,908
7	114,80	9	0,818	0,908
8	114,80	9	0,818	0,908
10	114,80	9	0,818	0,908
1	114,81	10	0,909	1,335

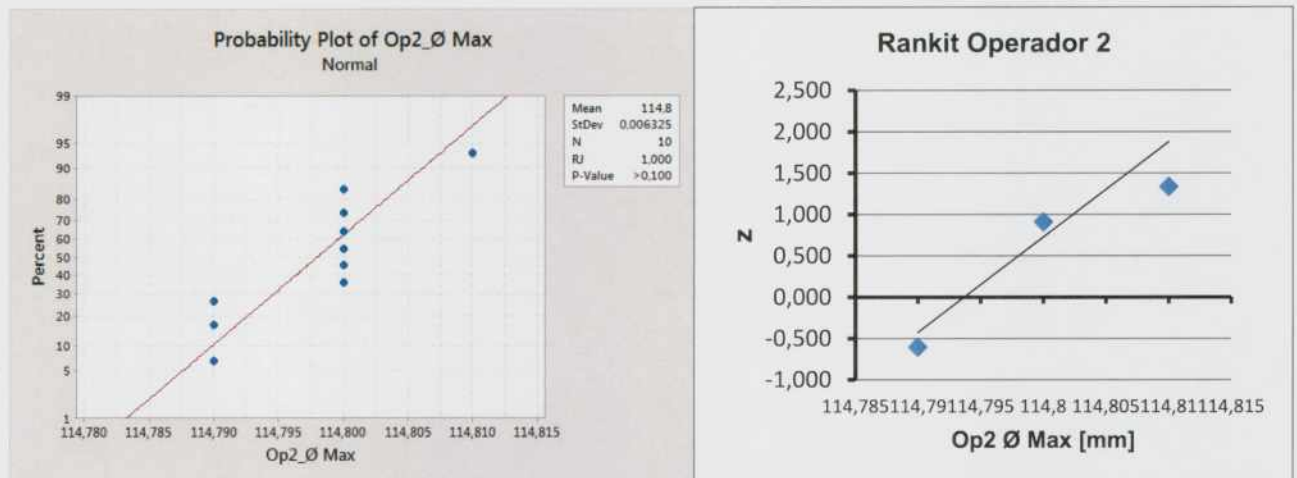


Figura 18 – Ryan-Joiner y Rankit de Operador 2 - Diámetro Máximo

Tabla 15- Valores de Operador 3 - Diámetro Máximo para Rankit

Medición	Op3 Ø Max [mm]	Frecuencia acumulada	Normalizado	Z
5	114,79	4	0,364	-0,349
7	114,79	4	0,364	-0,349
8	114,79	4	0,364	-0,349
9	114,79	4	0,364	-0,349
2	114,80	8	0,727	0,605
3	114,80	8	0,727	0,605
6	114,80	8	0,727	0,605
10	114,80	8	0,727	0,605
1	114,81	10	0,909	1,335
4	114,81	10	0,909	1,335

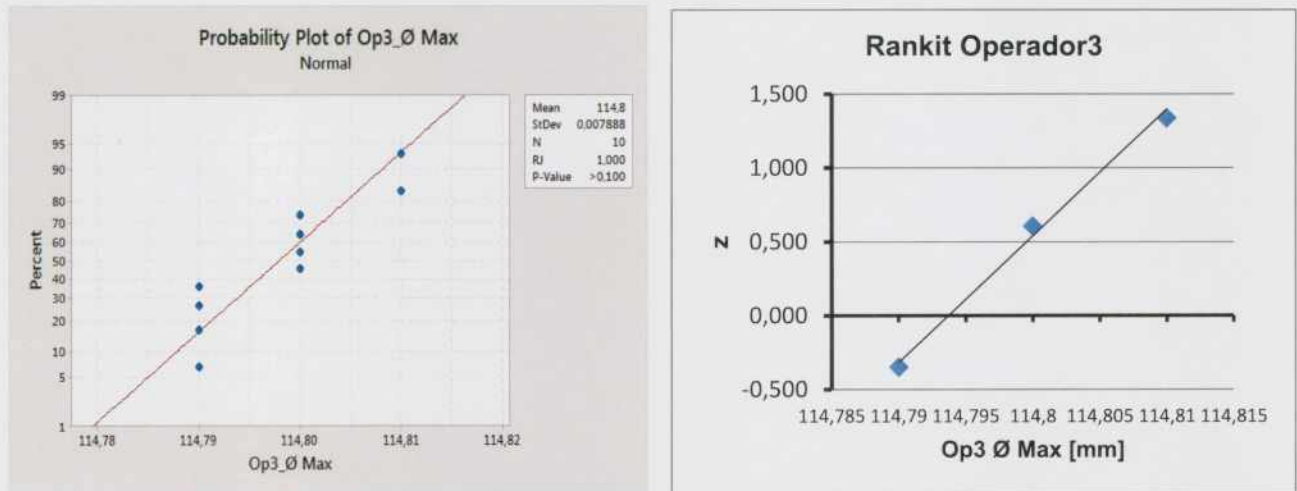


Figura 19 – Ryan-Joiner y Rankit de Operador 3 - Diámetro Máximo

Tabla 16 - Valores de Operador 4 - Diámetro Máximo para Rankit

Medición	Op4 Ø Max [mm]	Frecuencia acumulada	Normalizado	Z
8	114,75	1	0,091	-1,335
6	114,76	3	0,273	-0,605
9	114,76	3	0,273	-0,605
2	114,77	6	0,545	0,114
7	114,77	6	0,545	0,114
10	114,77	6	0,545	0,114
1	114,78	8	0,727	0,605
3	114,78	8	0,727	0,605
5	114,80	9	0,818	0,908
4	114,82	10	0,909	1,335

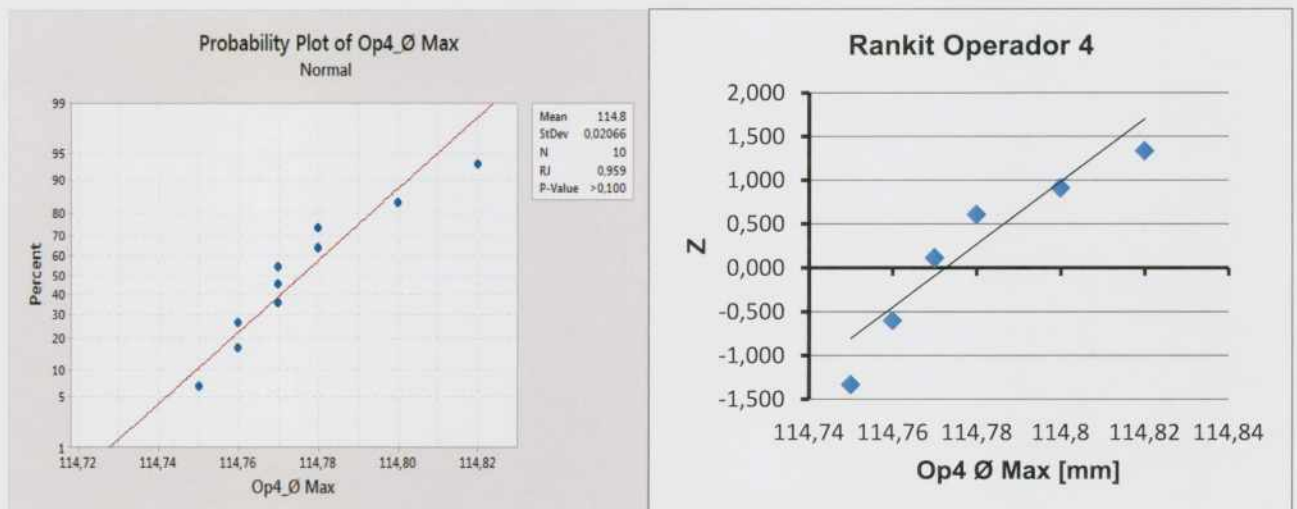


Figura 20 – Ryan-Joiner y Rankit de Operador 4 - Diámetro Máximo

Tabla 17 - Valores de Operador 5 - Diámetro Máximo para Rankit

Medición	Op5_Ø Max [mm]	Frecuencia acumulada	Normalizado	Z
5	114,78	1	0,167	-0,967
4	114,79	2	0,333	-0,431
1	114,80	5	0,833	0,967
2	114,80	5	0,833	0,967
3	114,80	5	0,833	0,967

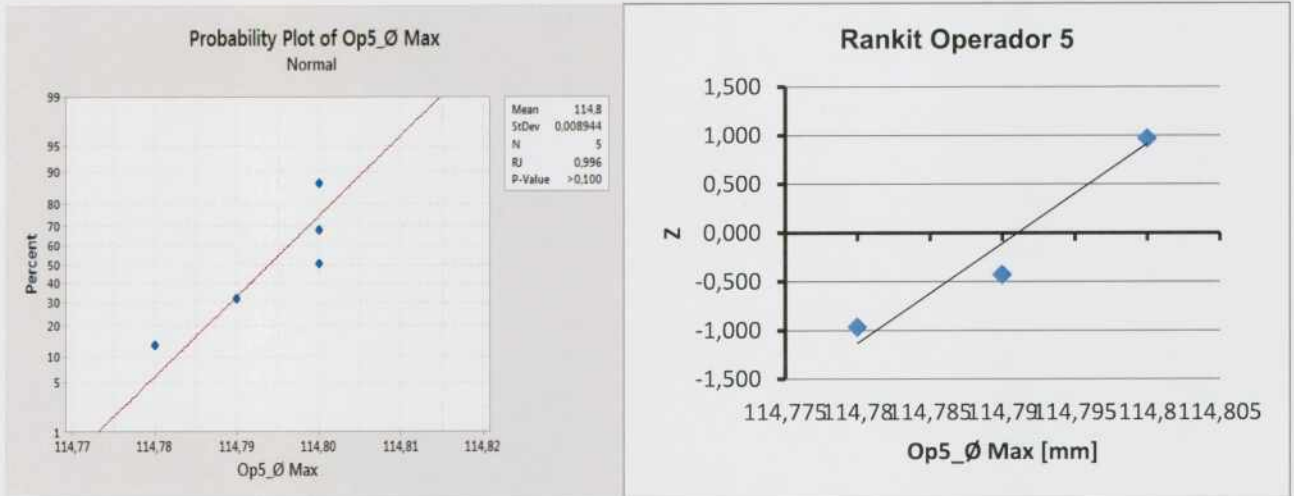


Figura 21 – Ryan-Joiner y Rankit de Operador 5 - Diámetro Máximo

Tabla 18 - Valores de Operador 6 - Diámetro Máximo para Rankit

Medición	Op6_Ø Max [mm]	Frecuencia acumulada	Normalizado	Z
3	114,80	1	0,250	-0,674
2	114,82	2	0,500	0,000
1	114,86	3	0,750	0,674

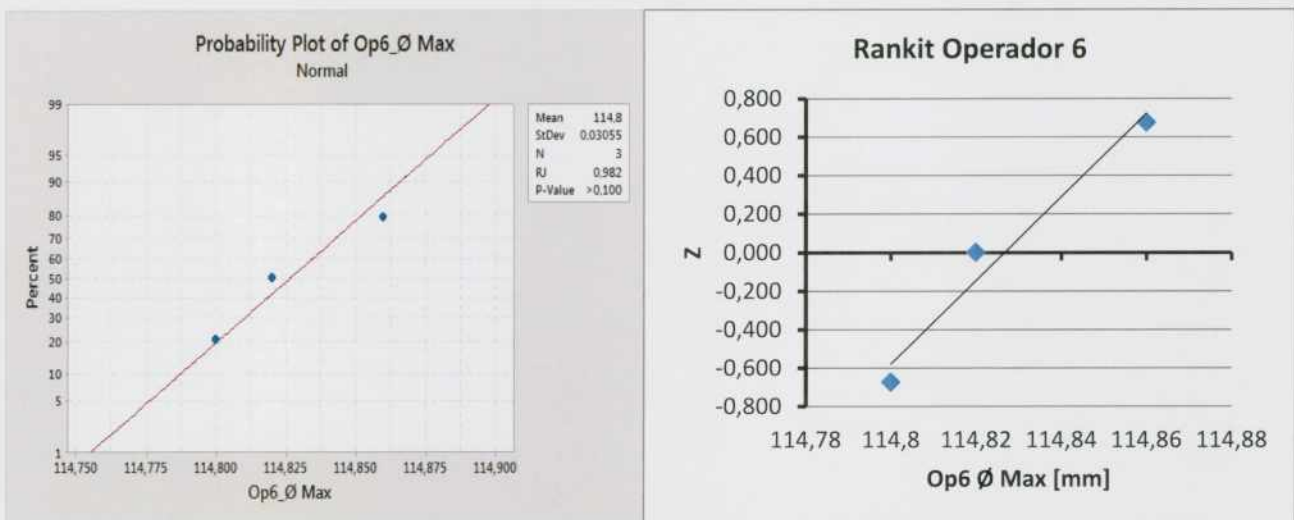


Figura 22 – Ryan-Joiner y Rankit de Operador 6 - Diámetro Máximo

Dado que las distribuciones se pueden considerar normales (mediante la distribución de los puntos en los gráficos y dado que aplicando el test de Ryan-Joiner siempre se ha obtenido  $P > 0.10$ ), se procede a realizar un análisis de ANOVA empleando Excel ®.

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Op1_Ø Max	10	1148,03	114,803	6,7778E-05
Op2_Ø Max	10	1147,98	114,798	4E-05
Op3_Ø Max	10	1147,98	114,798	6,2222E-05
Op4_Ø Max	10	1147,76	114,776	0,00042667
Op5_Ø Max	5	573,97	114,794	8E-05
Op6_Ø Max	3	344,48	114,826667	0,00093333

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,00741	5	0,001482	8,23696515	1,7236E-05	2,43769264
Dentro de los grupos	0,00755667	42	0,00017992			
Total	0,01496667	47				

El valor de la ecuación de Fisher es 8,24 con una probabilidad asociada de  $1,7 \cdot 10^{-5}$ . Dado que es menor que 0,05, indica que la hipótesis nula (no existe diferencia entre las medias de los operadores) debe ser rechazada con un 95% nivel de confianza y por eso concluir que hay diferencias significativas en las medias debido a los distintos operadores.

A partir de estos valores se puede calcular el desvío estándar de repetibilidad:

$$S_{\text{repetibilidad}} = \sqrt{0,00017992} = 0,013 \text{ mm}$$

El cuadrado medio entre grupos estima la combinación de la varianza de la medición y la varianza debida a los diferentes operadores (reproducibilidad), por lo tanto:

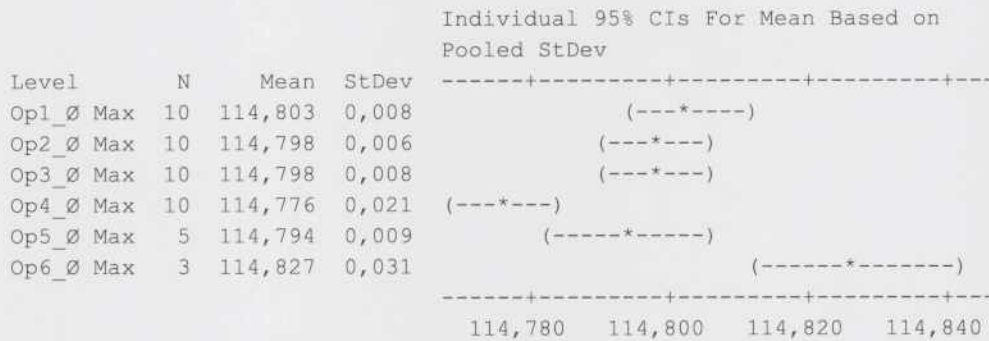
$$S_{\text{reproducibilidad}} = \sqrt{\frac{\overline{SS}_c - \overline{SS}_r}{n}} = \sqrt{\frac{0,001482 - 0,00017992}{3}} = 0,021 \text{ mm}$$

Verificando con Minitab ®

**One-way ANOVA: Op1\_Ø Max, Op2\_Ø Max, Op3\_Ø Max, Op4\_Ø Max, Op5\_Ø Max, Op6\_Ø Max**

Source	DF	SS	MS	F	P
Factor	5	0,007410	0,001482	8,24	0,000
Error	42	0,007557	0,000180		
Total	47	0,014967			

S = 0,01341 R-Sq = 49,51% R-Sq(adj) = 43,50%



Pooled StDev = 0.013

### 3.4.2.2 $\phi_{min}$

Tabla 19 - Valores de Operador 1 - Diámetro mínimo para Rankit

Medición	Op1_Ø min [mm]	Frecuencia acumulada	Normalizado	Z
1	114,76	2	0,182	-0,908
9	114,76	2	0,182	-0,908
2	114,77	6	0,545	0,114
4	114,77	6	0,545	0,114
7	114,77	6	0,545	0,114
10	114,77	6	0,545	0,114
3	114,78	10	0,909	1,335
5	114,78	10	0,909	1,335
6	114,78	10	0,909	1,335
8	114,78	10	0,909	1,335

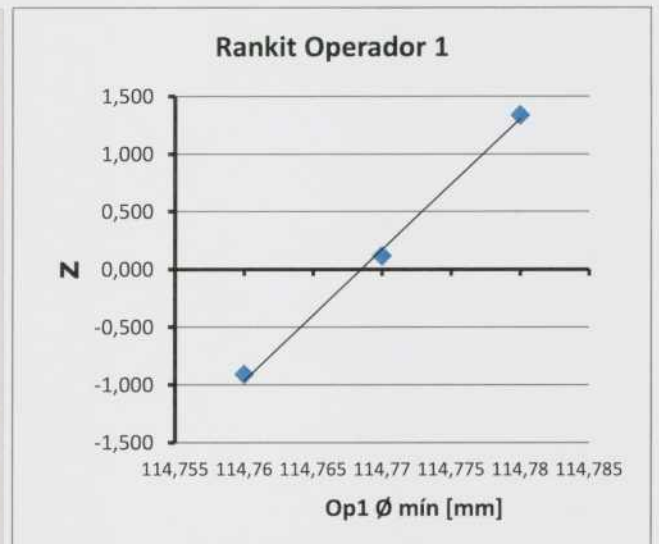
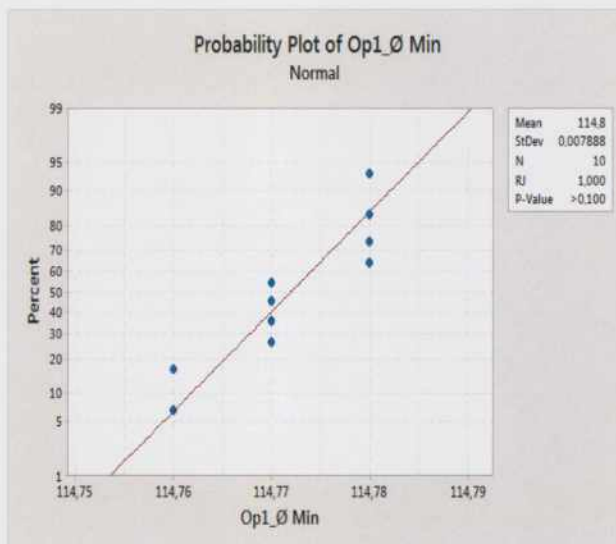


Figura 23 – Ryan-Joiner y Rankit de Operador 1 - Diámetro mínimo

Tabla 20 - Valores de Operador 2 - Diámetro mínimo para Rankit

Medición	Op2_Ø mín [mm]	Frecuencia acumulada	Normalizado	Z
10	114,75	1	0,091	-1,335
2	114,76	3	0,273	-0,605
5	114,76	3	0,273	-0,605
1	114,77	9	0,818	0,908
3	114,77	9	0,818	0,908
4	114,77	9	0,818	0,908
6	114,77	9	0,818	0,908
7	114,77	9	0,818	0,908
8	114,77	9	0,818	0,908
9	114,78	10	0,909	1,335

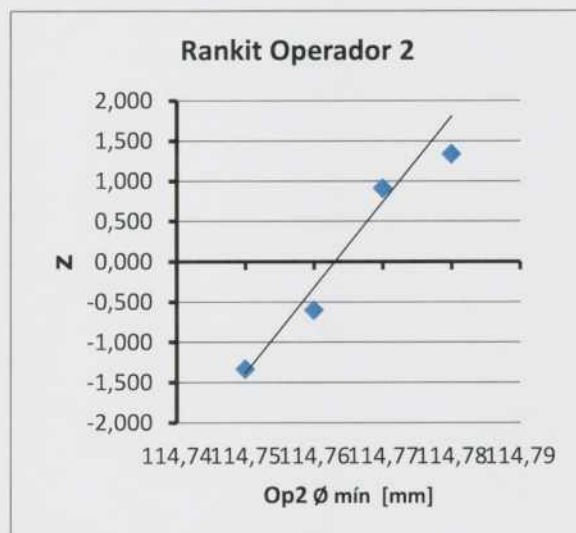
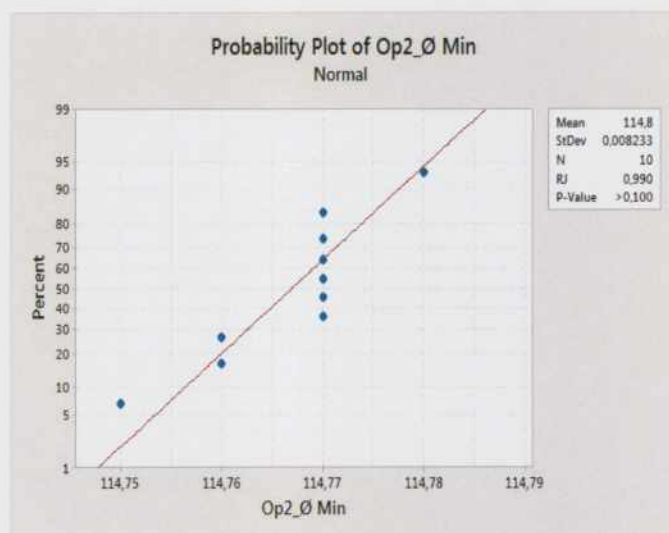


Figura 24 – Ryan-Joiner y Rankit de Operador 2 - Diámetro mínimo

Tabla 21- Valores de Operador 3 - Diámetro mínimo para Rankit

Medición	Op3_Ø mín [mm]	Frecuencia acumulada	Normalizado	Z
3	114,75	3	0,273	-0,605
4	114,75	3	0,273	-0,605
10	114,75	3	0,273	-0,605
1	114,76	6	0,545	0,114
6	114,76	6	0,545	0,114
9	114,76	6	0,545	0,114
2	114,77	10	0,909	1,335
5	114,77	10	0,909	1,335
7	114,77	10	0,909	1,335
8	114,77	10	0,909	1,335

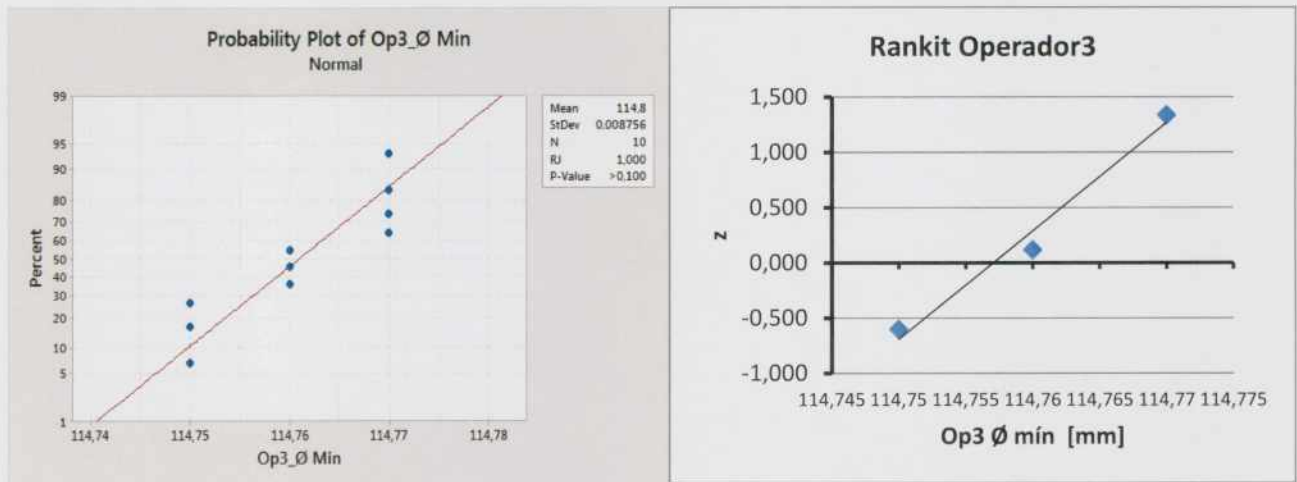


Figura 25 – Ryan-Joiner y Rankit de Operador 3 - Diámetro mínimo

Tabla 22 - Valores de Operador 4 - Diámetro mínimo para Rankit

Medición	Op4_Ø mín [mm]	Frecuencia acumulada	Normalizado	Z
1	114,71	1	0,091	-1,335
7	114,72	2	0,182	-0,908
6	114,73	4	0,364	-0,349
8	114,73	4	0,364	-0,349
2	114,74	7	0,636	0,349
9	114,74	7	0,636	0,349
10	114,74	7	0,636	0,349
3	114,75	9	0,818	0,908
5	114,75	9	0,818	0,908
4	114,78	10	0,909	1,335

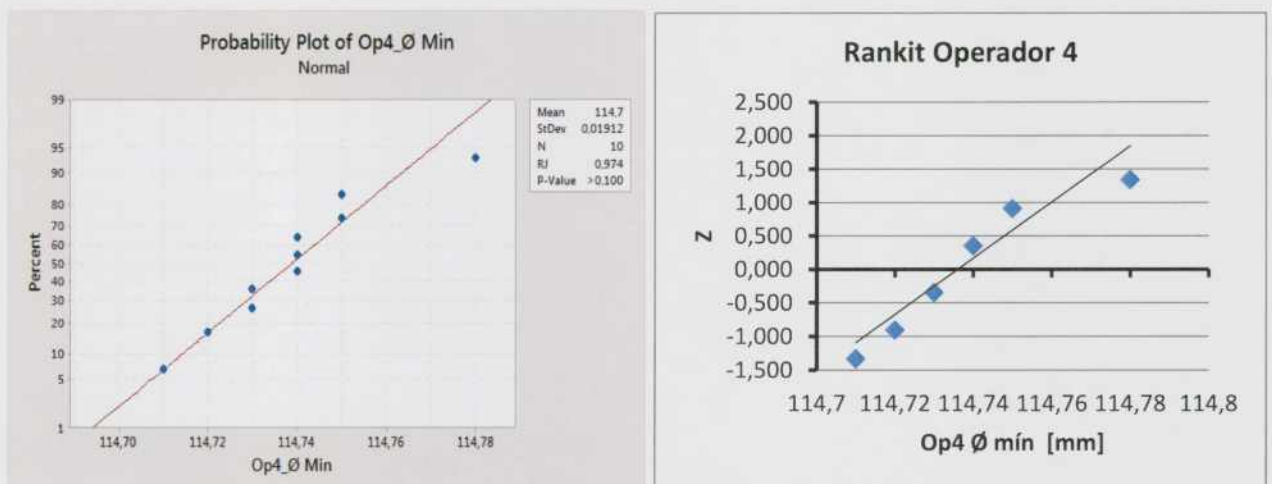


Figura 26 – Ryan-Joiner y Rankit de Operador 4 - Diámetro mínimo

Tabla 23 - Valores de Operador 5 - Diámetro mínimo para Rankit

Medición	Op5_Ø mín [mm]	Frecuencia acumulada	Normalizado	Z
3	114,75	1	0,167	-0,967
1	114,76	3	0,500	0,000
2	114,76	3	0,500	0,000
4	114,77	5	0,833	0,967
5	114,77	5	0,833	0,967



Figura 27 – Ryan-Joiner y Rankit de Operador 5 - Diámetro mínimo

Tabla 24 - Valores de Operador 6 - Diámetro mínimo para Rankit

Medición	Op6_Ø mín [mm]	Frecuencia acumulada	Normalizado	Z
1	114,77	2	0,500	0,000
3	114,77	2	0,500	0,000
2	114,78	3	0,750	0,674

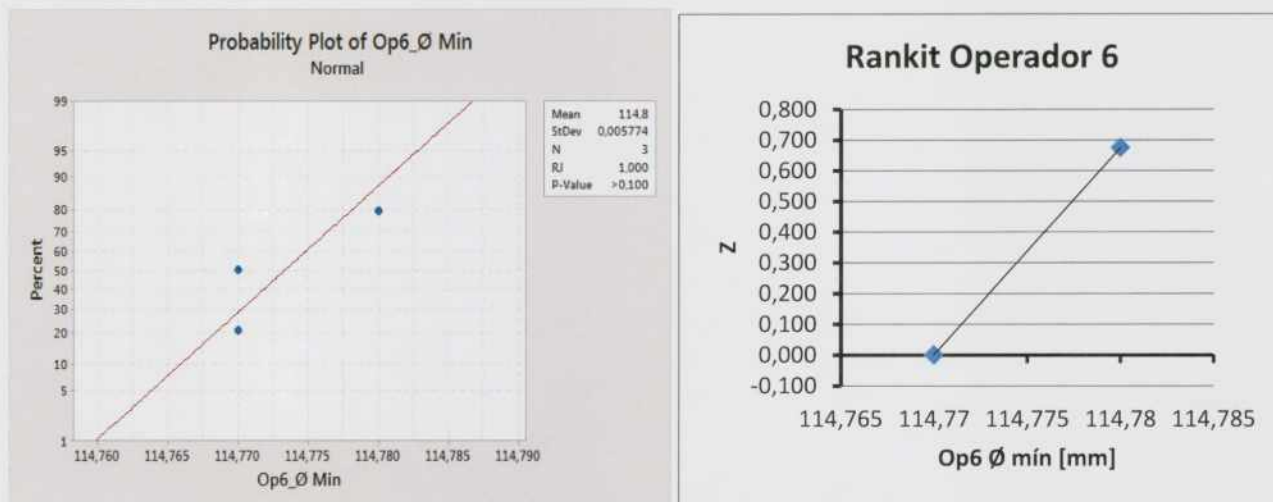


Figura 28 – Ryan-Joiner y Rankit de Operador 6 - Diámetro mínimo

En este caso también las distribuciones se pueden considerar normales (mediante la distribución de los puntos en los gráficos y dado que aplicando el test de Ryan-Joiner siempre se ha obtenido  $P > 0.10$ ). En base a esto, se procede a realizar un análisis de ANOVA empleando Excel®.

#### Análisis de varianza de un factor

##### RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Op1_Ø Min	10	1147,72	114,772	6,2222E-05
Op2_Ø Min	10	1147,67	114,767	6,7778E-05
Op3_Ø Min	10	1147,61	114,761	7,6667E-05
Op4_Ø Min	10	1147,39	114,739	0,00036556
Op5_Ø Min	5	573,81	114,762	7E-05
Op6_Ø Min	3	344,32	114,773333	3,3333E-05

##### ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,00687	5	0,001374	10,49873	1,3886E-06	2,4376927
Dentro de los grupos	0,0054967	42	0,00013087			
Total	0,0123667	47				

El valor de la ecuación de Fisher es 10.5 con una probabilidad asociada de  $1,4 \cdot 10^{-6}$ . Dado que es menor que 0.05, indica que la hipótesis nula (no existe diferencia entre las medias de los operadores) debe ser rechazada con un 95% nivel de confianza y por eso concluir que hay diferencias significativas en las medias debido a los distintos operadores.

A partir de estos valores se puede calcular el desvío estándar de repetibilidad:

$$S_{\text{repetibilidad}} = \sqrt{0,00013087} = 0,011 \text{ mm}$$

El cuadrado medio entre grupos estima la combinación de la varianza de la medición y la varianza debida a los diferentes operadores (reproducibilidad), por lo tanto:

$$S_{\text{reproducibilidad}} = \sqrt{\frac{\overline{SS}_c - \overline{SS}_r}{n}} = \sqrt{\frac{0,001374 - 0,00013087}{3}} = 0,020 \text{ mm}$$

3.4.2.3  $\tau_{M\acute{a}x}$

Tabla 25 - Valores de Operador 1 - Espesor Máximo para Rankit

Medición	Op1_t Max [mm]	Frecuencia acumulada	Normalizado	Z
1	5,04	2	0,182	-0,908
4	5,04	2	0,182	-0,908
3	5,05	4	0,364	-0,349
5	5,05	4	0,364	-0,349
2	5,06	10	0,909	1,335
6	5,06	10	0,909	1,335
7	5,06	10	0,909	1,335
8	5,06	10	0,909	1,335
9	5,06	10	0,909	1,335
10	5,06	10	0,909	1,335

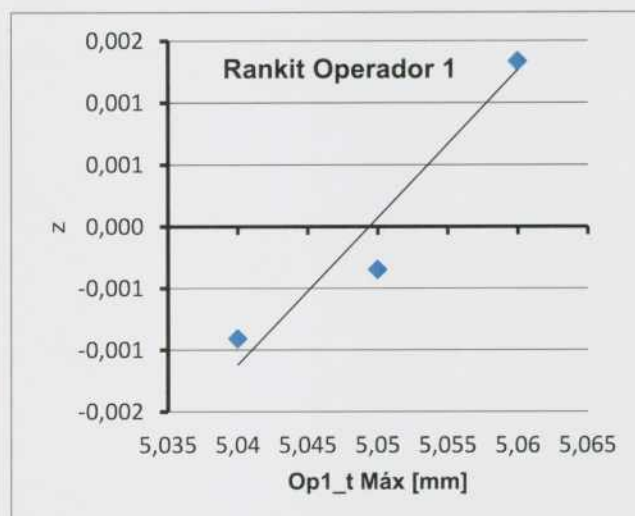
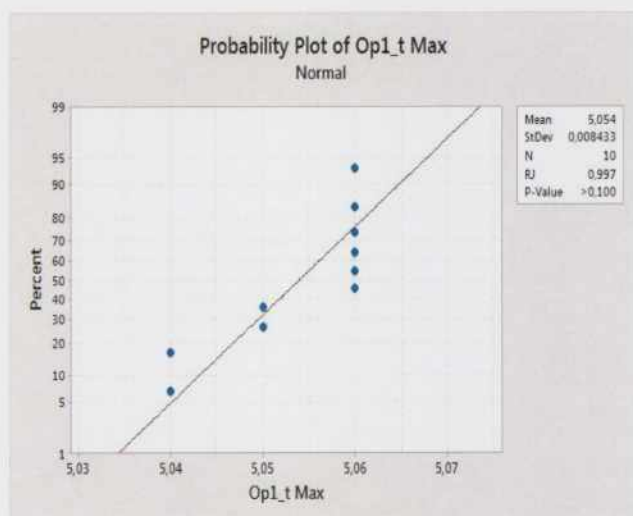


Figura 29 – Ryan-Joiner y Rankit de Operador 1 - Espesor Máximo

Tabla 26 - Valores de Operador 2 - Espesor Máximo para Rankit

Medición	Op2_t Max [mm]	Frecuencia acumulada	Normalizado	Z
3	5,05	6	0,545	0,114
4	5,05	6	0,545	0,114
6	5,05	6	0,545	0,114
8	5,05	6	0,545	0,114
9	5,05	6	0,545	0,114
10	5,05	6	0,545	0,114
1	5,06	8	0,727	0,605
5	5,06	8	0,727	0,605
2	5,07	10	0,909	1,335
7	5,07	10	0,909	1,335

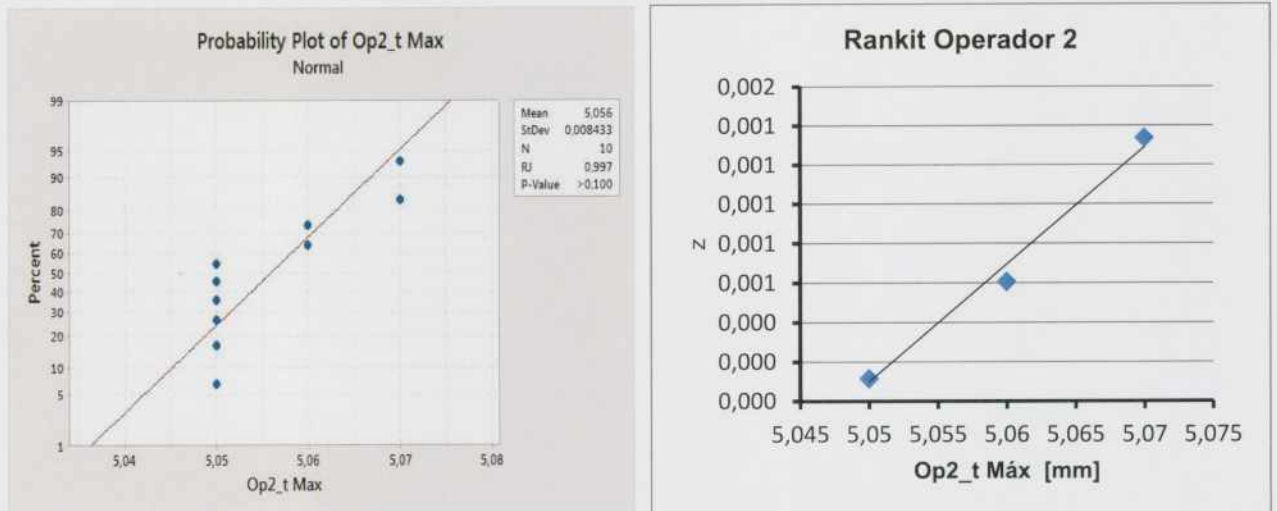


Figura 30 – Ryan-Joiner y Rankit de Operador 2 - Espesor Máximo

Tabla 27 - Valores de Operador 3 - Espesor Máximo para Rankit

Medición	Op3_t Max [mm]	Frecuencia acumulada	Normalizado	Z
4	5,04	1	0,091	-1,335
1	5,05	7	0,636	0,349
5	5,05	7	0,636	0,349
7	5,05	7	0,636	0,349
8	5,05	7	0,636	0,349
9	5,05	7	0,636	0,349
10	5,05	7	0,636	0,349
2	5,06	9	0,818	0,908
6	5,06	9	0,818	0,908
3	5,07	10	0,909	1,335

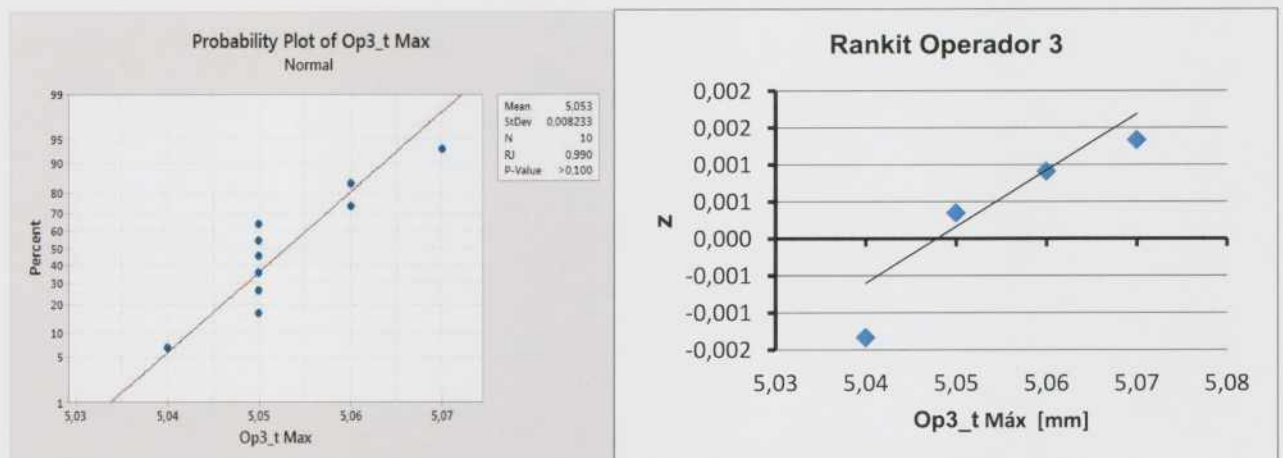


Figura 31 – Ryan-Joiner y Rankit de Operador 3 - Espesor Máximo

Tabla 28 - Valores de Operador 4 - Espesor Máximo para Rankit

Medición	Op4_t Max [mm]	Frecuencia acumulada	Normalizado	Z
2	5,03	1	0,091	-1,335
1	5,04	5	0,455	-0,114
3	5,04	5	0,455	-0,114
6	5,04	5	0,455	-0,114
9	5,04	5	0,455	-0,114
7	5,05	7	0,636	0,349
10	5,05	7	0,636	0,349
4	5,06	10	0,909	1,335
5	5,06	10	0,909	1,335
8	5,06	10	0,909	1,335

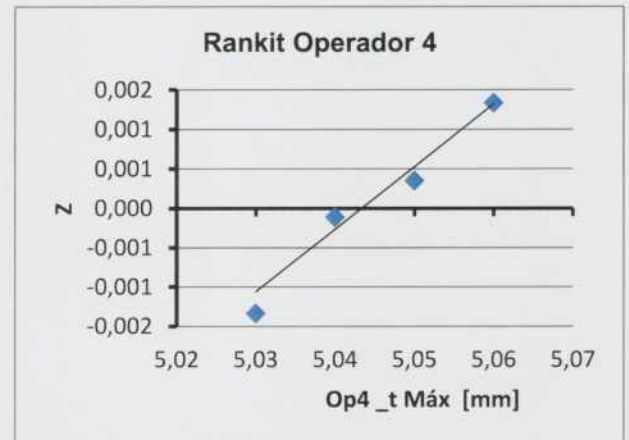
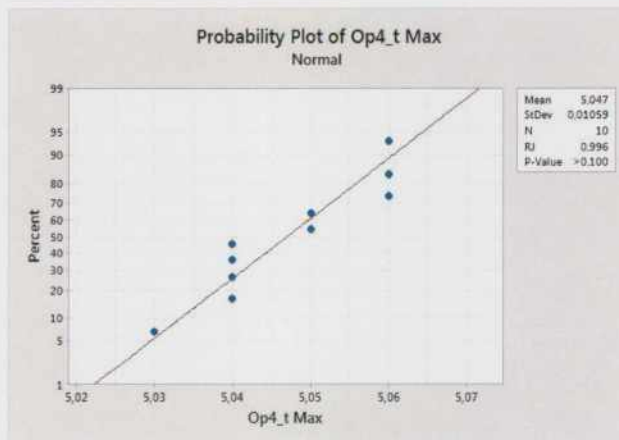


Figura 32 – Ryan-Joiner y Rankit de Operador 4 - Espesor Máximo

Dado que las distribuciones se pueden considerar normales (mediante la distribución de los puntos en los gráficos y dado que aplicando el test de Ryan-Joiner siempre se ha obtenido  $P > 0.10$ ), se procede a realizar un análisis de ANOVA empleando Excel ®

Análisis de varianza de un factor

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Op1_t Max	10	50,54	5,054	7,1111E-05
Op2_t Max	10	50,56	5,056	7,1111E-05
Op3_t Max	10	50,53	5,053	6,7778E-05
Op4_t Max	10	50,47	5,047	0,00011222

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,00045	3	0,00015	1,862069	0,15349363	2,86626555
Dentro de los grupos	0,0029	36	8,0556E-05			
Total	0,00335	39				

El valor de la ecuación de Fisher es 1,9 con una probabilidad asociada de 0,15. Dado que es mayor que 0.05, indica que la hipótesis nula (no existe diferencia entre las medias de los operadores) debe ser aceptada con un 95% nivel de confianza y por eso concluir que no hay diferencias significativas en las medias debido a los distintos operadores.

A partir de estos valores se puede calcular el desvío estándar de repetibilidad:

$$s_{\text{repetibilidad}} = \sqrt{8,0556 \cdot 10^{-5}} = 0,0090 \text{ mm}$$

El cuadrado medio entre grupos estima la combinación de la varianza de la medición y la varianza debida a los diferentes operadores (reproducibilidad), por lo tanto

$$s_{\text{reproducibilidad}} = \sqrt{\frac{\overline{SS}_c - \overline{SS}_r}{n}} = \sqrt{\frac{0,00015 - 8,0556 \cdot 10^{-5}}{10}} = 0,0026 \text{ mm}$$

### 3.4.2.4 $\tau_{\text{mín}}$

Tabla 29 - Valores de Operador 1 - Espesor mínimo para Rankit

Medición	Op1_t mín [mm]	Frecuencia acumulada	Normalizado	Z
1	5,00	6	0,545	0,114
2	5,00	6	0,545	0,114
4	5,00	6	0,545	0,114
5	5,00	6	0,545	0,114
6	5,00	6	0,545	0,114
9	5,00	6	0,545	0,114
3	5,01	10	0,909	1,335
7	5,01	10	0,909	1,335
8	5,01	10	0,909	1,335
10	5,01	10	0,909	1,335

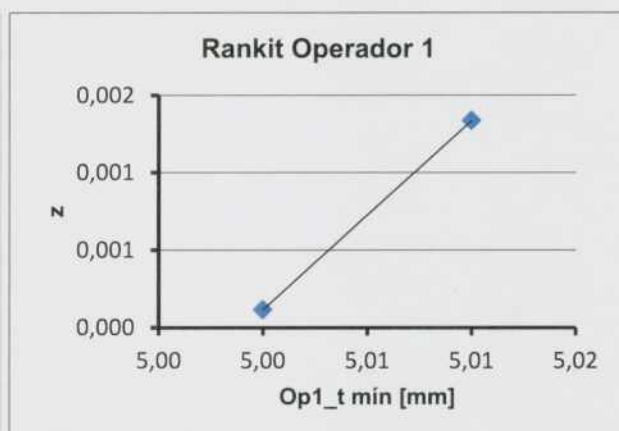
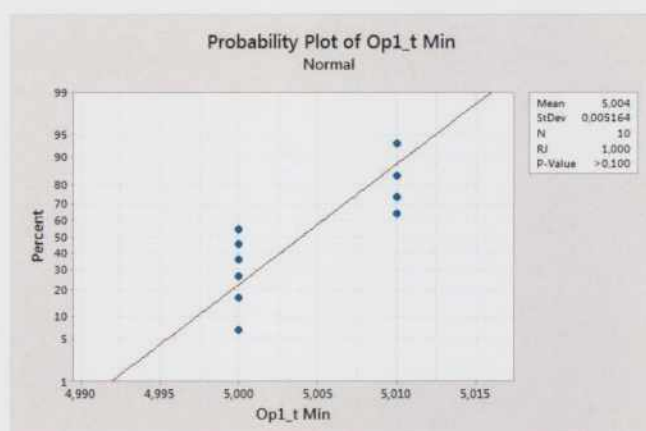


Figura 33 – Ryan-Joiner y Rankit de Operador 1 - Espesor mínimo

Tabla 30 - Valores de Operador 2 - Espesor mínimo para Rankit

Medición	Op2_t min [mm]	Frecuencia acumulada	Normalizado	Z
3	5,00	4	0,364	-0,349
4	5,00	4	0,364	-0,349
7	5,00	4	0,364	-0,349
10	5,00	4	0,364	-0,349
1	5,01	6	0,545	0,114
6	5,01	6	0,545	0,114
2	5,02	10	0,909	1,335
5	5,02	10	0,909	1,335
8	5,02	10	0,909	1,335
9	5,02	10	0,909	1,335

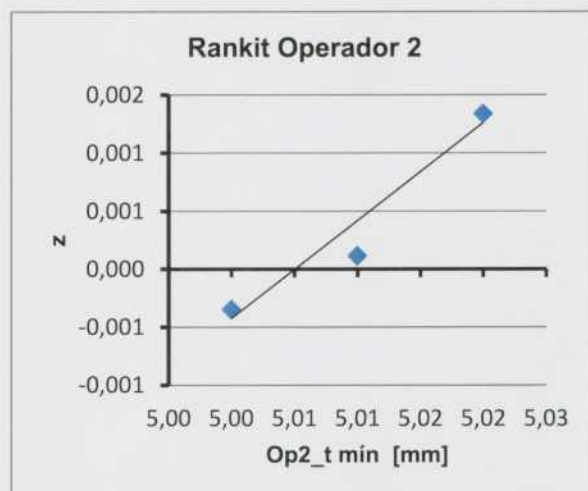
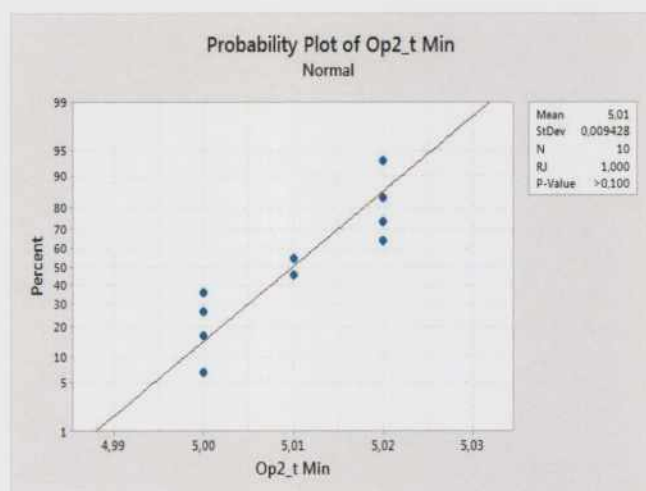


Figura 34 – Ryan-Joiner y Rankit de Operador 2 - Espesor mínimo

Tabla 31 - Valores de Operador 3 - Espesor mínimo para Rankit

Medición	Op3_t min [mm]	Frecuencia acumulada	Normalizado	Z
2	5,00	1	0,091	-1,335
3	5,01	6	0,545	0,114
4	5,01	6	0,545	0,114
5	5,01	6	0,545	0,114
9	5,01	6	0,545	0,114
10	5,01	6	0,545	0,114
1	5,02	10	0,909	1,335
6	5,02	10	0,909	1,335
7	5,02	10	0,909	1,335
8	5,02	10	0,909	1,335

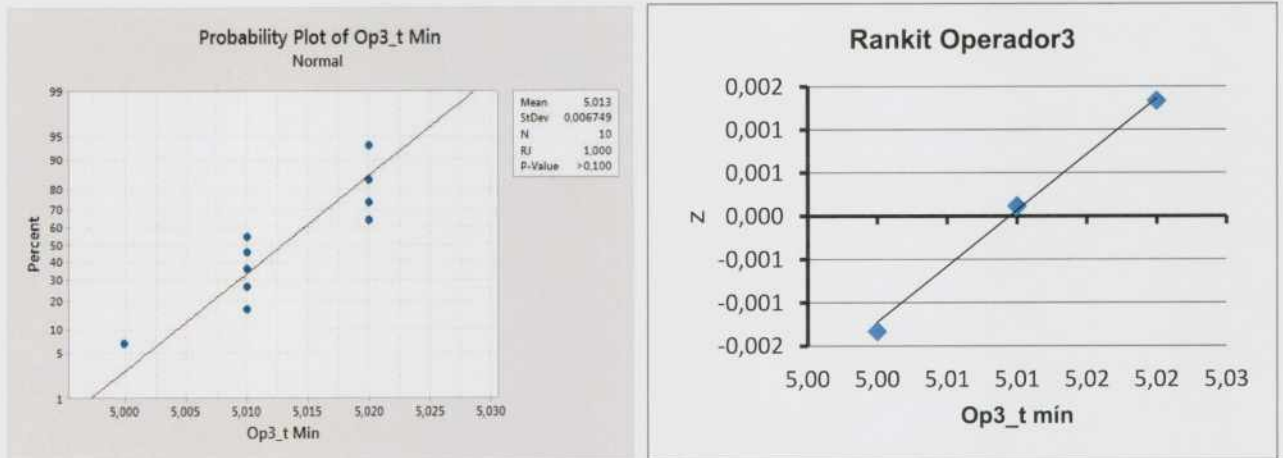


Figura 35 – Ryan-Joiner y Rankit de Operador 3 - Espesor mínimo

Tabla 32 - Valores de Operador 4 - Espesor mínimo para Rankit

Medición	Op4_t min [mm]	Frecuencia acumulada	Normalizado	Z
1	5,01	10	0,909	1,335
2	5,01	10	0,909	1,335
3	5,01	10	0,909	1,335
4	5,01	10	0,909	1,335
5	5,01	10	0,909	1,335
6	5,01	10	0,909	1,335
7	4,96	1	0,091	-1,335
8	4,97	2	0,182	-0,908
9	5,01	10	0,909	1,335
10	5,01	10	0,909	1,335

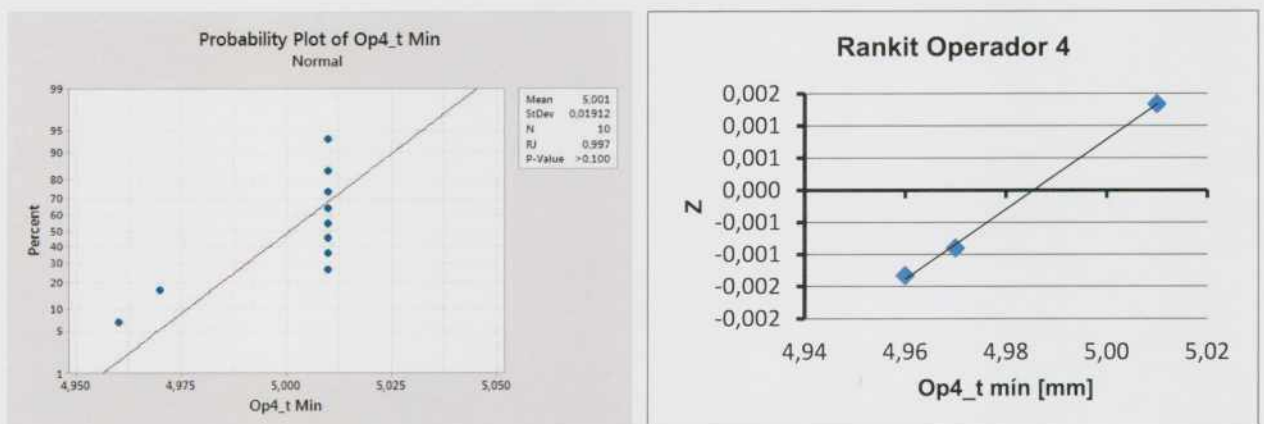


Figura 36 – Ryan-Joiner y Rankit de Operador 4 - Espesor mínimo

Análisis de varianza de un factor

**RESUMEN**

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
Op1_t Min	10	50,04	5,004	2,6667E-05
Op2_t Min	10	50,1	5,01	8,8889E-05
Op3_t Min	10	50,13	5,013	4,5556E-05
Op4_t Min	10	50,01	5,001	0,00036556

**ANÁLISIS DE VARIANZA**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0,0009	3	0,0003	2,2784810	0,09605729	2,86626555
Dentro de los grupos	0,00474	36	0,00013167			
Total	0,00564	39				

El valor de la ecuación de Fisher es 2,3 con una probabilidad asociada de 0,096. Dado que es mayor que 0.05 (aunque no excesivamente), indica que la hipótesis nula (no existe diferencia entre las medias de los operadores) debe ser aceptada con un 95% nivel de confianza y por eso concluir que no hay diferencias significativas en las medias debido a los distintos operadores.

A partir de estos valores se puede calcular el desvío estándar de repetibilidad:

$$S_{\text{repetibilidad}} = \sqrt{0,00013167} = 0,011 \text{ mm}$$

El cuadrado medio entre grupos estima la combinación de la varianza de la medición y la varianza debida a los diferentes operadores (reproducibilidad), por lo tanto

$$S_{\text{reproducibilidad}} = \sqrt{\frac{SS_c - \overline{SS}_r}{n}} = \sqrt{\frac{0,0003 - 0,00013167}{10}} = 0,0041 \text{ mm}$$

### 3.4.3 Norma ISO 5725-2

Se seguirán los métodos de cálculo indicados en la norma 5725-2:1994 [10], con las siguientes aplicaciones al caso de estudio:

p: operadores (i=1, 2, 3, 4, 5, 6)

q: niveles (j=1, 2, 3, 4) Los niveles corresponden a los  $\phi_{Máx}$ ,  $\phi_{mín}$ ,  $\tau_{Máx}$ ,  $\tau_{mín}$

$n_{ij}$  = número de resultados en la célula para el operario i al nivel j

$y_{ijk}$  = cada uno de los resultados de la medición (k=1,2,  $n_{ij}$ )

$p_j$  es el número de operarios reportando al menos un resultado de medición al nivel j, luego de haber eliminado cualquier resultado de medición determinado como fuera de límites (outlier) o erróneo.

La media de los resultados, según la ecuación 2 de la norma se calcula:

$$\bar{y}_{ij} = \frac{1}{n_{ij}} \sum_{k=1}^{n_{ij}} y_{ijk}$$

Tabla 33 – Media de Operadores

Media Operador	$\phi_{Máx}$	$\phi_{mín}$	$\tau_{Máx}$	$\tau_{mín}$
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	114,803	114,772	5,054	5,004
2	114,798	114,767	5,056	5,01
3	114,798	114,761	5,053	5,013
4	114,776	114,739	5,047	5,001
5	114,794	114,762		
6	114,827	114,773		

Desvío por operador

$$s_{ij} = \sqrt{\frac{1}{n_{ij} - 1} \sum_{k=1}^{n_{ij}} [y_{ijk} - \bar{y}_{ij}]^2}$$

Tabla 34 – Desvío estándar de operadores

Desvío Operador	$\phi_{Máx}$	$\phi_{mín}$	$\tau_{Máx}$	$\tau_{mín}$
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1	0,00823	0,00789	0,00843	0,00516
2	0,00632	0,00823	0,008434	0,00943
3	0,00789	0,00876	0,00823	0,00675
4	0,0207	0,0191	0,0106	0,0191
5	0,0089	0,00837		
6	0,0306	0,00577		

#### 3.4.3.1 Estudio de consistencia y valores fuera de límites (outliers)

##### 3.4.3.1.1 Técnica de Consistencia gráfica

Se emplearan los estadígrafos h y k de Mandel

El estadígrafo h, que indica la consistencia entre operadores (“between-laboratory”)

$$h_{ij} = \frac{\bar{y}_{ij} - \bar{y}_j}{\sqrt{\frac{1}{p_j - 1} \sum_{i=1}^{p_j} [\bar{y}_{ij} - \bar{y}_j]^2}}$$

Siendo

$$\bar{y}_j = \frac{\sum_{k=1}^p n_{ij} \bar{y}_{ij}}{\sum_{i=1}^p n_{ij}}$$

Tabla 35 -  $h_{ij}$  de operadores

$h_{ij}$ de operadores	$\phi_{Máx}$	$\phi_{mín}$	$\tau_{Máx}$	$\tau_{mín}$
1	0,427046511	0,884431614	0,38729833	-0,54772256
2	0,129107085	0,488417458	0,90369611	0,547722558
3	0,129107085	0,013200472	0,12909944	1,095445115
4	-1,18182639	-1,72926181	-1,42009389	-1,09544512
5	-0,10924446	0,092403303		
6	1,837293127	0,990035388		

Se emplearon los valores de las tablas 6 y 7 de la norma 5725-2:1994 con las siguientes consideraciones:

p=6, n=10 siendo h1%=1,87 h5%=1,66

p=4, n=10 siendo h1%=1,49 h5%=1,42

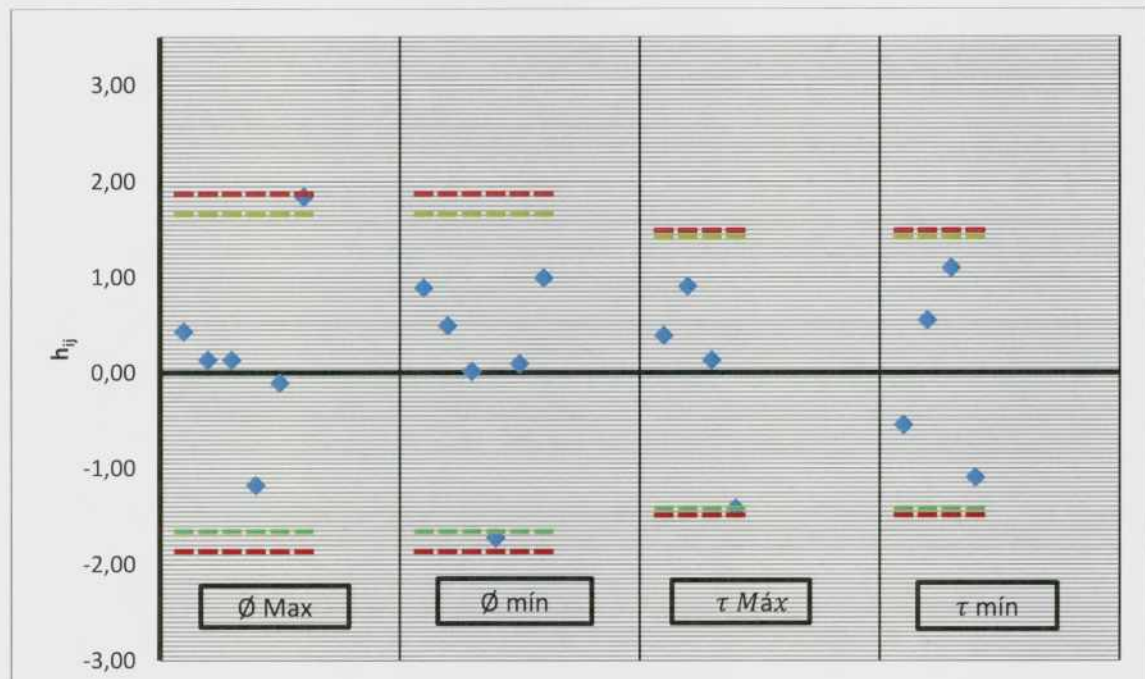


Figura 37- Gráfico de  $h_{ij}$

El estadígrafo k indica la consistencia de cada operador (“within-laboratory”)

$$k_{ij} = \frac{s_{ij} \sqrt{p_j}}{\sqrt{\sum s_{ij}^2}}$$

Tabla 36 -  $k_{ij}$  de Operadores

$k_{ij}$ operador	$\phi_{Máx}$	$\phi_{mín}$	$\tau_{Máx}$	$\tau_{mín}$
1	0,502581328	0,743391942	0,93955235	0,45003516
2	0,386093671	0,775869631	0,93955235	0,82164803
3	0,481543412	0,825179406	0,91726731	0,588210473
4	1,26097665	1,801863071	1,18029803	1,666244673
5	0,546018906	0,788486225		
6	1,865009616	0,544107188		

Se emplearon los valores de las tablas 6 y 7 de la norma 5725-2:1994 con las siguientes consideraciones:

p=6, n=10 siendo  $k_{1\%}=1,47$   $k_{5\%}=1,33$

p=4, n=10 siendo  $k_{1\%}=1,43$   $k_{5\%}=1,31$

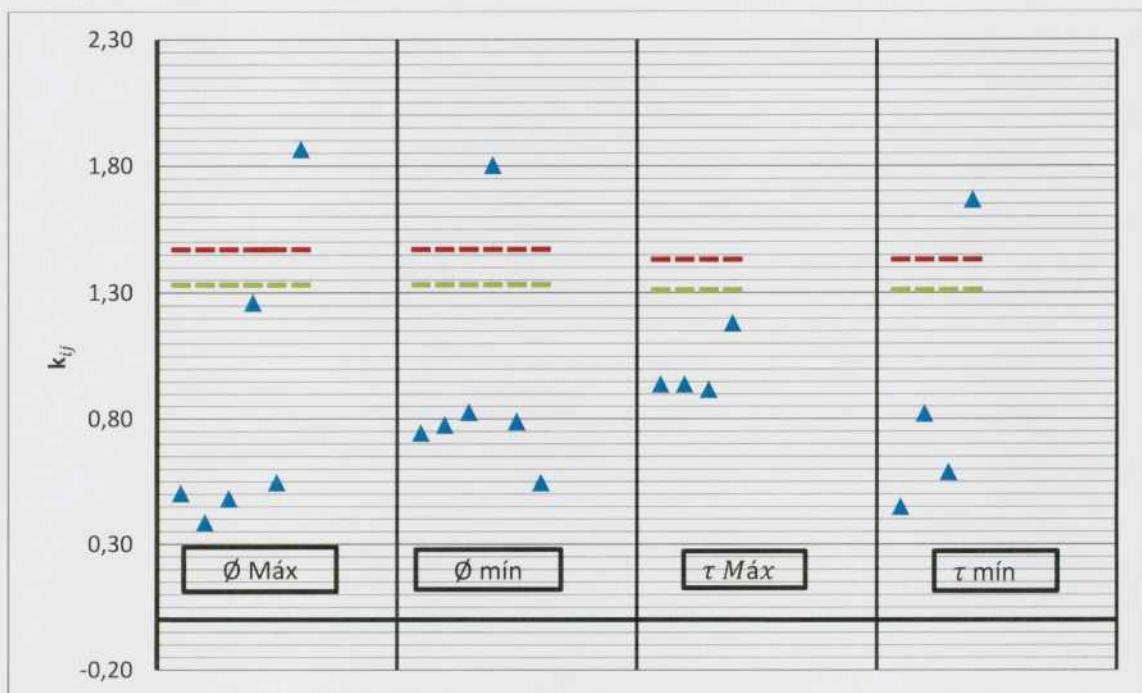


Figura 38- Gráfico de  $k_{ij}$

De acuerdo a lo indicado en 7.3.5 de la norma se concluye que el operador 4 tiene una baja repetibilidad, lo que se evidencia en el  $\phi_{Máx}$  y el  $\phi_{mín}$ . Asimismo presenta una medición irregular, evidenciado en  $\tau_{mín}$  y parcialmente en  $\tau_{Máx}$ .

El caso del operador 6 es distinto, ya que en el caso del  $\phi_{mín}$  es correcto pero el  $\phi_{Máx}$  indicaría que esos datos deben ser investigados. Dado que el Operador 6 solo efectuó 3 mediciones, una causa posible es la falta de mediciones adicionales para estar en concordancia con el resto de los operadores.

De acuerdo a los criterios de 7.3.1.6 de la norma, no hay razones para considerar cuestionables al resto de las mediciones.

Calculando nuevamente el estadígrafo h sin los operadores 4 y 6 los resultados son los siguientes:

Tabla 37 -  $h_{ij}$  filtrado

$h_{ij}$ de operadores	$\phi_{M\acute{a}x}$	$\phi_{m\acute{i}n}$	$\tau_{M\acute{a}x}$	$\tau_{m\acute{i}n}$
1	1,1043	1,1767	-0,2182	-1,09108945
2	-0,2285	0,1961	1,0911	0,21821789
3	-0,2285	-0,9806	-0,8729	0,87287156
4				
5	-1,2947	-0,7845		
6				

Se emplearon los valores de las tablas 6 y 7 de la norma 5725-2:1994 con las siguientes consideraciones:

$p=4, n=10$  siendo  $h_{1\%}=1.49$   $h_{5\%}=1.42$

$p=3, n=10$  siendo  $h_{1\%}=1.15$   $h_{5\%}=1.15$

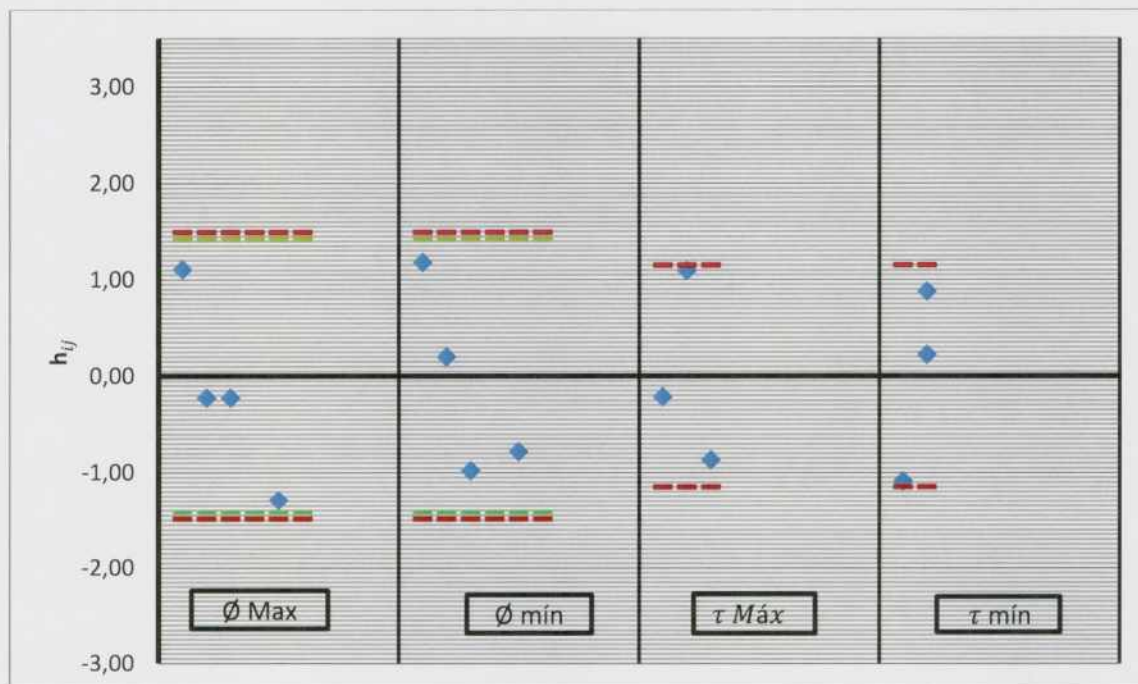


Figura 39- Gráfico de  $h_{ij}$

Calculando nuevamente el estadígrafo k sin los operadores 4 y 6 los resultados son los siguientes:

Tabla 38 -  $k_{ij}$  filtrado

$k_{ij}$ operador	$\phi_{M\acute{a}x}$	$\phi_{m\acute{i}n}$	$\tau_{M\acute{a}x}$	$\tau_{m\acute{i}n}$
1	1,0414	0,9485	1,0079	0,70466426
2	0,8000	0,9899	1,0079	1,28653504
3	0,9978	1,0528	0,9840	0,92101893
4				
5	1,1314	1,0060		
6				

Se emplearon los valores de las tablas 6 y 7 de la norma 5725-2:1994 con las siguientes consideraciones:

$p=4$ ,  $n=10$  siendo  $k_{1\%}=1.43$   $k_{5\%}=1.31$

$p=3$ ,  $n=10$  siendo  $k_{1\%}=1.39$   $k_{5\%}=1.29$

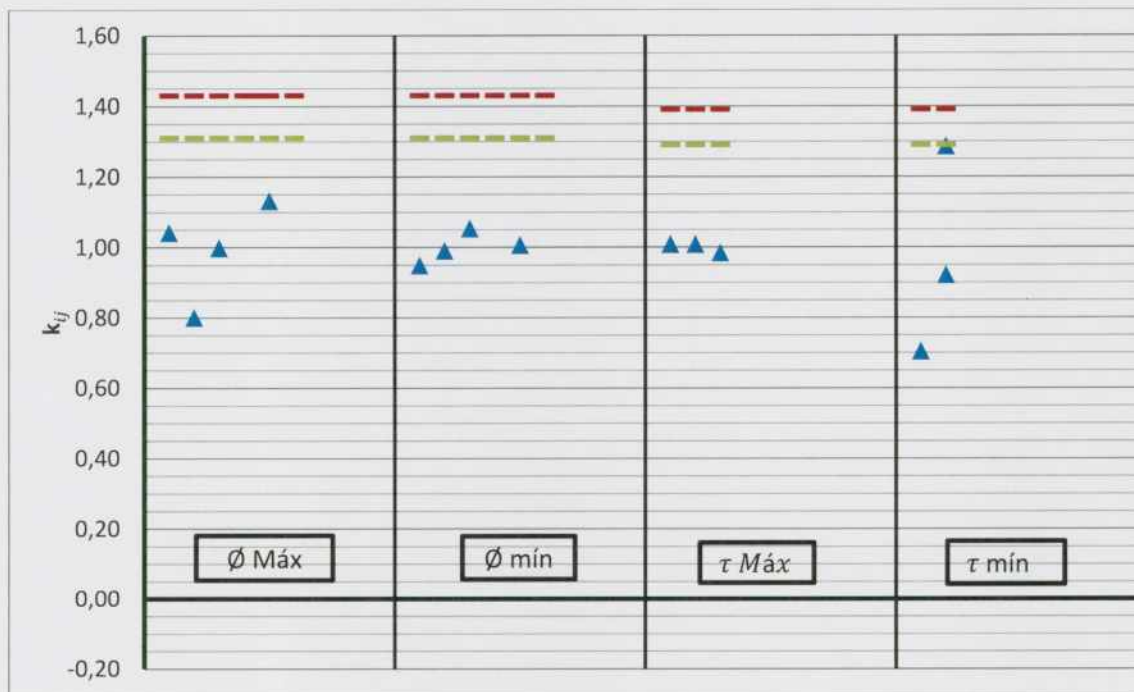


Figura 40- Gráfico de  $k_{ij}$  (filtrado)

#### 3.4.3.1.2 Técnicas numéricas de detección de outliers

##### Test de Cochran

Dado que la norma asume que solo existen pequeñas diferencias en las varianzas de cada operador ("laboratorio" para la norma) en 7.3.3.1 de la norma se realiza este test para chequear la validez de esta hipótesis

$$C = \frac{s_{m\acute{a}x}^2}{\sum_{i=1}^p s_i^2}$$

Siendo  $p=6$ , número de desviaciones estándar para diámetros y  $p=4$ , número de desviaciones estándar para espesores.

Como se indica en 7.3.3.3 de la norma, si bien el test de Cochran se aplica estrictamente cuando todas las desviaciones estándar se derivan del mismo número (n) de resultados, el criterio se puede emplear utilizando el n de la mayoría de los resultados

Tabla 39 – Test de Cochran de la totalidad de las mediciones

	$\phi_{Máx}$	$\phi_{mín}$	$\tau_{Máx}$	$\tau_{mín}$
Cochran	0,57971	0,54112	0,34828	0,69409
1%	0,4229	0,4229	0,5702	0,5702
5%	0,3682	0,3682	0,5017	0,5017

Los límites se calcularon empleando p=6 y n=10 (en tabla [13] k=6; v=grados de libertad=n-1=9) para diámetros y p=4 n=10 (en tabla [13] k=4; v=grados de libertad=n-1=9) para espesores

Por lo tanto según indica la norma de referencia en 7.3.3.2 c, existe evidencia de la presencia de un valor fuera de límites (outlier)

Suponiendo que la causa de los valores fuera de límites, en el caso de los diámetros es solo el operador 6, se elimina a este (por el método de medición, se considera correcto eliminar las determinaciones de los dos diámetros, dado que surgen del mismo proceso de medición) y se procede nuevamente a calcular los valores del test de Cochran. Se procede de modo similar con el operador 4 en el caso de los espesores.

Tabla 40 - Test de Cochran de mediciones filtradas

	$\phi_{Máx}$	$\phi_{mín}$	$\tau_{Máx}$	$\tau_{mín}$
Cochran	0,630541872	0,569204152	0,33862434	0,551724138
1%	0,4854	0,4854	0,6912	0,6912
5%	0,4241	0,4241	0,6167	0,6167

Los límites se calcularon siendo p=5y n=10 (en tabla [13] k=5; v=grados de libertad=n-1=9) para los diámetros y p=3 y n=10 (en tabla [13] k=3; v=grados de libertad=n-1=9) para los espesores

Eliminando también los valores de diámetro medidos por el operador 4

Tabla 41 - Test de Cochran de mediciones filtradas II

	$\phi_{Máx}$	$\phi_{mín}$	$\tau_{Máx}$	$\tau_{mín}$
Cochran	0,32	0,277108434	0,33862434	0,551724138
1%	0,5702	0,5702	0,6912	0,6912
5%	0,5017	0,5017	0,6167	0,6167

Los límites se calcularon siendo p=4 y n=10 (en tabla [13] k=4; v=grados de libertad=n-1=9) para los diámetros y p=3 y n=10 (en tabla [13] k=3; v=grados de libertad=n-1=9) para los espesores

### Test de Grubbs

La norma en 7.3.4.3.b indica aplicar el test de Grubbs a valores sospechosos obtenidos del test de Cochran. En este caso los valores no resultaron sospechosos, sino valores fuera de límites (outliers). De todos modos, y a modo de verificación, se procederá a aplicar el test de Grubbs al valor de  $\phi_{Máx}$

$$\bar{x} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \bar{y}_{ij} = 114,799 \text{ mm}$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{p-1} \sum_{i=1}^p (\bar{y}_{ij} - \bar{X})^2} = 0,016 \text{ mm}$$
$$G_p = \frac{(x_p - \bar{x})}{s} = \frac{114,8266667 - 114,7992778}{0,016352257} = 1,675$$

Siendo los valores críticos con p=6 1%: 1,973 5%: 1,887

Se concluye en este caso que no hay problemas en los valores promedios, sino en la dispersión

Seguidamente se procederá a emplear el test de Grubbs al valor de  $\phi_{\min}$

$$\bar{x} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \bar{y}_{ij} = 114,762 \text{ mm}$$
$$s = \sqrt{\frac{1}{p-1} \sum_{i=1}^p (\bar{y}_{ij} - \bar{X})^2} = 0,013 \text{ mm}$$
$$G_o = \frac{(\bar{x} - x_0)}{s} = \frac{114,7623889 - 114,739}{0,012510292} = 1,870$$

Siendo los valores críticos con p=6 1%: 1,973 5%: 1,887

Se concluye en este caso que no hay problemas en los valores promedios, sino en la dispersión, aunque el valor está próximo al nivel de advertencia

Finalmente se procederá a emplear el test de Grubbs al valor de  $\tau_{\min}$

$$\bar{x} = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p \bar{y}_{ij} = 5,007 \text{ mm}$$
$$s = \sqrt{\frac{1}{p-1} \sum_{i=1}^p (\bar{y}_{ij} - \bar{X})^2} = 0,0055 \text{ mm}$$
$$G_p = \frac{(\bar{x} - x_p)}{s} = \frac{5,007 - 5,001}{0,005477226} = 1,095$$

Siendo los valores críticos con p=4 1%: 1,496 5%: 1,481

Se concluye en este caso que no hay problemas en los valores promedios si se los compara entre sí, sino en la dispersión causada por un operador (es decir, podría considerarse, con las limitaciones que obedecen a la baja cantidad de operadores, que los valores promedios de los operadores se comportan de manera normal)

### 3.4.3.2 Cálculo de la media general y las varianzas para diámetros

Habiendo excluido los valores fuera de límites (indicado como \*\* en las tablas 42 y 43) los valores resultantes son:

Tabla 42 – Valores medios sin outliers de diámetros

i	j			
	$\phi_{M\acute{a}x}$		$\phi_{m\acute{i}n}$	
Medias Operador $\bar{y}_{ij}$	valor	N	valor	n
	[mm]	[repeticiones]	[mm]	[repeticiones]
1	114,803	10	114,772	10
2	114,798	10	114,767	10
3	114,798	10	114,761	10
4**				
5	114,794	5	114,762	5
6**				

Tabla 43 – Desvíos estándar sin outliers de diámetros

i	j			
	$\phi_{M\acute{a}x}$		$\phi_{m\acute{i}n}$	
Desviación Operador $s_{ij}$	valor	n	valor	n
	[mm]	[repeticiones]	[mm]	[repeticiones]
1	0,0082	10	0,0079	10
2	0,0063	10	0,0082	10
3	0,0079	10	0,0088	10
4**				
5	0,0089	5	0,0084	5
6**				

De acuerdo a la ecuación 19 de la norma de referencia, la media general es

$$\hat{m}_j = \bar{y}_j = \frac{\sum_{i=1}^p n_{ij} \bar{y}_{ij}}{\sum_{i=1}^p n_{ij}}$$

Tabla 44 - Media general de diámetros

$\bar{y}_j$	$\phi_{M\acute{a}x}$	$\phi_{m\acute{i}n}$
	[mm]	[mm]
Media general	114,7989	114,766

La varianza de repetibilidad se calcula según la ecuación 20 de la norma

$$s_{repetibilidad\ j}^2 = \frac{\sum_{i=1}^p (n_{ij} - 1) s_{ij}^2}{\sum_{i=1}^p (n_{ij} - 1)}$$

Tabla 45 – Repetibilidad de diámetros

	$\phi_{M\acute{a}x}$	$\phi_{m\acute{i}n}$
$s_{repetibilidad\ j}^2$	$5,96774 \times 10^{-5} \text{ mm}^2$	$6,90323 \times 10^{-5} \text{ mm}^2$
$u_{repetibilidad\ j}$	0,0077 mm	0,0083 mm

A fin de conservar la coherencia del presente trabajo se denominará “reproducibilidad” al valor correspondiente a las diferencias entre operadores. En la norma se denomina varianza entre operadores (“between-laboratory variance”), reservando el término “reproducibilidad” a la suma de las varianzas del operador y entre los operadores (“within-laboratory variance” más “between-laboratory variance”)

Teniendo en cuenta las ecuaciones 22, 23 y 21 de la norma:

$$s_{dj}^2 = \frac{1}{p-1} \sum_{i=1}^p n_{ij} (\bar{y}_{ij} - \bar{y}_j)^2$$

$$\bar{n}_j = \frac{1}{p-1} \left[ \sum_{i=1}^p n_{ij} - \frac{\sum_{i=1}^p n_{ij}^2}{\sum_{i=1}^p n_{ij}} \right]$$

$$s_{reproducibilidad j}^2 = \frac{s_{dj}^2 - s_{repetibilidad j}^2}{\bar{n}_j}$$

Tabla 46 - Reproducibilidad de diámetros

	j	
	$\varnothing_{Máx}$	$\varnothing_{mín}$
$s_{dj}^2$	0,000101429 mm <sup>2</sup>	0,000233333 mm <sup>2</sup>
$\bar{n}_j$	8,57	8,57
$s_{reproducibilidad j}^2$	4,87 x10 <sup>-6</sup> mm <sup>2</sup>	1,92 x10 <sup>-5</sup> mm <sup>2</sup>
$u_{reproducibilidad j}$	0,0022 mm	0,0044 mm

### 3.4.3.3 Cálculo de la media general y las varianzas para espesores

Habiendo excluido los valores fuera de límite (indicado como \*\* en las tablas 47 y 48) los valores resultantes son:

Tabla 47- Valores medios sin outliers de espesores

i	j			
	$\tau_{Máx}$		$\tau_{mín}$	
Medias Operador	valor	N	valor	n
$\bar{y}_{ij}$	[mm]	[repeticiones]	[mm]	[repeticiones]
1	5,054	10	5,004	10
2	5,056	10	5,01	10
3	5,053	10	5,013	10
4**				

Tabla 48 – Desvíos estándar sin outliers de espesores

i	j			
	$\tau_{Máx}$		$\tau_{mín}$	
Desviación Operador	valor	n	valor	n
$s_{ij}$	[mm]	[repeticiones]	[mm]	[repeticiones]
1	0,0084	10	0,0052	10
2	0,0084	10	0,0094	10
3	0,0082	10	0,0067	10
4**				

De acuerdo a la ecuación 19 de la norma, la media general es

$$\widehat{m}_j = \bar{y}_j = \frac{\sum_{i=1}^p n_{ij} \bar{y}_{ij}}{\sum_{i=1}^p n_{ij}}$$

Tabla 49 – Media general de diámetros

$\bar{y}_j$	$\tau_{M\acute{a}x}$	$\tau_{m\acute{i}n}$
	[mm]	[mm]
Media general	5,054	5,009

La varianza de repetibilidad se calcula según la ecuación 20 de la norma

$$s_{repetibilidad\ j}^2 = \frac{\sum_{i=1}^p (n_{ij} - 1) s_{ij}^2}{\sum_{i=1}^p (n_{ij} - 1)}$$

Tabla 50 - Repetibilidad de espesores

	$\tau_{M\acute{a}x}$	$\tau_{m\acute{i}n}$
$s_{repetibilidad\ j}^2$	$7,000 \times 10^{-5} \text{ mm}^2$	$5,37 \times 10^{-5} \text{ mm}^2$
$u_{repetibilidad\ j}$	0,0084 mm	0,0073 mm

A fin de conservar la coherencia del presente trabajo, y del mismo modo que se realizó para el cálculo de los valores asociados a los diámetros, se denominará “reproducibilidad” al valor correspondiente a las diferencias entre operadores. En la norma se la denomina varianza entre operadores (“between-laboratory variance”), reservando el término “reproducibilidad” a la suma de las varianzas del operador y entre los operadores (“within-laboratory variance” más “between-laboratory variance”)

Teniendo en cuenta las ecuaciones 22, 23 y 21 de la norma:

$$s_{dj}^2 = \frac{1}{p-1} \sum_{i=1}^p n_{ij} (\bar{y}_{ij} - \bar{y}_j)^2$$

$$\bar{n}_j = \frac{1}{p-1} \left[ \sum_{i=1}^p n_{ij} - \frac{\sum_{i=1}^p n_{ij}^2}{\sum_{i=1}^p n_{ij}} \right]$$

$$s_{reproducibilidad\ j}^2 = \frac{s_{dj}^2 - s_{repetibilidad\ j}^2}{\bar{n}_j}$$

Tabla 51 – Reproducibilidad de espesores

	j	
	$\tau_{M\acute{a}x}$	$\tau_{m\acute{i}n}$
$s_{dj}^2$	$2,33333 \times 10^{-5} \text{ mm}^2$	$0,00021 \text{ mm}^2$
$\bar{n}_j$	10	10
$s_{reproducibilidad\ j}^2$	$0 \text{ mm}^2$	$1,56 \times 10^{-5} \text{ mm}^2$
$u_{reproducibilidad\ j}$	0 mm	0,0040 mm

Empleo del Sistema de Gestión de la Calidad para la determinación de la incertidumbre en la reducción de área de tubos laminados

*Instituto Dan Beninson – Especialización en Reactores y su Ciclo de Combustible*

Cabe destacar que el valor de  $s_{reproducibilidad j}^2$  asociado a  $\tau_{Máx}$  se indica como 0 mm dado que, como lo prevé la norma en el punto 7.4.5.4 "si debiendo a factores aleatorios, se obtiene un valor negativo, el valor debe ser asumido como cero".

### 3.4.4 Norma ISO 13.528:2005

A partir de los resultados de las mediciones obtenidos por los distintos operadores (Tablas 5, 7, 9 y 11), se seguirán los métodos de cálculos indicados en la norma ISO 13.528:2005 [11], con las siguientes consideraciones:

- Se empleará el algoritmo robusto del Anexo C de la norma (“C.1 Robust analysis: Algorithm A”) con el fin de obtener un valor asignado  $X$  y su desvío  $u_X$  por medio de “consenso”, es decir, a partir de los datos proporcionados por los operadores.
- El valor del desvío del ensayo de desempeño (“proficiency testing” para la norma)  $\hat{\sigma}$  se considerará una estimación de la reproducibilidad de los resultados, *i.e.* los valores posibles que son razonablemente esperables como resultado de la medición. Con este valor se procederá a estimar los desvíos (bias) de los operadores.
- Si bien la norma enfatiza la estabilidad de la muestra a medir, en este caso no se toman precauciones especiales, dado que todos los operadores han medido la misma muestra, que por las características del proceso de medición, no se considera que sea alterada por la realización de la medición. Asimismo la totalidad de las mediciones se realizaron en un intervalo corto de tiempo por lo que se asume que no hubo modificación de la muestra por cambio en las condiciones ambientales
- Cabe destacar que al disponer de un limitado número de operadores (“laboratorios” para la norma de referencia), el valor obtenido no proporciona un elevado nivel de confianza. Específicamente la norma en el punto 5.1 establece que el método que se ha empleado (algoritmo robusto) “es poco probable (<<unlikely>>) que sea aplicable cuando el número de participantes es pequeño”
- Asimismo se destaca que, siguiendo lo establecido en la norma en el punto 5.8 en lo relativo a datos faltantes, dado que el número ( $n$ ) de mediciones por operador (“réplicas”) es de 10, se eliminarán los resultados proporcionados por los operadores 5 y 6 para el cálculo del valor asignado y su desvío estándar, por ser la cantidad medida menor que  $0.59n$ .

El algoritmo iterativo empleado consiste en ordenar la información recibida (en este caso el promedio de las mediciones, tal como se indica en los puntos 5.8, 5.6.2 y en 6.6.1 de la norma) en orden ascendente

$$x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_p$$

El valor del valor medio robusto se indica como  $x^*$  y el desvío estándar robusto como  $s^*$

A continuación se calculan los valores iniciales de  $x^*$  y  $s^*$  como

$$\begin{aligned} x^* &= \text{mediana de } x_i && (i=1, 2, \dots, p) \\ s^* &= 1,483 * \text{mediana de } |x_i - x^*| && (i=1, 2, \dots, p) \end{aligned}$$

Luego se actualizan los valores de  $x^*$  y  $s^*$  del siguiente modo:

Se calcula

$$\delta = 1.5 s^*$$

Para cada  $x_i$  ( $i=1, 2, p$ ) calcular

$$x_i^* = \begin{cases} x^* - \delta & \text{si } x_i < x^* - \delta \\ x^* + \delta & \text{si } x_i > x^* + \delta \\ x_i & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Por último se calculan los nuevos valores de  $x^*$  y  $s^*$  a partir de

$$x^* = \frac{\sum_{i=1}^p x_i^*}{p}$$

$$s^* = 1,134 \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^p (x_i^* - x^*)^2}{p-1}}$$

Se actualizan los valores de  $x^*$  y  $s^*$  tantas veces hasta que el proceso converja. Se entiende que el proceso converge si no hay cambios de una iteración a la otra en la tercera cifra significativa del desvío estándar robusto y su equivalente cifra en el valor medio robusto.

La incertidumbre estándar del valor asignado, tal como se indica en 5.6.2 de la norma, se estima como

$$u_x = 1,25 \frac{s^*}{\sqrt{p}}$$

Como se indica en la norma en el punto 6.6, en este caso el desvío estándar del ensayo de desempeño se calcula como:

$$\hat{\sigma} = s^*$$

De modo adicional se hará un cálculo de performance de los operadores utilizando el indicador, z' score. Si bien actualmente se recomienda el empleo del indicador  $E_n$ , ya que el z' score presenta limitaciones en tanto que es un índice de evolución inflexible, en este caso no se considera aplicable el uso de  $E_n$ , dado que este indicador requiere la expresión del resultado (por parte de los operadores, "laboratorios" para la norma) con la incertidumbre expandida para luego evaluarla, siendo que el ejercicio realizado solo se encontraba limitado a la realización de las mediciones en condiciones de repetibilidad.

Por definición:

Si  $u_x > 0,3 \hat{\sigma}$

$$z' = \frac{x - X}{\sqrt{\hat{\sigma}^2 + u_x^2}}$$

Donde  $u_x$  es la incertidumbre estándar del valor asignado X

Si  $u_x \leq 0,3 \hat{\sigma}$

$$z = \frac{x - X}{\hat{\sigma}}$$

En ambos casos cuando los valores proporcionados por un operador generan z-scores sobre 3,0 o por debajo de -3,0, deben considerarse como señales de acción. Cuando se observen z-scores por encima de 2,0 o por debajo de -2,0, deben considerarse como señales de advertencia. En otro caso se consideran que los valores que generaron los z-scores son correctos.

Cabe destacar que, tal como lo indica la norma en 7.4.2, como el número de operadores es menor que 10, no deberían considerarse estas señales y solamente deberían ser tenidas en cuenta para futuras comparaciones. Asimismo, dado que los resultados en los distintos casos no cumplen con el requisito según 4.3, que  $\frac{\sigma_r}{\sqrt{n}} \leq 0,3 \hat{\sigma}$ , las interpretaciones deben realizarse con precaución.

3.4.4.1  $\phi_{M\acute{a}x}$

Tabla 52 – Algoritmo iterativo para Diámetro Máximo

	Valor promedio ordenado	Rango	Iteración #1	Iteración #2	Iteración #3
$\delta = 1,5 s^*$			0,00556125	0,00733923	0,00733923
$x^* - \delta$			114,792439	114,79052	114,79052
$x^* + \delta$			114,803561	114,805199	114,805199
Op4_ $\phi$ Max	114,77600	0,022	114,792439	114,792439	114,792439
Op2_ $\phi$ Max	114,79800	0	114,798	114,798	114,798
Op3_ $\phi$ Max	114,79800	0	114,798	114,798	114,798
Op1_ $\phi$ Max	114,80300	0,005	114,803	114,803	114,803
Promedio	114,79375		114,79786	114,79786	114,79786
desvío	0,012065792		0,00431466	0,00431466	0,00431466
promedio robusto	114,79800		114,79786	114,79786	114,79786
desvío robusto	0,0037075		0,00489282	0,00489282	0,00489282

$$u_x = 1,25 \frac{s^*}{\sqrt{p}} = 1,25 \frac{0,0048 \text{ mm}}{\sqrt{4}} = 0,0031 \text{ mm}$$

$$\hat{\sigma} = s^* = 0,0049 \text{ mm}$$

Dado que:

Si  $u_x > 0,3 \hat{\sigma}$

$0,0031 > 0,3 * 0,0049$

$0,0031 > 0,0015$

$$z' = \frac{x - X}{\sqrt{\hat{\sigma}^2 + u_x^2}}$$

Tabla 53 – Valores de  $z'$  para Diámetro Máximo

	Op1_ $\phi$ Max	Op2_ $\phi$ Max	Op3_ $\phi$ Max	Op4_ $\phi$ Max	Op5_ $\phi$ Max	Op6_ $\phi$ Max
$z'$	0	0,024	0,024	-3,789	-0,669	4,993

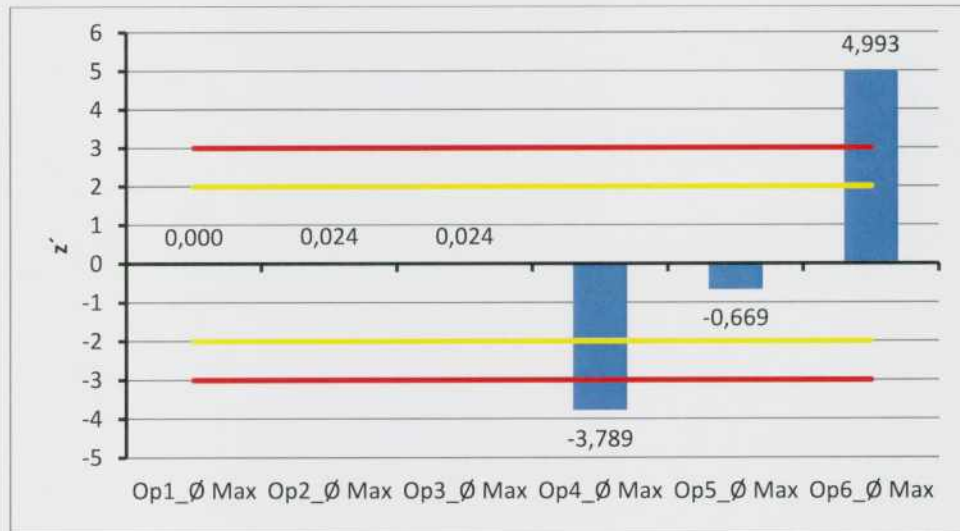


Figura 41- z' de Diámetro Máximo

### 3.4.4.2 $\phi_{\min}$

Tabla 54- Algoritmo iterativo para Diámetro mínimo

	Valor promedio ordenado	Rango	Iteración #1	Iteración #2
$\delta = 1,5 s^*$			0,01223475	0,01480313
$x^* - \delta$			114,751765	114,748138
$x^* + \delta$			114,776235	114,777744
Op4_Ø Min	114,739	0,025	114,751765	114,751765
Op3_Ø Min	114,761	0,003	114,761	114,761
Op2_Ø Min	114,767	0,003	114,767	114,767
Op1_Ø Min	114,772	0,008	114,772	114,772
Promedio	114,75975		114,762941	114,762941
desvío	0,0145459		0,0087026	0,0087026
promedio robusto	114,764		114,762941	114,762941
desvío robusto	0,0081565		0,009869	0,009869

$$u_x = 1,25 \frac{s^*}{\sqrt{p}} = 1,25 \frac{0,0099 \text{ mm}}{\sqrt{4}} = 0,0062 \text{ mm}$$

$$\hat{\sigma} = s^* = 0,0099 \text{ mm}$$

Dado que:

Si  $u_x > 0,3 \hat{\sigma}$

$0,0062 > 0,3 * 0,0099$

$0,0062 > 0,0030$

$$z' = \frac{x - X}{\sqrt{\hat{\sigma}^2 + u_x^2}}$$

Tabla 55 – Valores de  $z'$  para Diámetro mínimo

	Op1_Ø min	Op2_Ø min	Op3_Ø min	Op4_Ø min	Op5_Ø min	Op6_Ø min
$z'$	0,778	0,349	-0,167	-2,057	-0,081	0,893

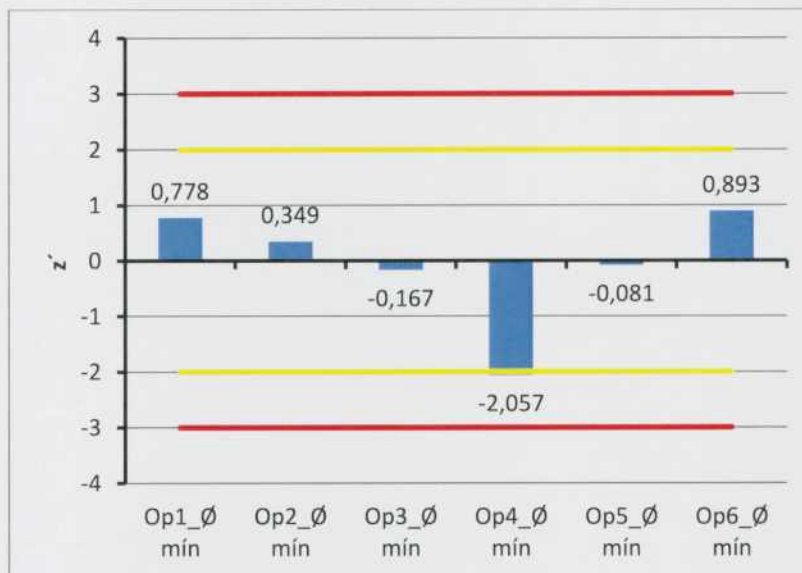


Figura 42 -  $z'$  de Diámetro mínimo

### 3.4.4.3 $\tau_{Máx}$

Tabla 56 – Algoritmo iterativo para Espesor Máximo

	Valor promedio ordenado	Rango	Iteración #1	Iteración #2
$\delta = 1,5 s^*$			0,00333675	0,00413275
$x^* - \delta$			5,05016325	5,04915806
$x^* + \delta$			5,05683675	5,05742356
Op4_t Max	5,04700	0,0065	5,05016	5,05016
Op3_t Max	5,05300	0,0005	5,05300	5,05300
Op1_t Max	5,05400	0,0005	5,05400	5,05400
Op2_t Max	5,05600	0,0025	5,05600	5,05600
Promedio	5,05250		5,05329081	5,05329081
desvío	0,003872983		0,0024296	0,0024296
promedio robusto	5,05350		5,05329081	5,05329081
desvío robusto	0,0022245		0,00275517	0,00275517

$$u_x = 1,25 \frac{s^*}{\sqrt{p}} = 1,25 \frac{0,0027 \text{ mm}}{\sqrt{4}} = 0,0017 \text{ mm}$$

$$\delta = s^* = 0,0027 \text{ mm}$$

Dado que:

$$\text{Si } u_x > 0,3 \delta$$

$$0,0017 > 0,3 * 0,0027$$

$$0,0062 > 0,00082$$

$$z' = \frac{x - X}{\sqrt{\delta^2 + u_x^2}}$$

Tabla 57– Valores de  $z'$  para Espesor Máximo

	Op1_t Max	Op2_t Max	Op3_t Max	Op4_t Max
$z'$	0,218	0,834	-0,090	-1,936

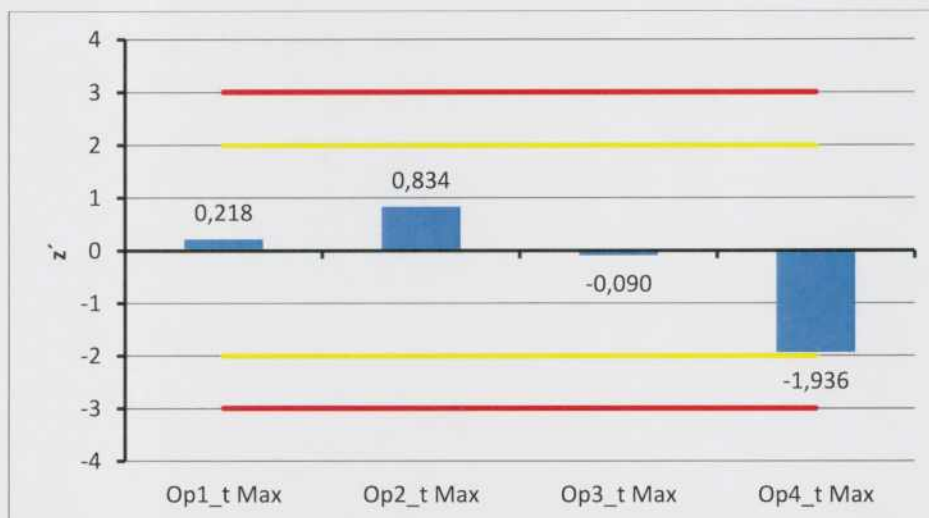


Figura 43-  $z'$  de Espesor Máximo

#### 3.4.4.4 $\tau_{min}$

Tabla 58 – Algoritmo iterativo para Espesor mínimo

	Valor promedio ordenado	Rango	Iteración #1	Iteración #2	Iteración #3
$\delta = 1,5 s^*$			0,01001025	0,00931676	0,00931676
$x^* - \delta$			4,99698975	4,99768324	4,99768324
$x^* + \delta$			5,01701025	5,01631676	5,01631676
Op4_Ø mín	5,001	0,006	5,001	5,001	5,001
Op1_Ø mín	5,004	0,003	5,004	5,004	5,004
Op2_Ø mín	5,01	0,003	5,01	5,01	5,01
Op3_Ø mín	5,013	0,006	5,013	5,013	5,013
Promedio	5,007		5,00700	5,007	5,007
desvío	0,00547723		0,00547723	0,00547723	0,00547723
promedio robusto	5,007000		5,007000	5,007000	5,007000
desvío robusto	0,0066735		0,00621117	0,00621117	0,00621117

$$u_x = 1,25 \frac{s^*}{\sqrt{p}} = 1,25 \frac{0,0062 \text{ mm}}{\sqrt{4}} = 0,0039 \text{ mm}$$

$$\hat{\sigma} = s^* = 0,0062 \text{ mm}$$

Dado que:

Si  $u_x > 0.3 \hat{\sigma}$

$0,0039 > 0.3 * 0,0062$

$0,0039 > 0,0019$

$$z' = \frac{x - X}{\sqrt{\hat{\sigma}^2 + u_x^2}}$$

Tabla 59– Valores de  $z'$  para Espesor mínimo

	Op1_t mín	Op2_t mín	Op3_t mín	Op4_t mín
$z'$	-0,410	0,410	0,819	-0,819

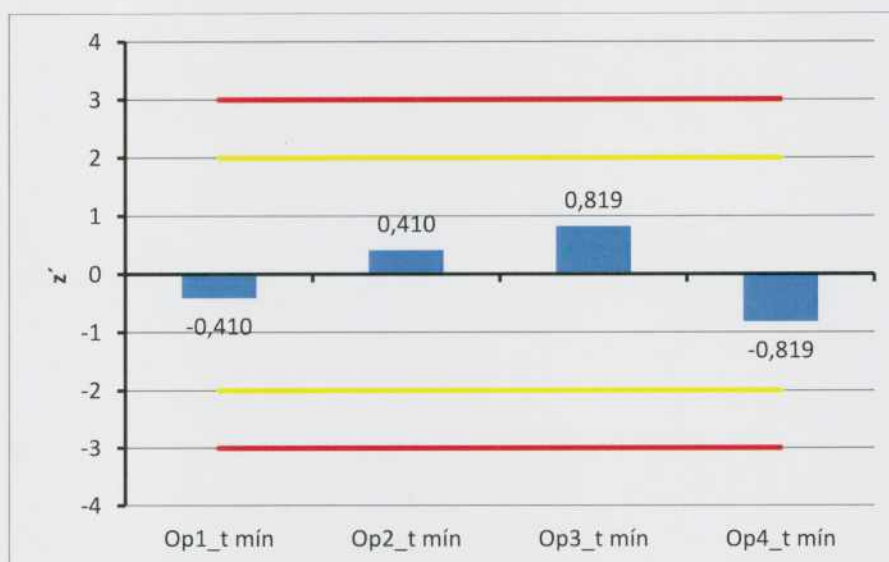


Figura 44 - -  $z'$  de Espesor mínimo

### 3.4.5 Estadística Robusta – Análisis de Caja y bigotes

#### 3.4.5.1 $\varnothing_{M\acute{a}x}$

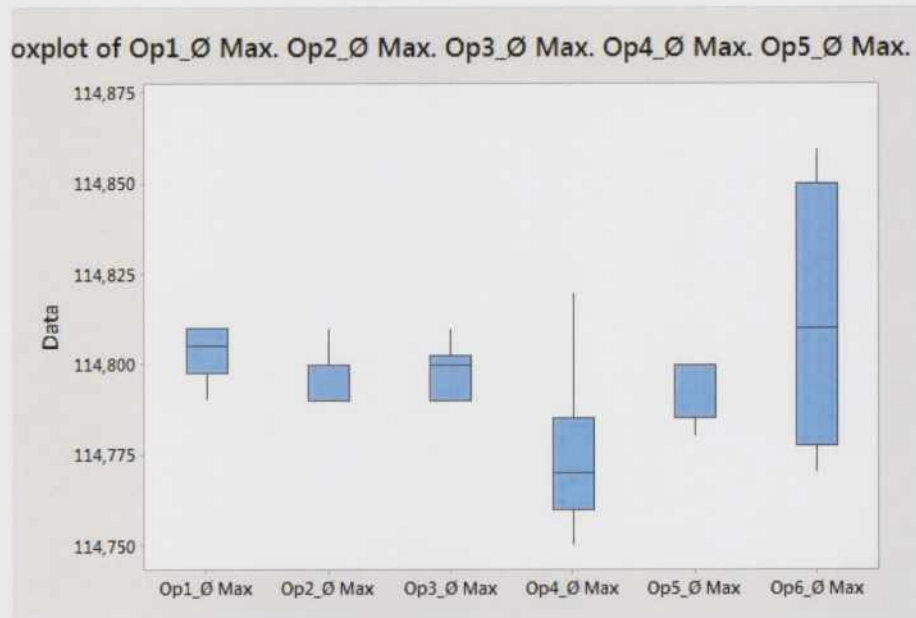


Figura 45 – Diagrama de Caja y Bigotes: Diámetro Máximo

#### 3.4.5.2 $\varnothing_{m\acute{i}n}$

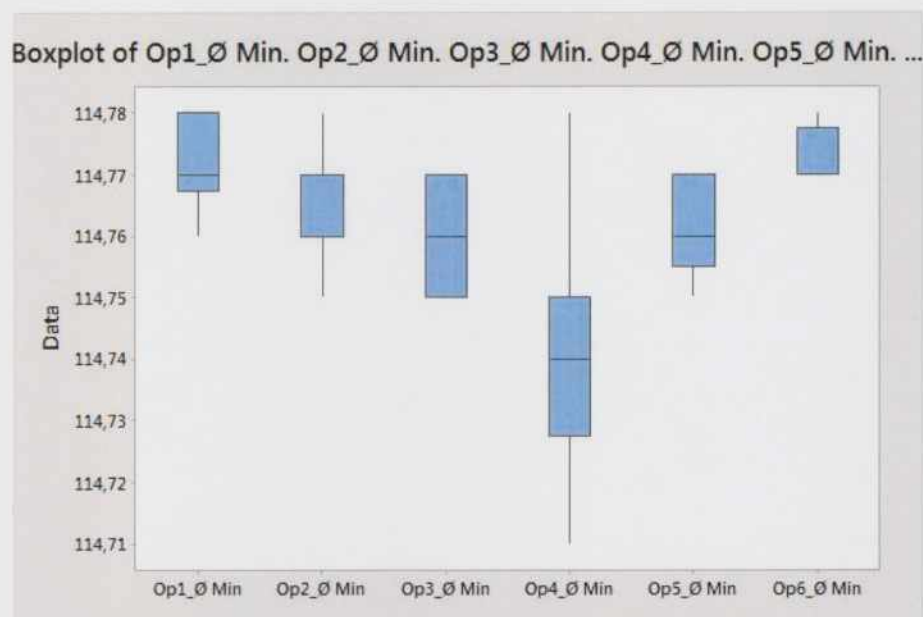


Figura 46 – Diagrama de Caja y Bigotes: Diámetro mínimo

### 3.4.5.3 $\tau_{M\acute{a}x}$

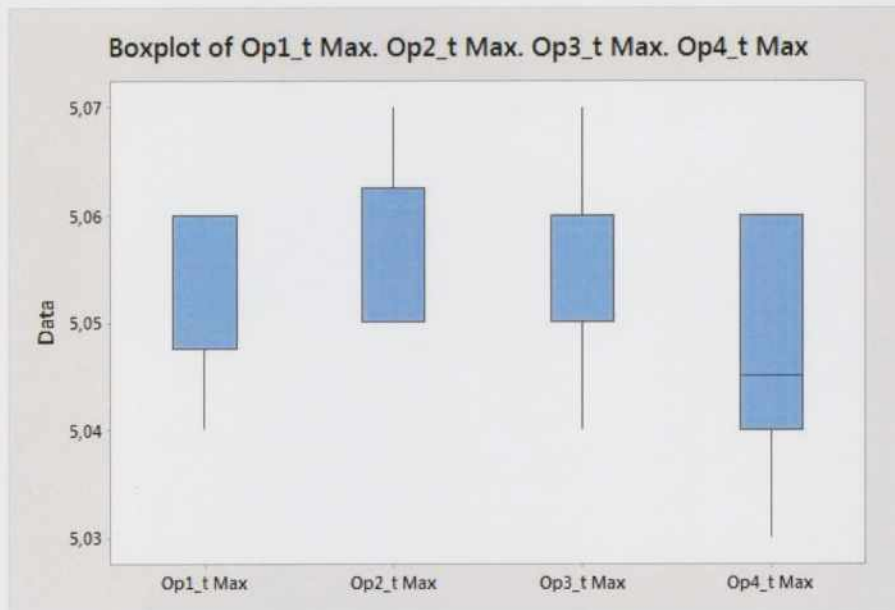


Figura 47 – Diagrama de Caja y Bigotes: Espesor Máximo

### 3.4.5.4 $\tau_{m\acute{i}n}$

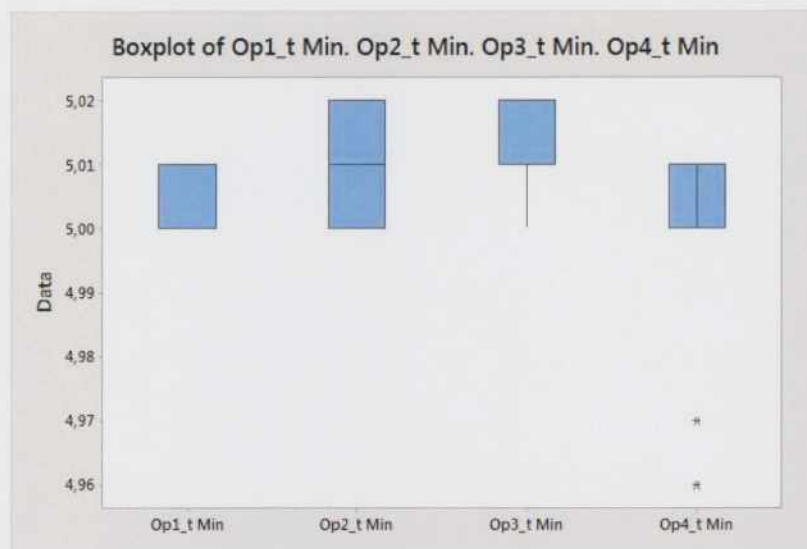


Figura 48 – Diagrama de Caja y Bigotes: Espesor mínimo

### 3.4.6 Comparación de Métodos

#### 3.4.6.1 Generalidades

Primeramente podría decirse que las conclusiones generales que se extraen deben ser tomadas con suma precaución, dado que la cantidad de operadores participantes es muy limitada; de hecho para el cálculo de espesores los valores se obtienen a partir de tres o cuatro operadores.

Se podría concluir que cuando el análisis de varianza (ANOVA) no detecta diferencias significativas (empleando la función F), sobreestima la contribución general ( $\sqrt{\text{Repetitibilidad}^2 + \text{Reproducibilidad}^2}$ ). Esto se puede verificar al comparar los resultados asumiendo una distribución rectangular y los propios de ANOVA

Si la diferencias son significativas, el aporte general ( $\sqrt{\text{Repetitibilidad}^2 + \text{Reproducibilidad}^2}$ ) es similar entre ANOVA y la distribución rectangular. En este caso el valor de repetibilidad es menor en ANOVA y una causa posible es que al asumir la distribución rectangular se toma el peor caso de varianza y éste al ser mucho mayor que el resto (hecho que genera las diferencias significativas detectadas por el ANOVA) tendrá mucha mayor influencia y será mayor que la media aritmética de las varianzas intralaboratorio de todos los participantes, método empleado por el resto de los algoritmos.

El método de la norma ISO 5725-2:1994 es el que siempre detecta valores discrepantes. Estos valores se encuentran siempre generados por una mayor dispersión (reflejada en rechazos por el test de Cochran y el estadígrafo kij) y en el caso de los diámetros, el aporte general es mucho menor que el resto de los métodos, justamente a causa de la ausencia de los operadores más discrepantes.

El método de la norma ISO 13.528:2005 siempre indica un mayor valor de repetibilidad que el de la norma ISO 5725-2:1994. La causa posible es que por un lado, como lo remarca la norma la cantidad de operadores es muy pequeña y por otro, que no realiza rechazos por los valores (es el algoritmo robusto el que selecciona los valores) sino por la cantidad de observaciones realizadas por los operadores (los valores del operador 4 siempre han sido empleados). Ejemplo de ello es que solo en el caso del diámetro máximo este algoritmo detecta irregularidades en los operadores 4 y 6.

También por el método de caja y bigotes ("Box and Whisker"), se pueden apreciar distribuciones a ser investigadas en los operadores 4 y 6. Este último método debe ser considerado con precaución dado que es un método no paramétrico y en particular se vio que las distribuciones individuales se comportan de modo normal (es por ello que se realizó un análisis de varianzas ANOVA y no se empleó la prueba de Kruskal-Wallis)

En este trabajo, para el cómputo de la incertidumbre combinada se emplearon los valores obtenidos a partir de la distribución rectangular. La razón de ello fue que no se quiso eliminar las determinaciones de ningún operador (aunque éstas no sean semejantes a las de sus compañeros) ya que es posible que existan mediciones realizadas por ese operador (dicho de otro modo, eliminar operadores no sería representativo de las situaciones reales). Una segunda razón es que la distribución rectangular genera valores cuyo orden de magnitud es compatible con el resto de los métodos (los que se puede verificar al comparar los resultados para reproducibilidad, teniendo en cuenta las exclusiones que cada algoritmo haya realizado) y es intuitivamente el más sencillo de comprender (finalmente se trata de sumar cuadráticamente a) la variación relacionada con el promedio mayor de las mediciones menos el promedio menor de las mediciones más b) la mayor variación que puede introducir un operador).

3.4.6.2 Comparación de resultados para  $\phi_{M\acute{a}x}$

	Distribución rectangular	ANOVA	5725-2:1994	13.528:2005
Repetibilidad	0,018 mm	0,013 mm	0,0077 mm	
Reproducibilidad	0,015mm	0,021 mm	0,0022 mm	0,0049 mm
$\sqrt{\text{Repetitibilidad}^2 + \text{Reproducibilidad}^2}$	0,023 mm	0,025 mm	0,0080 mm	
Observaciones	El test de Fisher indica que los valores de los operadores 4 y 6 son diferentes del resto	Hay diferencias significativas entre los operadores	Valores de los operadores 4 y 6 eliminados	z'-score de operadores 4 y 6 indica señales de acción. Valores de los operadores 5 y 6 no empleados en los cálculos

3.4.6.3 Comparación de resultados para  $\phi_{m\acute{i}n}$

	Distribución rectangular	ANOVA	5725-2:1994	13.528:2005
Repetibilidad	0,0060 mm	0,011 mm	0,0083 mm	
Reproducibilidad	0,0095 mm	0,020 mm	0,0044 mm	0,0099 mm
$\sqrt{\text{Repetitibilidad}^2 + \text{Reproducibilidad}^2}$	0,032 mm	0,035 mm	0,011 mm	
Observaciones	El test de Fisher indica que los valores de los operadores 4 y 6 son dudosos	Hay diferencias significativas entre los operadores	Valores de los operadores 4 y 6 eliminados	z'-score del operador 4 indica señales de acción. Valores de los operadores 5 y 6 no empleados en los cálculos

3.4.6.4 Comparación de resultados para  $\tau_{M\acute{a}x}$

	Distribución rectangular	ANOVA	5725-2:1994	13.528:2005
Repetibilidad	0,0033 mm	0,0090 mm	0,0084 mm	
Reproducibilidad	0,0026 mm	0,0026 mm	0 mm	0,0027 mm
$\sqrt{\text{Repetibilidad}^2 + \text{Reproducibilidad}^2}$	0,0042 mm	0,0094 mm	0,0084 mm	
Observaciones	El test de Fisher indica que no hay diferencia entre los valores	No hay diferencias significativas entre los operadores	Valores del operador 4 eliminados	z'-scores correctos

3.4.6.5 Comparación de resultados para  $\tau_{m\acute{i}n}$

	Distribución rectangular	ANOVA	5725-2:1994	13.528:2005
Repetibilidad	0,0060 mm	0,011 mm	0,0073 mm	
Reproducibilidad	0,0035 mm	0,0041 mm	0,0040 mm	0,0062 mm
$\sqrt{\text{Repetibilidad}^2 + \text{Reproducibilidad}^2}$	0,0070 mm	0,012 mm	0,0083 mm	
Observaciones	El test de Fisher indica que los valores del operador 4 son diferentes del resto	No hay diferencias significativas entre los operadores (pero cerca del límite)	Valores del operador 4 eliminados	z'-scores correctos

### 3.5 Constante de dilatación térmica

$$\frac{l_f - l_o}{l_o} = \alpha(T_f - T_o)$$

Siendo

$l_f$  longitud final a la nueva temperatura

$l_o$  longitud a la temperatura de referencia (25°C=298,15°K)

$T_f$  nueva temperatura a la que se calculará la magnitud

$T_o$  temperatura de referencia a la cual está determinada el coeficiente de dilatación térmica

$\alpha$  coeficiente de dilatación térmica. Para el la aleación empleada a  $T_o=25^\circ\text{C}$   $\alpha = 11,3 \cdot 10^{-6} \frac{1}{^\circ\text{K}}$

Considerando una variación de temperatura entre 18°C (291,15) y 32°C (305,15°K), esto es  $\pm 7^\circ\text{K}$  las diferencias de longitud resultan ser:

$$\phi_{305,15^\circ\text{K}} - \phi_{298,15^\circ\text{K}} = \phi_{298,15^\circ\text{K}} \alpha (305,15^\circ\text{K} - 298,15^\circ\text{K})$$

$$\phi_{291,15^\circ\text{K}} - \phi_{298,15^\circ\text{K}} = \phi_{298,15^\circ\text{K}} \alpha (291,15^\circ\text{K} - 298,15^\circ\text{K})$$

Restando miembro a miembro

$$\begin{aligned} \phi_{305,15^\circ\text{K}} - \phi_{298,15^\circ\text{K}} - \phi_{291,15^\circ\text{K}} + \phi_{298,15^\circ\text{K}} \\ = \phi_{298,15^\circ\text{K}} \alpha (305,15^\circ\text{K} - 298,15^\circ\text{K}) - \phi_{298,15^\circ\text{K}} \alpha (291,15^\circ\text{K} - 298,15^\circ\text{K}) \end{aligned}$$

$$\phi_{305,15^\circ\text{K}} - \phi_{291,15^\circ\text{K}} = \phi_{298,15^\circ\text{K}} \alpha (7^\circ\text{K}) - \phi_{298,15^\circ\text{K}} \alpha (-7^\circ\text{K})$$

$$\phi_{305,15^\circ\text{K}} - \phi_{291,15^\circ\text{K}} = 2 \phi_{298,15^\circ\text{K}} \alpha 7^\circ\text{K}$$

#### 3.5.1 $\phi_{M\acute{a}x}$

$$\phi_{M\acute{a}x_{305,15^\circ\text{K}}} - \phi_{M\acute{a}x_{291,15^\circ\text{K}}} = 2 \phi_{M\acute{a}x_{298,15^\circ\text{K}}} \alpha 7^\circ\text{K}$$

Asumiendo que el  $\phi_{M\acute{a}x} = 114,80$  fue medido a la temperatura de 25°C (298,15°K), la variación en los diámetros máximos resulta ser de

$$\phi_{M\acute{a}x_{305,15^\circ\text{K}}} - \phi_{M\acute{a}x_{291,15^\circ\text{K}}} = 2 * 114,80 \text{ mm} * 11,3 * 10^{-6} * \frac{1}{^\circ\text{K}} * 7^\circ\text{K}$$

$$\phi_{M\acute{a}x_{305,15^\circ\text{K}}} - \phi_{M\acute{a}x_{291,15^\circ\text{K}}} = 0,0182 \text{ mm}$$

Y considerando una distribución rectangular de probabilidades (i.e. temperatura de medición equiprobables entre los 18°C y 32°C)

$$u_{\text{dilatación } \phi_{M\acute{a}x}} = \frac{\phi_{M\acute{a}x_{305,15^\circ\text{K}}} - \phi_{M\acute{a}x_{291,15^\circ\text{K}}}}{2\sqrt{3}} = \frac{0,0182}{2\sqrt{3}} = 0,00524 \text{ mm} \quad (3.5.1)$$

#### 3.5.2 $\phi_{m\acute{i}n}$

$$\phi_{m\acute{i}n_{305,15^\circ\text{K}}} - \phi_{m\acute{i}n_{291,15^\circ\text{K}}} = 2 \phi_{m\acute{i}n_{298,15^\circ\text{K}}} \alpha 7^\circ\text{K}$$

Asumiendo que el  $\phi_{m\acute{i}n} = 114,77$  fue medido a la temperatura de 25°C (298,15°K), la variación en los diámetros mínimos resulta ser de

$$\phi_{m\acute{i}n_{305,15^\circ\text{K}}} - \phi_{m\acute{i}n_{291,15^\circ\text{K}}} = 2 * 114,77 \text{ mm} * 11,3 * 10^{-6} * \frac{1}{^\circ\text{K}} * 7^\circ\text{K}$$

$$\phi_{m\acute{i}n_{305,15^\circ\text{K}}} - \phi_{m\acute{i}n_{291,15^\circ\text{K}}} = 0,018157 \text{ mm}$$

Y considerando una distribución rectangular de probabilidades (i.e. temperatura de medición equiprobables entre los 18°C y 32°C)

$$u_{\text{dilatación } \phi_{m\acute{i}n}} = \frac{\phi_{m\acute{i}n_{305,15^\circ\text{K}}} - \phi_{m\acute{i}n_{291,15^\circ\text{K}}}}{2\sqrt{3}} = \frac{0,018157}{2\sqrt{3}} = 0,00524 \text{ mm} \quad (3.5.2)$$

#### 3.5.3 $\tau_{M\acute{a}x}$

$$\tau_{M\acute{a}x_{305,15^\circ\text{K}}} - \tau_{M\acute{a}x_{291,15^\circ\text{K}}} = 2 \tau_{M\acute{a}x_{298,15^\circ\text{K}}} \alpha 7^\circ\text{K}$$

Asumiendo que el  $\tau_{M\acute{a}x} = 5,07$  mm fue medido a la temperatura de 25°C (298,15°K), la variación en los espesores máximos resulta ser de

Empleo del Sistema de Gestión de la Calidad para la determinación de la incertidumbre en la reducción de área de tubos laminados

*Instituto Dan Beninson – Especialización en Reactores y su Ciclo de Combustible*

$$\tau_{Máx_{305,15^{\circ}K}} - \tau_{Máx_{291,15^{\circ}K}} = 2 * 5,07 \text{ mm} * 11,3 * 10^{-6} * \frac{1}{^{\circ}K} * 7^{\circ}K$$

$$\tau_{Máx_{305,15^{\circ}K}} - \tau_{Máx_{291,15^{\circ}K}} = 0,000802 \text{ mm}$$

Y considerando una distribución rectangular de probabilidades (i.e. temperatura de medición equiprobables entre los 18°C y 32°C)

$$u_{dilatación \tau_{Máx}} = \frac{\tau_{Máx_{305,15^{\circ}K}} - \tau_{Máx_{291,15^{\circ}K}}}{2\sqrt{3}} = \frac{0,000802}{2\sqrt{3}} = 0,000232 \text{ mm} \quad (3.5.3)$$

### 3.5.4 $\tau_{mín}$

$$\tau_{mín_{305,15^{\circ}K}} - \tau_{mín_{291,15^{\circ}K}} = 2 \tau_{mín_{298,15^{\circ}K}} \alpha 7^{\circ}K$$

Asumiendo que el  $\tau_{mín} = 5,00 \text{ mm}$  fue medido a la temperatura de 25°C (298,15°K), la variación en los espesores mínimos resulta ser de

$$\tau_{mín_{305,15^{\circ}K}} - \tau_{mín_{291,15^{\circ}K}} = 2 * 5,00 \text{ mm} * 11,3 * 10^{-6} * \frac{1}{^{\circ}K} * 7^{\circ}K$$

$$\tau_{mín_{305,15^{\circ}K}} - \tau_{mín_{291,15^{\circ}K}} = 0,000791 \text{ mm}$$

Y considerando una distribución rectangular de probabilidades (i.e. temperatura de medición equiprobables entre los 18°C y 32°C)

$$u_{dilatación \tau_{mín}} = \frac{\tau_{mín_{305,15^{\circ}K}} - \tau_{mín_{291,15^{\circ}K}}}{2\sqrt{3}} = \frac{0,000791}{2\sqrt{3}} = 0,000228 \text{ mm} \quad (3.5.4)$$

### 3.6 Error de método

El método de medición consiste en medir a lo largo del tubo en aproximadamente 15 posiciones sucesivas los espesores y diámetros máximos y mínimos. Luego, a partir del promedio de los máximos y de los mínimos (obtenidos en cada posición) se realizan los cálculos.

El error del método surge del hecho que la reducción de área se da punto a punto en el tubo y solo se informa un valor promedio por tubo.

Para calcular el error del método, a partir de una gran producción de tubos (mayor que 400 tubos), por cada tubo se calcularon las reducciones de área en cada una de las posiciones medidas y luego se tomaron los valores de reducción máximos y mínimos de cada tubo para comparar con respecto a la media informada.

#### 3.6.1 Reducción de Área Máxima

Con todas las mediciones se realizó una estimación tipo Rankit para identificar valores dudosos respecto de la distribución

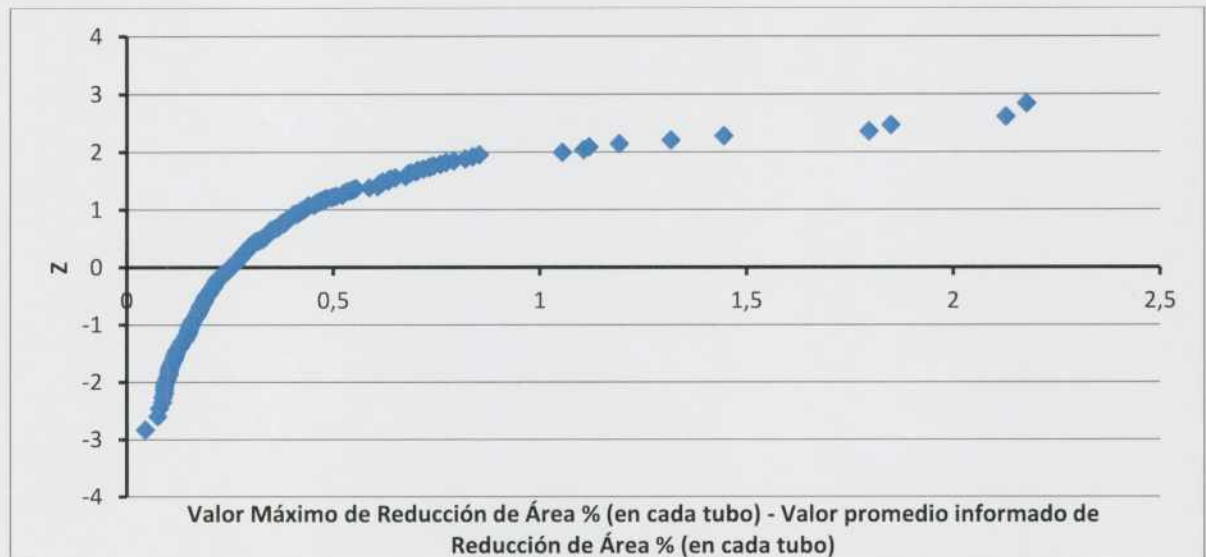


Figura 49 -Rankit Reducción de Área: Máximo- Promedio

Con los datos dudosos se trató de identificar causas asignables (generalmente errores de tipo) y cuando esto fue posible se eliminaron esos valores, obteniendo la siguiente distribución:

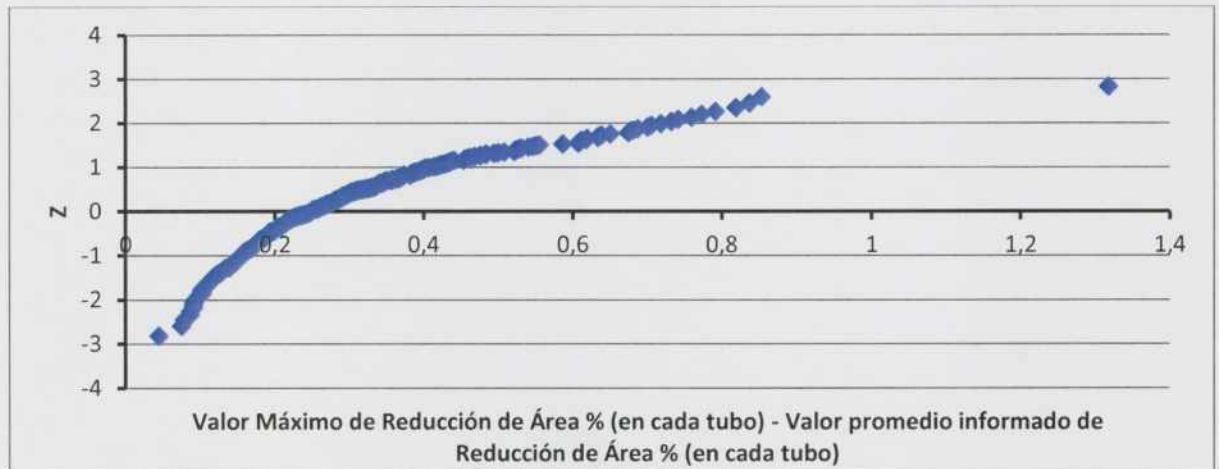


Figura 50 - Rankit Reducción de Área: Máximo- Promedio (filtrado)

Luego se procedió a graficar los distintos errores y su frecuencia acumulada, identificando el punto donde la frecuencia es de 0,9766 (quedando solo un 2,34% fuera)



Figura 51 - Error de método en Reducción de Área: Máximo- Promedio

De las tablas de valores (a partir de los cuales se realizó el gráfico anterior) se deduce que desde 0% hasta 0,718% se concentra el 97,6% de la discrepancia entre el valor máximo de reducción de área del tubo y el valor promedio informado.

### 3.6.2 Reducción de Área mínima

De modo similar a 4.1, con todas las mediciones se realizó una estimación tipo Rankit para identificar valores dudosos respecto de la distribución

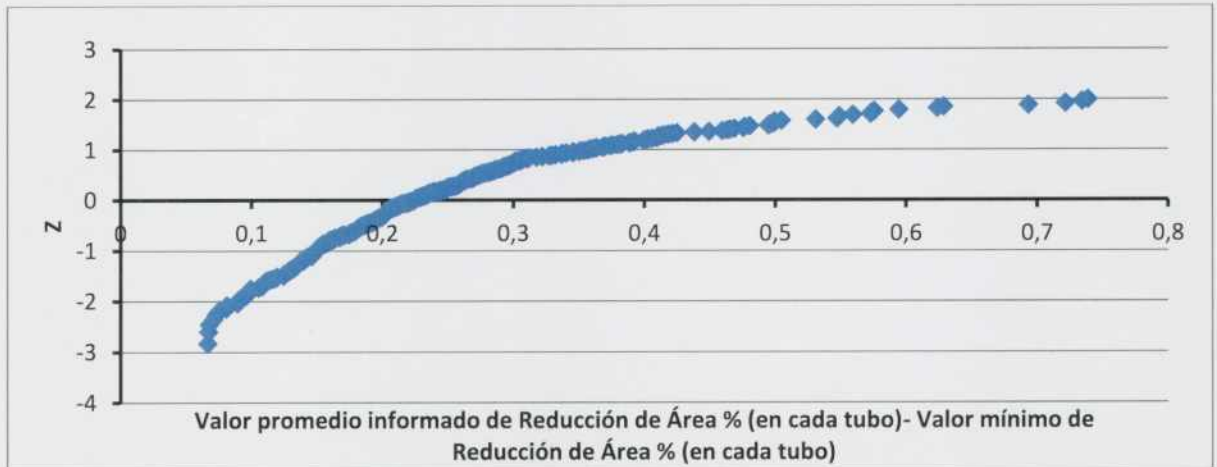


Figura 52 Rankit Reducción de Área: Promedio - mínimo

Con los datos dudosos se trató de identificar causas asignables (generalmente errores de tipeo) y cuando esto fue posible se eliminaron esos valores, obteniendo la siguiente distribución:

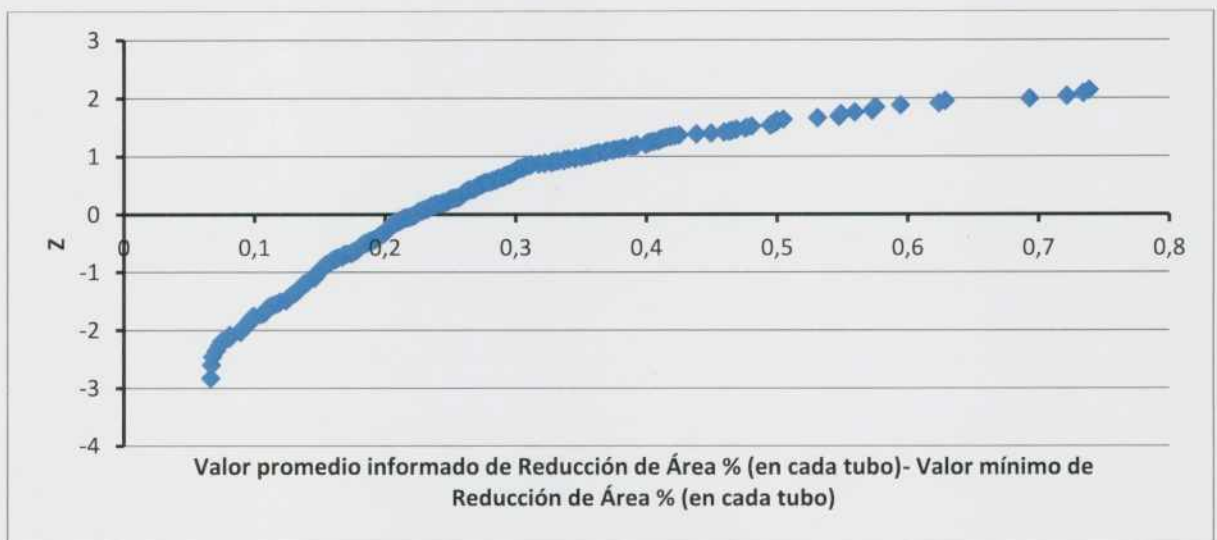


Figura 53 - Rankit Reducción de Área: Promedio – mínimo (filtrado)

Luego se procedió a graficar los distintos errores y su frecuencia acumulada, identificando el punto donde la frecuencia es de 0,971 (dejando solo un 2,56% fuera)



Figura 54 - Error de método en Reducción de Área: Promedio - mínimo

De las tablas de valores a partir de los cuales se realizó el gráfico anterior se deduce que desde 0% hasta 0,629% se concentra el 97,44% de la discrepancia entre el valor máximo de reducción de área del tubo y el valor promedio informado.

### 3.6.3 Incertidumbre asociada al error del método

Considerando, con un 95% de nivel de confianza, que la reducción de área de un tubo puede encontrarse hasta un 0,718% por encima del valor promedio informado o hasta un 0,629% por debajo de este, se asume una distribución rectangular:

$$u_{\text{método}} = \frac{(0,718+0,629)\%}{2\sqrt{3}} = 0,389\% \quad (3.6.3)$$

#### 4 Cuantificación de la incertidumbre combinada

Siendo  $u_c^2 = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i)$  (2)

$$y = 100 * \left( 1 - \frac{\tau_f(\phi_f - \tau_f)}{\tau_i(\phi_i - \tau_i)} \right) = 100 * \left( 1 - \frac{\tau_f\phi_f - \tau_f^2}{\tau_i\phi_i - \tau_i^2} \right)$$

Reemplazando:

$$u_{c,y}^2 = \left[ \frac{\partial y(\tau_f, \phi_f, \tau_i, \phi_i)}{\partial \tau_f} \right]^2 u^2(\tau_f) + \left[ \frac{\partial y(\tau_f, \phi_f, \tau_i, \phi_i)}{\partial \phi_f} \right]^2 u^2(\phi_f) + \left[ \frac{\partial y(\tau_f, \phi_f, \tau_i, \phi_i)}{\partial \tau_i} \right]^2 u^2(\tau_i) + \left[ \frac{\partial y(\tau_f, \phi_f, \tau_i, \phi_i)}{\partial \phi_i} \right]^2 u^2(\phi_i)$$

$$u_{c,y}^2 = \left[ \frac{\partial \left( 100 * \left( 1 - \frac{\tau_f\phi_f - \tau_f^2}{\tau_i\phi_i - \tau_i^2} \right) \right)}{\partial \tau_f} \right]^2 u^2(\tau_f) + \left[ \frac{\partial \left( 100 * \left( 1 - \frac{\tau_f\phi_f - \tau_f^2}{\tau_i\phi_i - \tau_i^2} \right) \right)}{\partial \phi_f} \right]^2 u^2(\phi_f) + \left[ \frac{\partial \left( 100 * \left( 1 - \frac{\tau_f\phi_f - \tau_f^2}{\tau_i\phi_i - \tau_i^2} \right) \right)}{\partial \tau_i} \right]^2 u^2(\tau_i) + \left[ \frac{\partial \left( 100 * \left( 1 - \frac{\tau_f\phi_f - \tau_f^2}{\tau_i\phi_i - \tau_i^2} \right) \right)}{\partial \phi_i} \right]^2 u^2(\phi_i)$$

$$u_{c,y}^2 = \left[ -\frac{100(\phi_f - 2\tau_f)}{\tau_i\phi_i - \tau_i^2} \right]^2 u^2(\tau_f) + \left[ -\frac{100\tau_f}{\tau_i\phi_i - \tau_i^2} \right]^2 u^2(\phi_f) + \left[ \frac{100(\tau_f\phi_f - \tau_f^2)(\phi_i - 2\tau_i)}{(\tau_i\phi_i - \tau_i^2)^2} \right]^2 u^2(\tau_i) + \left[ \frac{100(\tau_f\phi_f - \tau_f^2)(\tau_i)}{(\tau_i\phi_i - \tau_i^2)^2} \right]^2 u^2(\phi_i)$$

Dado que se asumió que  $u(\phi_i) = u(\phi_f)$  y que  $u(\tau_i) = u(\tau_f)$  entonces  $u^2(\phi_i) = u^2(\phi_f)$  y  $u^2(\tau_i) = u^2(\tau_f)$  y por lo tanto:

$$u_{c,y}^2 = \left( \left[ -\frac{100(\phi_f - 2\tau_f)}{\tau_i\phi_i - \tau_i^2} \right]^2 + \left[ \frac{100(\tau_f\phi_f - \tau_f^2)(\phi_i - 2\tau_i)}{(\tau_i\phi_i - \tau_i^2)^2} \right]^2 \right) u^2(\tau_f) + \left( \left[ -\frac{100\tau_f}{\tau_i\phi_i - \tau_i^2} \right]^2 + \left[ \frac{100(\tau_f\phi_f - \tau_f^2)(\tau_i)}{(\tau_i\phi_i - \tau_i^2)^2} \right]^2 \right) u^2(\phi_f)$$

$$\phi_f = \frac{\phi_{Máx} + \phi_{mín}}{2}$$

$$\tau_f = \frac{\tau_{Máx} + \tau_{mín}}{2}$$

$$u_{\phi_f}^2 = \left[ \frac{\partial \phi_f(\phi_{Máx}; \phi_{mín})}{\partial \phi_{Máx}} \right]^2 u^2(\phi_{Máx}) + \left[ \frac{\partial \phi_f(\phi_{Máx}; \phi_{mín})}{\partial \phi_{mín}} \right]^2 u^2(\phi_{mín})$$

$$u_{\phi_f}^2 = \left[ \frac{\partial \left( \frac{\phi_{Máx} + \phi_{mín}}{2} \right)}{\partial \phi_{Máx}} \right]^2 u^2(\phi_{Máx}) + \left[ \frac{\partial \left( \frac{\phi_{Máx} + \phi_{mín}}{2} \right)}{\partial \phi_{mín}} \right]^2 u^2(\phi_{mín})$$

$$u_{\phi_f}^2 = \left[ \frac{1}{2} \right]^2 u^2(\phi_{Máx}) + \left[ \frac{-1}{2} \right]^2 u^2(\phi_{mín})$$

$$u_{\tau_f}^2 = \left[ \frac{\partial \tau_f(\tau_{Máx}; \tau_{mín})}{\partial \tau_{Máx}} \right]^2 u^2(\tau_{Máx}) + \left[ \frac{\partial \tau_f(\tau_{Máx}; \tau_{mín})}{\partial \tau_{mín}} \right]^2 u^2(\tau_{mín})$$

$$u_{\tau_f}^2 = \left[ \frac{\partial \left( \frac{\tau_{Máx} + \tau_{mín}}{2} \right)}{\partial \tau_{Máx}} \right]^2 u^2(\tau_{Máx}) + \left[ \frac{\partial \left( \frac{\tau_{Máx} + \tau_{mín}}{2} \right)}{\partial \tau_{mín}} \right]^2 u^2(\tau_{mín})$$

$$u_{\tau_f}^2 = \left[ \frac{1}{2} \right]^2 u^2(\tau_{Máx}) + \left[ \frac{-1}{2} \right]^2 u^2(\tau_{mín})$$

Para los cálculos se empleará una medición de referencia, en este caso los valores medidos por el Operador 2 (siguiendo el método habitual acordado con el cliente), a saber

$$\phi_{Máx} = 114,81 \text{ mm} , \phi_{mín} = 114,79 \text{ mm} , \tau_{Máx} = 5,07 \text{ mm} \text{ y } \tau_{mín} = 5,00 \text{ mm}$$

De los valores provistos por el cliente se obtiene que  $\phi_i = 119,33$ ,  $\tau_i = 5,928$  mm

$$\phi_f = \frac{\phi_{Máx} + \phi_{mín}}{2} = \frac{114,81 + 114,79}{2} = 114,7825 \text{ mm}$$

$$\tau_f = \frac{\tau_{Máx} - \tau_{mín}}{2} = \frac{5,07 + 5,00}{2} = 5,035 \text{ mm}$$

Con estos valores se obtiene la siguiente reducción de área

$$y = 100 * \left( 1 - \frac{\tau_f(\phi_f - \tau_f)}{\tau_i(\phi_i - \tau_i)} \right) = 100 * \left( 1 - \frac{5,035 \text{ mm} * 114,7825 \text{ mm} - (5,035 \text{ mm})^2}{5,928 \text{ mm} * 119,33 \text{ mm} - (5,928 \text{ mm})^2} \right) = 17,80\%$$

Continuando con el cálculo de la incertidumbre:

$$\begin{aligned}
 u_{c,y}^2 &= \left( \left[ \frac{100\% (114,7825 \text{ mm} - 2 * 5,035 \text{ mm})}{5,928 \text{ mm} * 119,33 \text{ mm} - (5,928 \text{ mm})^2} \right]^2 \right. \\
 &+ \left. \left[ \frac{100\% (5,035 \text{ mm} * 114,7825 \text{ mm} - 5,035 \text{ mm}^2) (119,33 \text{ mm} - 2 * 5,928 \text{ mm})}{(5,928 \text{ mm} * 119,33 \text{ mm} - (5,928 \text{ mm})^2)^2} \right]^2 \right) u^2(\tau_f) \\
 &+ \left( \left[ \frac{100\% * 5,035 \text{ m}}{5,928 \text{ mm} * 119,33 \text{ mm} - (5,928 \text{ mm})^2} \right]^2 \right. \\
 &+ \left. \left[ \frac{100\% (5,035 \text{ mm} * 114,7825 \text{ mm} - (5,035 \text{ mm})^2) (5,928 \text{ mm})}{(5,928 \text{ mm} * 119,33 \text{ mm} - (5,928 \text{ mm})^2)^2} \right]^2 \right) u^2(\phi_f)
 \end{aligned}$$

$$u_{c,y}^2 = \left( 242,627 \frac{\%^2}{\text{mm}^2} + 172,695 \frac{\%^2}{\text{mm}^2} \right) u^2(\tau_f) + \left( 0,561 \frac{\%^2}{\text{mm}^2} + 0,525 \frac{\%^2}{\text{mm}^2} \right) u^2(\phi_f)$$

$$u_c^2 = \left( 415,322 \frac{\%^2}{\text{mm}^2} \right) u^2(\tau_f) + \left( 1,086 \frac{\%^2}{\text{mm}^2} \right) u^2(\phi_f)$$

$$\begin{aligned}
 u_{c,y}^2 &= \left( 415,322 \frac{\%^2}{\text{mm}^2} \right) \left( \left[ \frac{1}{2} \right]^2 u^2(\tau_{M\acute{a}x}) + \left[ \frac{-1}{2} \right]^2 u^2(\tau_{m\acute{i}n}) \right) + \left( 1,086 \frac{\%^2}{\text{mm}^2} \right) \left( \left[ \frac{1}{2} \right]^2 u^2(\phi_{M\acute{a}x}) \right. \\
 &+ \left. \left[ \frac{-1}{2} \right]^2 u^2(\phi_{m\acute{i}n}) \right)
 \end{aligned}$$

$$u_{c,y}^2 = 103,83 \frac{\%^2}{\text{mm}^2} u^2(\tau_{M\acute{a}x}) + 103,83 \frac{\%^2}{\text{mm}^2} u^2(\tau_{m\acute{i}n}) + 0,27 \frac{\%^2}{\text{mm}^2} u^2(\phi_{M\acute{a}x}) + 0,27 \frac{\%^2}{\text{mm}^2} u^2(\phi_{m\acute{i}n}) \quad (4.a)$$

Teniendo en cuenta el error del método

$$u_c^2 = u_{c,y}^2 + u_{m\acute{e}todo}^2 \quad (4.b)$$

#### 4.1 Cálculo de $u^2(\phi_{M\acute{a}x})$

Se considera que todos los factores que influyen en la incertidumbre de la determinación del diámetro máximo no se encuentran correlacionados y contribuyen de manera independiente entre sí. En función de ello:

$$u^2(\phi_{M\acute{a}x}) = u_{calibr\ microm}^2 + u_{resoluci\ microm}^2 + u_{estabilidad\ microm}^2 + u_{reproducibilidad\ \phi_{M\acute{a}x}}^2 + u_{repetitibilidad\ \phi_{M\acute{a}x}}^2 + u_{dilataci\ \phi_{M\acute{a}x}}^2$$

Teniendo en cuenta los resultados de (3.1.1), (3.2.1), (3.3.1), (3.4.1.1.1), (3.4.1.1.2) y (3.5.1)

$$u^2(\phi_{M\acute{a}x}) = (0,00078\ mm)^2 + (0,0029\ mm)^2 + (0,0025\ mm)^2 + (0,015\ mm)^2 + (0,018\ mm)^2 + (0,0052\ mm)^2$$

$$u^2(\phi_{M\acute{a}x}) = 56,7759 \times 10^{-5}\ mm^2 \quad (4.1)$$

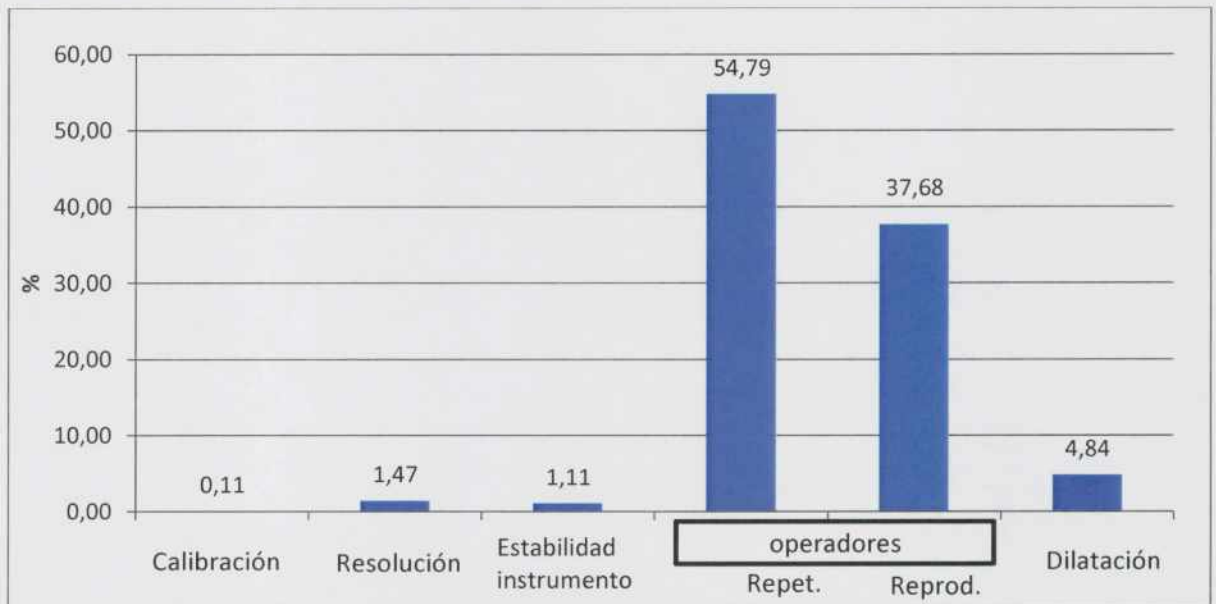


Figura 55 - Contribución % a la varianza del Diámetro Máximo

Los grados de libertad se calculan, siguiendo la recomendación de la norma IRAM 35050 [8], G.4.1, empleando la fórmula de Welch-Satterhwaite

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}}$$

$$\nu_{eff} = \frac{(56,7759 \times 10^{-5}\ mm^2)^2}{\frac{(0,00078\ mm)^4}{\infty} + \frac{(0,0029\ mm)^4}{\infty} + \frac{(0,0025\ mm)^4}{14} + \frac{(0,015\ mm)^4}{48} + \frac{(0,018\ mm)^4}{3} + \frac{(0,0052\ mm)^4}{\infty}}$$

$$\nu_{eff} = \frac{(56,7759 \times 10^{-5}\ mm^2)^2}{\frac{(0,0025\ mm)^4}{14} + \frac{(0,015\ mm)^4}{48} + \frac{(0,018\ mm)^4}{3}} = 9,70$$

#### 4.2 Cálculo de $u^2(\varnothing_{\min})$

Empleando el mismo criterio que para el diámetro máximo:

$$u^2(\varnothing_{\min}) = u_{\text{calibración microm}}^2 + u_{\text{resolución microm}}^2 + u_{\text{estabilidad microm}}^2 + u_{\text{reproducibilidad } \varnothing_{\min}}^2 + u_{\text{repetitibilidad } \varnothing_{\min}}^2 + u_{\text{dilatación } \varnothing_{\min}}^2$$

Teniendo en cuenta los resultados de (3.1.1), (3.2.1), (3.3.1), (3.4.1.2.1), (3.4.1.2.2) y (3.5.2)

$$u^2(\varnothing_{\min}) = (0,00078 \text{ mm})^2 + (0,0029 \text{ mm})^2 + (0,0025 \text{ mm})^2 + (0,0095 \text{ mm})^2 + (0,0060 \text{ mm})^2 + (0,0052 \text{ mm})^2$$

$$u^2(\varnothing_{\min}) = 17,0023 \times 10^{-5} \text{ mm}^2 \quad (4.2)$$

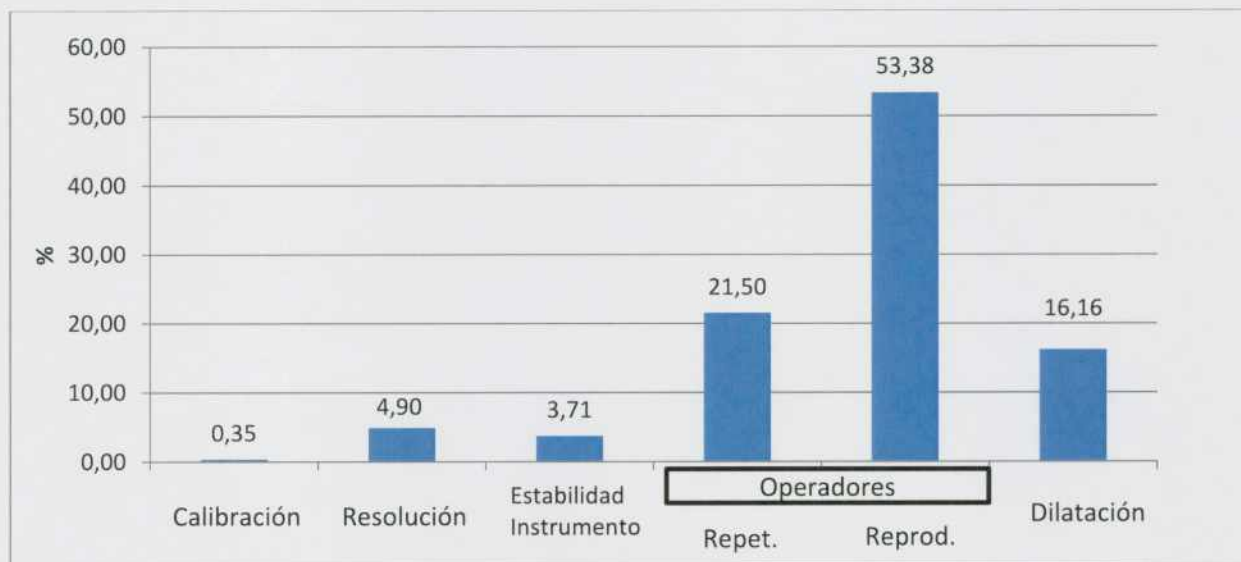


Figura 56 - Contribución % a la varianza del Diámetro mínimo

Empleando la fórmula de Welch-Satterhwaite

$$\vartheta_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\vartheta_i}}$$

$$\vartheta_{eff} = \frac{(17,0023 \times 10^{-5} \text{ mm}^2)^2}{\frac{(0,00078 \text{ mm})^4}{\infty} + \frac{(0,0029 \text{ mm})^4}{\infty} + \frac{(0,0025 \text{ mm})^4}{14} + \frac{(0,0095 \text{ mm})^4}{48} + \frac{(0,0060 \text{ mm})^4}{9} + \frac{(0,0052 \text{ mm})^4}{\infty}}$$

$$\vartheta_{eff} = \frac{(17,0023 \times 10^{-5} \text{ mm}^2)^2}{\frac{(0,0025 \text{ mm})^4}{14} + \frac{(0,0095 \text{ mm})^4}{48} + \frac{(0,0060 \text{ mm})^4}{9}} = 89,53$$

#### 4.3 Cálculo de $u^2(\tau_{M\acute{a}x})$

$$u^2(\tau_{M\acute{a}x}) = u_{\text{calibración us}}^2 + u_{\text{resolución us}}^2 + u_{\text{reproducibilidad } \tau_{M\acute{a}x}}^2 + u_{\text{repetitibilidad } \tau_{M\acute{a}x}}^2 + u_{\text{dilatación } \tau_{M\acute{a}x}}^2$$

Teniendo en cuenta los resultados de (3.1.2), (3.2.2), (3.4.1.3.1), (3.4.1.3.2) y (3.5.3)

$$u^2(\tau_{M\acute{a}x}) = (0,002 \text{ mm})^2 + (0,0029 \text{ mm})^2 + (0,0026 \text{ mm})^2 + (0,0033 \text{ mm})^2 + (0,00023 \text{ mm})^2$$

$$u^2(\tau_{M\acute{a}x}) = 3,03592 \times 10^{-5} \text{ mm}^2 \quad (4.3)$$

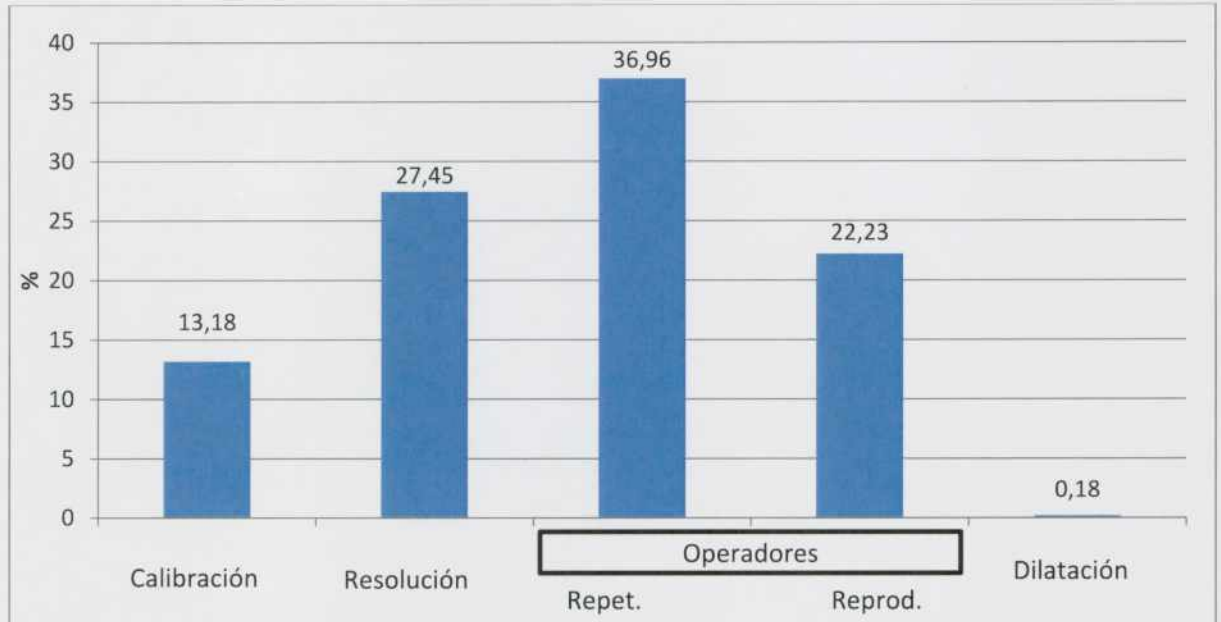


Figura 57- Contribución % a la varianza del Espesor Máximo

Empleando la fórmula de Welch-Satterhwaite

$$\vartheta_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\vartheta_i}}$$

$$\vartheta_{eff} = \frac{(3,03592 \times 10^{-5} \text{ mm}^2)^2}{\frac{(0,002 \text{ mm})^4}{\infty} + \frac{(0,0029 \text{ mm})^4}{\infty} + \frac{(0,0026 \text{ mm})^4}{39} + \frac{(0,0033 \text{ mm})^4}{9} + \frac{(0,00023 \text{ mm})^4}{\infty}}$$

$$\vartheta_{eff} = \frac{(3,03592 \times 10^{-5} \text{ mm}^2)^2}{\frac{(0,0026 \text{ mm})^4}{39} + \frac{(0,0033 \text{ mm})^4}{9}} = 60,79$$

#### 4.4 Cálculo de $u^2(\tau_{mín})$

$$u^2(\tau_{mín}) = u_{calibr}^2 + u_{resolución}^2 + u_{reproducibilidad \tau_{mín}}^2 + u_{repetitibilidad \tau_{mín}}^2 + u_{dilatación \tau_{mín}}^2$$

Teniendo en cuenta los resultados de (3.1.2), (3.2.2), (3.4.1.4.1), (3.4.1.4.2) y (3.5.4)

$$u^2(\tau_{mín}) = (0,002 \text{ mm})^2 + (0,0029 \text{ mm})^2 + (0,0035 \text{ mm})^2 + (0,0060 \text{ mm})^2 + (0,00023 \text{ mm})^2$$

$$u^2(\tau_{mín}) = 6,0941 \times 10^{-5} \text{ mm}^2 \quad (4.4)$$

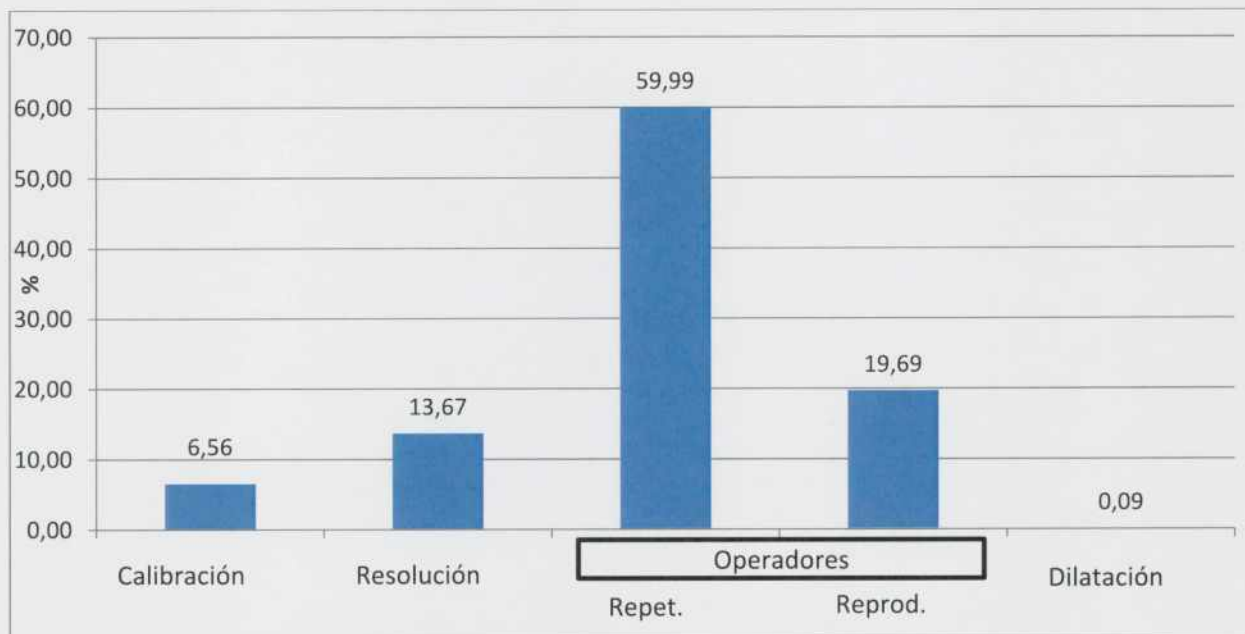


Figura 58- Contribución % a la varianza del Espesor mínimo

Empleando la fórmula de Welch-Satterhwaite

$$\vartheta_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\vartheta_i}}$$

$$\vartheta_{eff} = \frac{(6,0941 \times 10^{-5} \text{ mm}^2)^2}{\frac{(0,002 \text{ mm})^4}{\infty} + \frac{(0,0029 \text{ mm})^4}{\infty} + \frac{(0,0035 \text{ mm})^4}{39} + \frac{(0,0060 \text{ mm})^4}{9} + \frac{(0,00023 \text{ mm})^4}{\infty}}$$

$$\vartheta_{eff} = \frac{(6,0941 \times 10^{-5} \text{ mm}^2)^2}{\frac{(0,0035 \text{ mm})^4}{39} + \frac{(0,0060 \text{ mm})^4}{9}} = 24,40$$

#### 4.5 Cálculo de $u_{c,y}^2$

Teniendo en cuenta la ecuación (4.a)

$$u_{c,y}^2 = 103,83 \frac{\%^2}{\text{mm}^2} u^2(\tau_{M\acute{a}x}) + 103,83 \frac{\%^2}{\text{mm}^2} u^2(\tau_{m\acute{i}n}) + 0,27 \frac{\%^2}{\text{mm}^2} u^2(\varnothing_{M\acute{a}x}) + 0,27 \frac{\%^2}{\text{mm}^2} u^2(\varnothing_{m\acute{i}n}) \quad (4.a)$$

Y reemplazando en ella de acuerdo a (4.1), (4.2), (4.3) y (4.4)

$$u_{c,y}^2 = 103,83 \frac{\%^2}{\text{mm}^2} * [3,03592 \times 10^{-5} \text{ mm}^2] + 103,83 \frac{\%^2}{\text{mm}^2} * [6,0941 \times 10^{-5} \text{ mm}^2] + 0,27 \frac{\%^2}{\text{mm}^2} * [56,7759 \times 10^{-5} \text{ mm}^2] + 0,27 \frac{\%^2}{\text{mm}^2} * [17,0023 \times 10^{-5} \text{ mm}^2]$$

$$u_{c,y}^2 = 0,003152 \%^2 + 0,006327 \%^2 + 0,0001542 \%^2 + 0,00004618 \%^2$$

$$u_{c,y}^2 = 0,009680 \%^2 \quad (4.5.a)$$

$$u_{c,y} = 0,1 \% \quad (4.5.b)$$

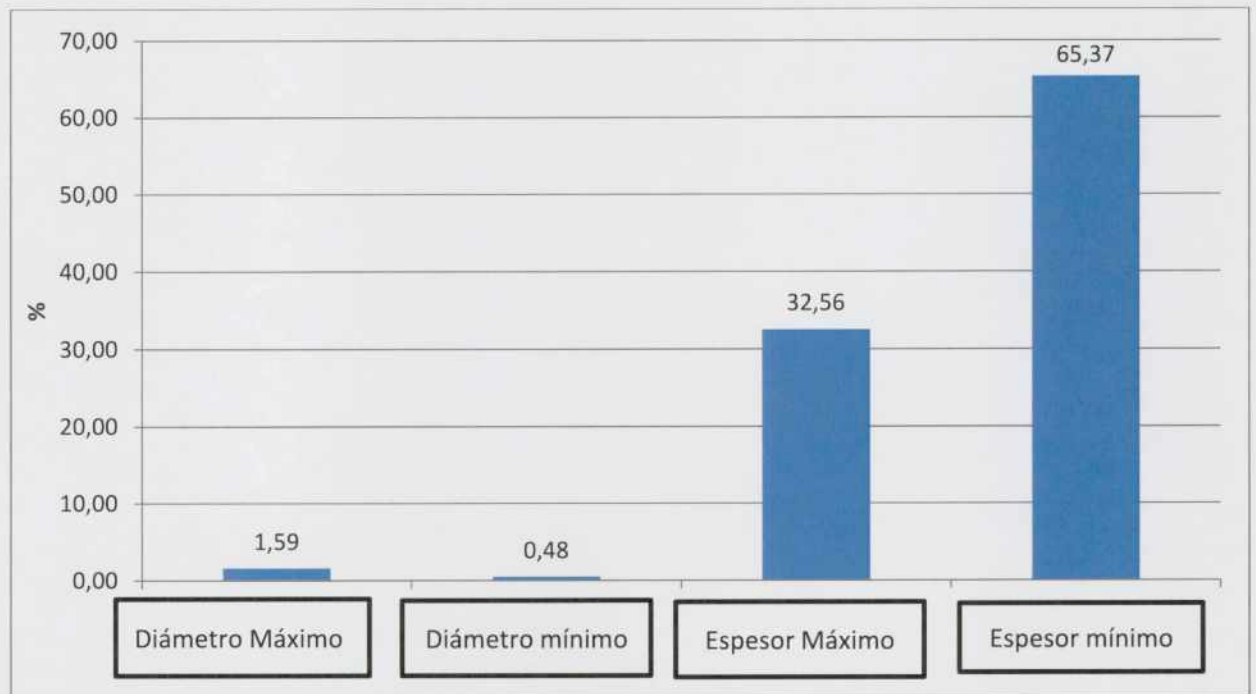


Figura 59 - Contribución % a la varianza de la Medición de la Reducción de Área

Si se asociaran las distintas fuentes de incertidumbre, la contribución porcentual de ellas sería:

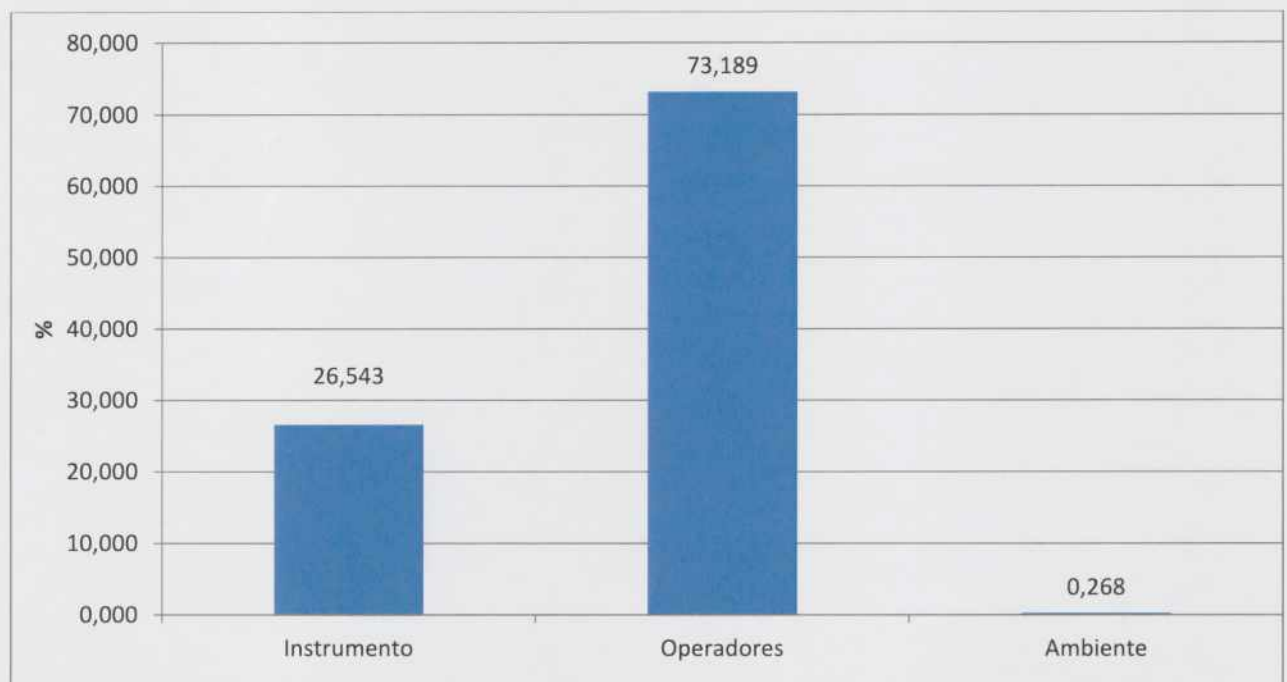


Figura 60 - Contribución % de las fuentes de incertidumbre a la varianza de la Medición de la Reducción de Área

Empleando la fórmula de Welch-Satterhwaite

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}}$$

$$v_{eff} = \frac{(0,009680119 \%^2)^2}{\frac{(0,003152 \%^2)^2}{60} + \frac{(0,006327 \%^2)^2}{24} + \frac{(0,0001542 \%^2)^2}{9} + \frac{(0,00004618 \%^2)^2}{9}}$$

$$v_{eff} = 1369190 \quad (4.5.c)$$

#### 4.6 Cálculo de la incertidumbre combinada $u_c$

Recordando la ecuación (4.b)

$$u_c^2 = u_{c,y}^2 + u_{método}^2$$

Y Reemplazando en ella de acuerdo a (4.5.a) y (3.6.3)

$$u_c^2 = 0,009680 \%^2 + (0,39 \%)^2$$

$$u_c^2 = 0,009680 \%^2 + 0,1513 \%^2$$

$$u_c^2 = 0,1610 \%^2$$

$$u_c = 0,401 \% \quad (4.6)$$

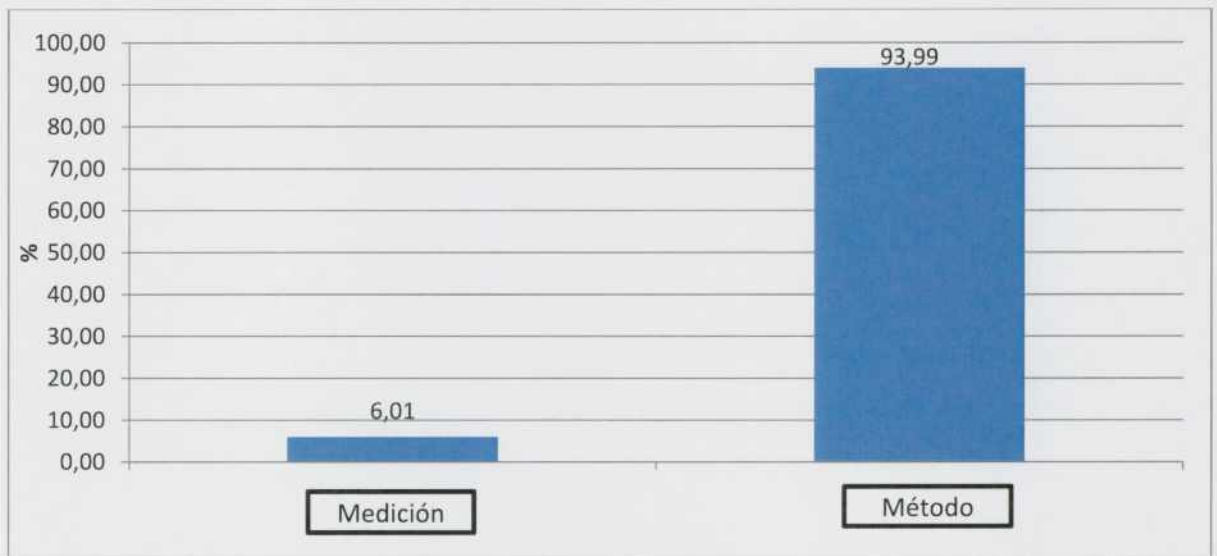


Figura 61 - Contribución % a la varianza de la Reducción de Área

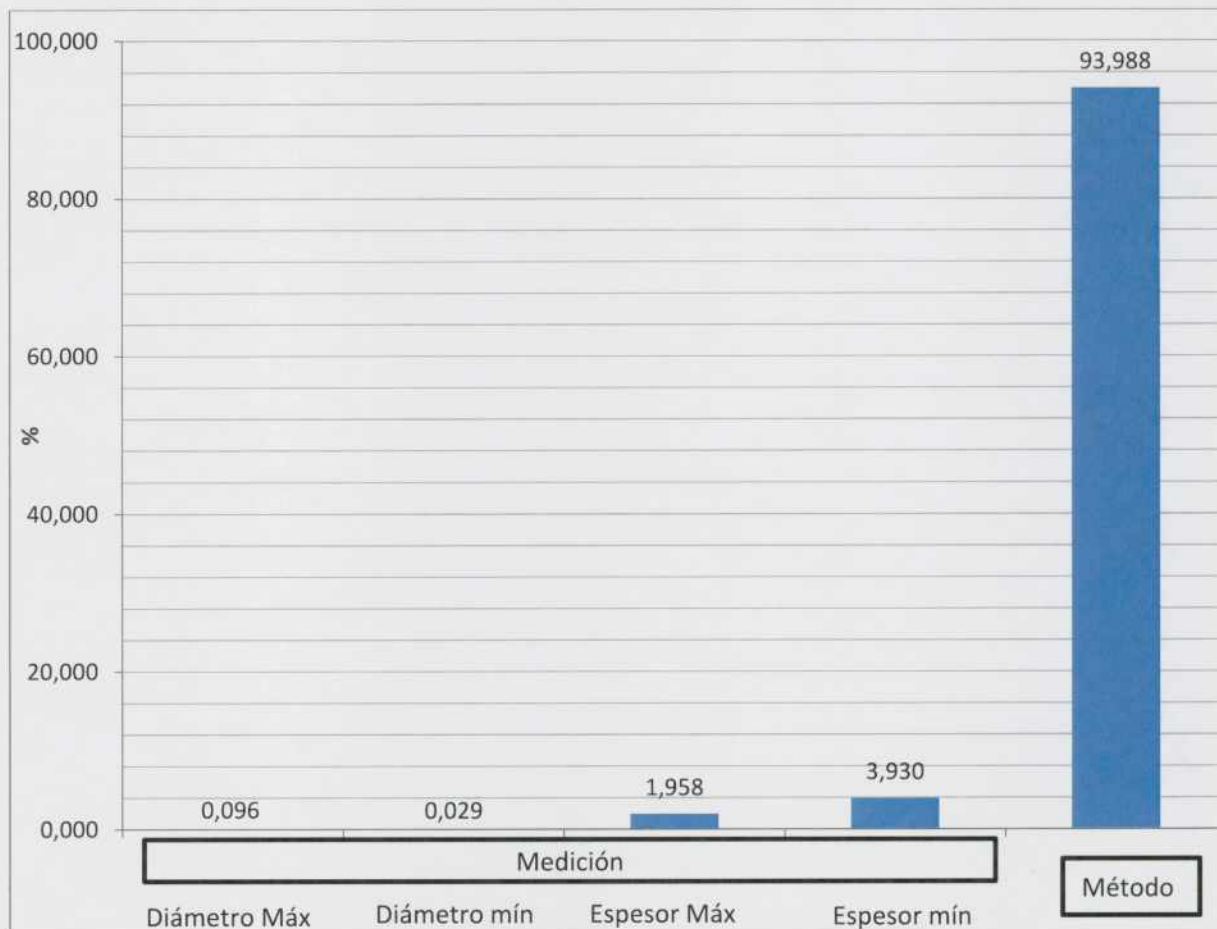


Figura 62 - Contribución % a la varianza de la Reducción de Área (desarrollada)

Asociando nuevamente las distintas fuentes de incertidumbre, la contribución porcentual de ellas sería:

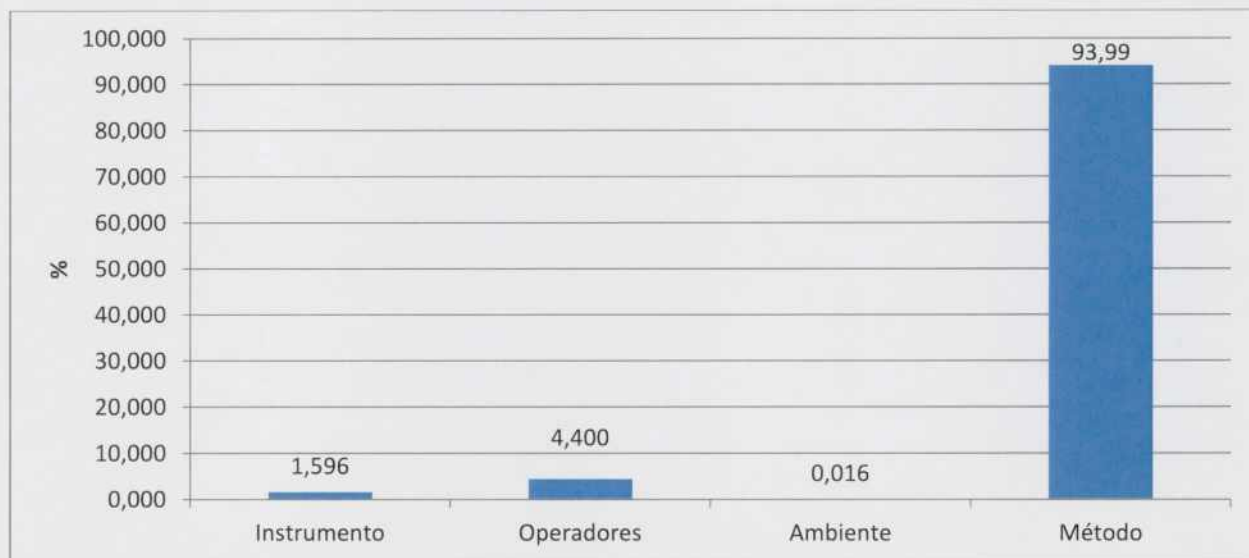


Figura 63 - Contribución % de las fuentes de incertidumbre a la varianza de la Medición

En este caso no se calculan los grados efectivos de libertad según la fórmula de Welch-Satterthwaite dado que, en el caso de la medición se verifica que los grados tienden a infinito, y

Empleo del Sistema de Gestión de la Calidad para la determinación de la incertidumbre en la reducción de área de tubos laminados

*Instituto Dan Beninson – Especialización en Reactores y su Ciclo de Combustible*

por otro lado el error del método se asoció a una distribución rectangular, teniendo del mismo modo infinitos grados de libertad.

En función de ello, resulta que la incertidumbre combinada posee infinitos grados de libertad.

#### 4.7 Cálculo de la incertidumbre expandida $U_p$

De acuerdo a lo indicado en la norma IRAM 35050 [8] en G.4.1, la incertidumbre expandida resulta:

$$U_p = k_p u_c(Y) = t_p(\nu_{eff}) u_c(y)$$

Dado que, como se indicó en 4.6  $\nu_{eff} = \infty$ , de la Tabla G.2 publicada en la norma IRAM 35.050 [8]  $t_p(\infty) = 2$  para  $p=95.45$

$$U_p = 2 u_c(y)$$

Reemplazando con la ecuación (4.6)

$$U_p = 2 \times 0,401 \%$$

$$U_p = 0,8 \% \text{ (4.7)}$$

Tabla 60 - Resumen de fuentes de incertidumbre del Diámetro Máximo

Magnitud de entrada Xi	Fuente de incertidumbre	Fuente de información	Incertidumbre original	Tipo	Distribución	Valor de la incertidumbre estándar [mm]	Coef. sensibilidad	Sensibilidad *Incertidumbre estándar	Contribución = (Sensibilidad *Incert Std)^2	Grados de libertad	% de aporte	Cálculo en
Diámetro Máximo	Calibración del instrumento	Certificado de calibración	1 $\mu\text{m}$ + 0,975 $\mu\text{m}$	B	Rectangular y Normal	7,8E-04	1	0,00078	6,0245E-07	$\rightarrow \infty$	0,11	3.1.1
	Resolución del instrumento	Escala	0,01 mm	B	Rectangular	0,0029	1	0,0029	8,3333E-06	$\infty$	1,47	3.2.1
	Repetibilidad del instrumento	Carta de control	0,010 mm	A	Normal	0,0025	1	0,0025	6,3101E-06	14	1,11	3.3.1
	Repetibilidad de un operador	Mediciones repetidas	0,031 mm	A	Normal	0,018	1	0,018	0,0003111	3	54,79	3.4.1.1.2
	Reproducibilidad de operadores	Mediciones repetidas		A	Rectangular	0,015	1	0,015	0,0002139	48	37,68	3.4.1.1.1
	Dilatación térmica	Suposición	0,018 mm	B	Rectangular	0,0052	1	0,0052	2,7486E-05	$\infty$	4,84	3.5.1
	$u^2(\phi_{\text{Máx}}) = 0,0005678 \text{ mm}^2$											1,59

Tabla 61- Resumen de fuentes de incertidumbre del Diámetro mínimo

Magnitud de entrada Xi	Fuente de incertidumbre	Fuente de información	Incertidumbre original	Tipo	Distribución	Valor de la incertidumbre estándar [mm]	Coef. sensibilidad	Sensibilidad *Incertidumbre estándar	Contribución = (Sensibilidad*Incert Std)^2	Grados de libertad	% de aporte	Cálculo en
	Calibración del instrumento	Certificado de calibración	1 $\mu\text{m}$ + 0,975 $\mu\text{m}$	B	Rectangular y Normal	7,7E-04	1	0,00078	6,0245E-07	$\rightarrow \infty$	0,35	3.1.1
	Resolución del instrumento	Escala	0,01 mm	B	Rectangular	0,0029	1	0,0029	8,3333E-06	$\infty$	4,90	3.2.1
	Repetibilidad del instrumento	Carta de control	0,010 mm	A	Normal	0,0025	1	0,0025	6,3101E-06	14	3,71	3.3.1
	Repetibilidad de un operador	Mediciones repetidas	0,019 mm	A	Normal	0,0060	1	0,0060	3,6556E-05	9	21,50	3.4.1.2.2
	Reproducibilidad de operadores	Mediciones repetidas		A	Rectangular	0,0095	1	0,0095	9,0750E-05	48	53,38	3.4.1.2.1
	Dilatación térmica	Suposición	0,018 mm	B	Rectangular	0,0052	1	0,0052	2,7472E-05	$\infty$	16,16	3.5.2
	Diámetro Mínimo	$u^2(\phi_{min}) = 0,00017002 \text{ mm}^2$										0,48



Tabla 63 - Resumen de fuentes de incertidumbre del Espesor mínimo

Magnitud de entrada $X_i$	Fuente de incertidumbre	Fuente de información	Incertidumbre original [mm]	Tipo	Distribución	Valor de la incertidumbre estándar [mm]	Coef. Sensibilidad	Sensibilidad * Incertidumbre estándar	Contribución = (Sensibilidad * Incert Std) <sup>2</sup>	Grados de libertad	% de aporte	Cálculo en
Espesor mínimo	Calibración del instrumento	Certificado de calibración	0,004	B	Normal	0,002	1	0,002	0,000004	$\rightarrow \infty$	6,56	3.1.2
	Resolución del instrumento	Escala	0,01	B	Rectangular	0,0029	1	0,0029	8,3333E-06	$\infty$	13,67	3.2.2
	Repetibilidad de un operador	Mediciones repetidas	0,019	A	Normal	0,0060	1	0,0060	3,6555E-05	9	59,98	3.4.1.4.2
	Reproducibilidad de operadores	Mediciones repetidas		A	Rectangular	0,0035	1	0,0035	1,2E-05	48	19,69	3.4.1.4.1
	Dilatación térmica	Suposición	0,00079	B	Rectangular	0,00023	1	0,00023	5,2140E-08	$\infty$	0,086	3.5.4
$u^2(\tau_{min}) = 6,0941E-05 \text{ mm}^2$											65,37	4.4

Tabla 64 - Resumen de fuentes de incertidumbre de la Reducción de Área

Magnitud de entrada Xi	Fuente de incertidumbre	Fuente de información	Incertidumbre original	Tipo	Distribución	Valor de la incertidumbre estándar [mm]	(coef sensibilidad ad) ^2	Sensibilidad ad* Incertidumbre estándar	Contribución= (Sensibilidad* Incert Std)^2	Grados de libertad	% de aporte	Cálculo en
Reducción de Área	Diám Máx	Cálculos		A	Normal	0,024	0,27159		0,0001542	9	1,59	4.1
	Diám mín	Cálculos		A	Normal	0,013	0,27159		4,6177E-05	89	0,48	4.2
	Espesor Max	Cálculos		A	Normal	0,0055	103,83		0,003152	60	32,56	4.3
	Espesor min	Cálculos		A	Normal	0,0078	103,83		0,006327	24	65,37	4.4
$u_{c,y}^2 = 0,009680 \text{ \%}^2$											8,07	4.5.a

Reducción Área	Cálculos			A	Normal	0,098 %	1		0,009680	$\rightarrow \infty$	8,07	4.5.a
	Error de método	Estudio empírico	1.15%	B	Rectangular	0,389 %	1	0,389	0,15132	$\infty$	91,93	3.6.3
Total	$u_c^2 = 0,16100112 \text{ \%}^2$											
$U = \sqrt{u_c}$	$u_c = 0,401 \text{ \%}$											
U (k=2)	$U = 0,80 \text{ \%}$											
Medición informada	17,8 %											

## 5 Elementos del Sistema de Gestión de la Calidad

A continuación se hará una breve referencia a los documentos y registros que forman parte del Sistema de Gestión y que permitieron la realización de los cálculos realizados en el punto 4 del presente trabajo. Por razones de confidencialidad, en los registros y documentos presentados en este trabajo han sido eliminados los nombres y firmas del personal involucrado en ellos.

### 5.1 Instrumentos

Los instrumentos se encuentran alcanzados por un procedimiento relacionado con el control de equipos e instrumentos en el cual se establece la documentación mínima que se debe disponer (junto con los certificados de calibración), a saber:

- Un listado de instrumentos:

FO-PPFAE-008 Rev 0

<b>CNEA</b>	<b>LISTADO DE MÁQUINAS E INSTRUMENTOS</b>	Fecha: 20140703 Página: 1 de 4
-------------	---	-----------------------------------


Código	Nombre	Marca	Modelo	N° de Serie	Unidad	Rango	Apreciación	Observaciones
PPFAE-INS-001	Micrómetro	Mahr	N.A.	382800	mm	100 a 150	0.01	
PPFAE-INS-002	Circunferenciómetro	Schwenk	CJU 950	N.A.	mm	Circunferencia 60 a 950 Diámetro 20 a 300	0.1	
PPFAE-INS-003	Calibre	Mahr	0-340	N.A.	mm	0-340	0.02	F.A.S.
PPFAE-INS-004	Calibre	Mitutoyo	0-200	N.A.	mm	0-200	0.02	F.A.S.
PPFAE-INS-005	Calibre	Mitutoyo	0-150	11807225	mm	0-150	0.02	F.A.S.
PPFAE-INS-006	Calibre	Mitutoyo	0-200	11829667	mm	0-200	0.02	F.A.S.
PPFAE-INS-007	Calibre de Profundidad	Mahr	0-170	N.A.	mm	0-170	0.02	F.A.S.
PPFAE-INS-008	Calibre de Altura	Mahr	0-550	N.A.	mm	0-550	0.02	F.A.S.
PPFAE-INS-009	Micrómetro	Mahr	0-25	386086	mm	0-25	0.01	F.A.S.
PPFAE-INS-010	Micrómetro	Mahr	50-75	380275	mm	50-75	0.01	F.A.S.
PPFAE-INS-011	Micrómetro	Mahr	75-100	386258	mm	75-100	0.01	F.A.S.
PPFAE-INS-012	Micrómetro	Mahr	150-200	383009	mm	150-200	0.01	F.A.S.
PPFAE-INS-013	Micrómetro	Feinmeyer	325-350	KHD.785	mm	325-350	0.01	F.A.S.
PPFAE-INS-014	Micrómetro	Somet	25-50	CSN25 1420	mm	25-50	0.01	F.A.S.
PPFAE-INS-015	Micrómetro	Tesa	0-25	03.10001	mm	0-25	0.01	F.A.S.
PPFAE-INS-016	Micrómetro	Tesa	25-50	AG2371	mm	25-50	0.001	F.A.S.
PPFAE-INS-017	Micrómetro en "V"	Mitutoyo	114-102	6025942	mm	10-25	0.01	F.A.S.
PPFAE-INS-018	Regla	Diamante	348538	N.A.	cm	0-100	0.1	F.A.S.
PPFAE-INS-019	Micrómetro de Interiores	Etalon	9.5-12.5	N.A.	mm	9.5-12.5	0.01	F.A.S.
PPFAE-INS-020	Micrómetro de Interiores	Etalon	12.5-15.5	N.A.	mm	12.5-15.5	0.01	F.A.S.
PPFAE-INS-021	Micrómetro de Interiores	Etalon	15.5-17.5	N.A.	mm	15.5-17.5	0.01	F.A.S.
PPFAE-INS-022	Micrómetro de Interiores	Etalon	17.5-20.5	N.A.	mm	17.5-20.5	0.01	F.A.S.

N.A.: No Aplicable    F.A.S.: Fuera del Alcance del Sistema    S.E.: Sin Etiqueta

➤ Una ficha por instrumento

FO-PPFAE-004 Rev 0

<b>CNEA</b>	<b>FICHA DEL EQUIPO/ INSTRUMENTO</b>	Fecha: 20120208
		Página: 1 de 1

CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO/ INSTRUMENTO			
Código: PPFAE-INS-001	Descripción: Micrómetro		
Marca: Mahr	Modelo:		
N° de Serie: 382800	N° de Inventario: 378393		
Unidad de Medida: mm	Rango: 100 a 150		
UBICACIÓN FÍSICA			
Gerencia: Ciclo de Combustible	Sector: PPFAE		
Ubicación: Sector Laminación			
Responsable: Daniel Bianchi			
CALIBRACIÓN Y MANTENIMIENTO			
Procedimiento de calibración: Calibración Externa			
Frecuencia de calibración: Semestral			
Procedimiento de mantenimiento: No Aplicable			
Frecuencia de mantenimiento: No Aplicable			
Procedimiento de verificación: IT-PPFAE-006			
Frecuencia de verificación: Previo al uso diario			
RECEPCIÓN			
Fecha: No Aplicable		Intervino: No Aplicable	
Observaciones: Instrumento recibido previo a la implementación del Sistema de Gestión de la Calidad			
Estado de Recepción:	Nuevo:	Usado:	Reacondicionado:
PUESTA EN SERVICIO			
Fecha: No Aplicable		Intervino: No Aplicable	
OBSERVACIONES: Instrumento recibido previo a la implementación del Sistema de Gestión de la Calidad			
FIRMA RC:		Fecha	
 <b>FIRMA DEL RC</b>		16 - 07 - 2012	



➤ Un programa de calibraciones de los instrumentos

FO-PPFAE-006 Rev 0

<b>CNEA</b>	<b>PROGRAMA DE MANTENIMIENTO/ CALIBRACIÓN</b>	Año: 2015 Página: 1 de 1
-------------	---	-----------------------------

Código del Equipo/ Instrumento	Denominación	Mes de realización	Responsable	Código de instrucción	Observaciones
PPFAE-INS-001	Micrómetro	Octubre	RC	Externo	
PPFAE-MAQ-001	Laminadora HPTR 60/120	Semanal	EM	IT-PPFAE-004	
PPFAE-MAQ-002	Laminadora HPTR 8/15	Semanal	EM	IT-PPFAE-004	
PPFAE-INS-032	Micrómetro	Octubre	RC	Externo	
PPFAE-INS-042	Micrómetro	Julio	RC	Externo	

Firma: Firma del RC Fecha: 06/12/2014

- Los certificados de calibración del instrumento

## Identificación del laboratorio de calibración



Laboratorios: Dirección del laboratorio de calibración

## METROLOGÍA

### Laboratorio de Calibración de Instrumental

#### INFORME DE CONTROL DIMENSIONAL

#### Metodología aplicada

Descripción: Control dimensional de espesor de placa **aleación** para ser utilizada como patrón de ultrasonidos, mediante el empleo de comparador milesimal y bloques patrones.

Trazabilidad (Patrones de referencia empleados): Reloj comparador milesimal código 04-070-007 y juego de bloques patrones código 00-031-001.

#### Resultados obtenidos

N° DE MEDICIONES										VALOR MEDIO [mm]	INCERT. DE MED. EXPANDIDA
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
4.612	4.614	4.618	4.615	4.612	4.618	4.614	4.616	4.615	4.616	4.615	± 0.004

Incertidumbre de medición:  $\pm 0.004$  mm

Temperatura durante el ensayo: 20.4°C

Fecha de ejecución: 23/11/2013

Fecha de emisión del Certificado: 23/11/2013

Número de páginas del Certificado y anexos: 1

**Firma 1**

Nombre:  
Operador Técnico

**Firma 2**

Nombre:  
Responsable Técnico

- En caso de corresponder, los registros para la verificación periódica del instrumento


FO-PPFAE-050 Rev. 0

REGISTRO DE VERIFICACIÓN DE MICRÓMETRO			
CNEA PPFAE	Instrumento: PPFAE-INS-001 Referencia: REF-001 – REF-002	Hoja N° 1	
Fecha	Valor	Realizó (Firma)	Observaciones
10/10/13	125,004 / 100,006		
11/10/13	125,00 / 99,995		
15/10/13	124,99 / 100,00		
16/10/13	125,01 / 99,99		
18/10/13	125,03 / 99,995		
24/10/13	125,06 / 100,005		
25/10/13	125,05 / 100,00		
29/10/13	125,00 / 99,995		
30/10/13	124,995 / 99,99		
01/11/13	125,00 / 99,995		
04/11/13	124,99 / 99,99		
05/11/13	125,00 / 99,99		
06/11/13	125,00 / 100,00		
07/11/13	99,995 / 125,00		
08/11/13	124,99 / 99,985		
11/11/13	124,98 / 100,00		
27/11/13	124,995 / 99,995		
28/11/13	124,99 / 99,995		
04/11/13	124,995 / 99,995		
02/12/13	124,995 / 99,99		
03/12/13	124,99 / 99,99		
04/12/13	124,995 / 99,995		
05/12/13	124,995 / 99,995		
10/12/13	124,995 / 99,995		
11/12/13	124,995 / 99,99		
17/12/13	124,995 / 99,99		
16/12/13	125,00 / 99,995		
18/03/14	124,995		124,995
20/03/14	125,00		
24/04/14	124,995		
25/08/14	125,02		
29/09/14	125,30		FUERA DE CALIBRACION (NO UTILIZARE)!!
30/09/14	125,000		
05/05/14	125,00		
07/05/14	125,20		
15/06/14	125,00		

F  
I  
R  
M  
A  
S

Documento de control de equipos:

FO-PR-001 r2


	<b>GERENCIA CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR PPFAE</b>			PO-PPFAE-003 Rev.: 1		
	<b>PROCEDIMIENTO OPERATIVO</b>			Página: 1 de 7		
<b>TÍTULO: Mantenimiento y Calibración</b>						
<b>1. OBJETIVO</b> Establecer las pautas para identificar, calibrar, verificar, controlar y/o mantener las máquinas e instrumentos de medición.						
<b>2. ALCANCE</b> Aplicable a las máquinas e instrumentos de medición que afecten la calidad de los productos de PPFAE.						
Preparó		Revisó			Intervino calidad	Aprobó
<small>FIRMA ELABORADOR INTERNO</small>		<small>FIRMA REVISOR INTERNO</small>			<small>FIRMA RESPONSABLE DE LA CALIDAD</small>	<small>FIRMA JEFE DE PLANTA</small>
<b>REVISIONES</b>						
Rev.	Fecha	Modificaciones				
0	13/02/2012	Original				
1	08/08/2012	3.2, 6.2.3, 6.2.4, 6.2.5, 6.3.1, 6.3.2, 6.3.4, 7				
<b>FECHA DE VIGENCIA: 13.08.12</b>						
<b>DISTRIBUCIÓN</b>			<b>ESTADO DEL DOCUMENTO</b>			
Copia Nº: Distribuyó:			Fecha: 13.08.12 Firma: FIRMA DEL RESPONSABLE DE LA CALIDAD			
<b>NOTA:</b> Este documento es propiedad de CNEA y se reserva todos los derechos legales sobre él. No está permitida la explotación, transferencia o liberación de ninguna información en el contenido, ni hacer reproducciones y entregarlas a terceros sin un acuerdo previo y escrito de CNEA.						

## 5.2 Producción

El Sistema de Gestión implementado establece que debe estar documentado el método de producción y los controles que se realizan al producto elaborado.


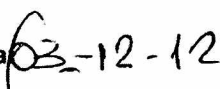
En el documento de producción es donde, en este caso, se especifican los requisitos del cliente (de hecho, este documento fue revisado por el cliente).

FO-PR-001 r2

	<b>GERENCIA CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR PPFAE</b>			IT-PPFAE-001 Rev.: 1		
	<b>INSTRUCCIÓN DE TRABAJO</b>			Página: 01 de 8		
<b>TÍTULO: Laminación en frío en HPTR 60/120 –Proyecto Tubos</b>						
<b>1. OBJETIVO</b> Establecer la metodología de trabajo para la laminación de Tubos por medio de laminado en frío en 2 pasadas. La deformación total por laminado (definida por la reducción del área de la sección transversal) deberá estar entre el 26 % y el 30 %.						
<b>2. ALCANCE</b> Laminación en frío en 2 pasadas a realizarse en la fabricación de los Tubos						
Preparó		Revisó			Intervino calidad	Aprobó
FIRMA ELABORADOR INTERNO		FIRMA 1 CLIENTE	FIRMA 2 CLIENTE		FIRMA RESPONSABLE DE LA CALIDAD	FIRMA JEFE DE PLANTA
<b>REVISIONES</b>						
Rev.	Fecha	Modificaciones				
0	26/09/2012	Original				
1	12/11/2013	Tabla 1				
<b>FECHA DE VIGENCIA:</b>						
<b>DISTRIBUCIÓN</b> Copia Nº: Distribuyó:			<b>ESTADO DEL DOCUMENTO</b> Fecha: 26/11/2013 Firma: FIRMA DEL RESPONSABLE DE LA CALIDAD			
<b>NOTA:</b> Este documento es propiedad de CNEA y se reserva todos los derechos legales sobre él. No está permitida la explotación, transferencia o liberación de ninguna información en el contenido, ni hacer reproducciones y entregarlas a terceros sin un acuerdo previo y escrito de CNEA.						

En el documento de Inspección es donde se establecen cómo son los controles que se realizan al producto elaborado y, de hecho, es allí donde se establece la metodología de medición con la que se obtuvieron los valores empleados en la presente tesis.


FO-PR-001 r2

	<b>GERENCIA CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR PPFAE</b>			IT-PPFAE-012 Rev.: 0		
	<b>INSTRUCCIÓN DE TRABAJO</b>			Página: 1 de <del>9</del> 9		
<b>TÍTULO: Inspección Visual y Dimensional - Proyecto Tubos</b>						
<p><b>1. OBJETIVO</b></p> <p>Establecer la metodología para efectuar la inspección visual y los controles dimensionales de los Tubos</p> <p><b>2. ALCANCE</b></p> <p>Este documento se aplica a la fabricación de Tubos</p>						
<b>Preparó</b>		<b>Revisó</b>			<b>Intervino calidad</b>	<b>Aprobó</b>
<small>FIRMA ELABORADOR INTERNO</small>		<small>FIRMA REVISOR INTERNO</small>	<small>FIRMA 1 CLIENTE</small>	<small>FIRMA 2 CLIENTE</small>	<small>FIRMA RESPONSABLE DE LA CALIDAD</small>	<small>FIRMA JEFE DE PLANTA</small>
<b>REVISIONES</b>						
<b>Rev.</b>	<b>Fecha</b>	<b>Modificaciones</b>				
0	27.11.12	Original				
<b>FECHA DE VIGENCIA:</b>						
<b>DISTRIBUCIÓN</b>			<b>ESTADO DEL DOCUMENTO</b>			
Copia N°:			Fecha: 03-12-12			
Distribuyó:			Firma: 			
			<small>FIRMA DEL RESPONSABLE DE LA CALIDAD</small>			
<p><b>NOTA:</b> Este documento es propiedad de CNEA y se reserva todos los derechos legales sobre él. No está permitida la explotación, transferencia o liberación de ninguna información en el contenido, ni hacer reproducciones y entregarlas a terceros sin un acuerdo previo y escrito de CNEA.</p>						

### 5.3 Gestión


El Manual de la Calidad presenta el Sistema de Gestión de la Calidad implementado. En este documento se presenta la organización de la Planta, se describen los procesos que allí se realizan y se referencian todos los documentos del Sistema (entre ellos el procedimiento de Mantenimiento y Calibración citado en el punto 5.1).

FO-PR-001 r2

	<b>Gerencia Ciclo del Combustible Nuclear PPFAE</b>			MC-PPFAE-001 Rev.: 1		
	<b>MANUAL DE CALIDAD</b>			Página: 01 de 11		
<b>TÍTULO: MANUAL DE LA CALIDAD DE LA PPFAE</b>						
<b>1. OBJETIVO</b> Describir el Sistema de Gestión de la Calidad de la Planta Piloto de Fabricación de Aleaciones Especiales (PPFAE), estableciendo las políticas que rigen los procesos inherentes para la laminación en frío de tubos de aleaciones especiales que se llevan a cabo en la PPFAE.						
<b>2. ALCANCE</b> Todas las actividades relacionadas con los procesos que se desarrollan en la PPFAE.						
Preparó		Revisó			Intervino calidad	Aprobó
FIRMA ELABORADOR INTERNO		FIRMA REVISOR INTERNO			FIRMA RESPONSABLE DE LA CALIDAD	FIRMA JEFE DE PLANTA
<b>REVISIONES</b>						
Rev.	Fecha	Modificaciones				
0	25/07/2012	Original				
1	06/08/2012	1, 3, 4.2, 4.3, 5.1, 5.2, 6, 7, 7.2, 7.3, 7.4, 7.5.2, 7.5.3, 8.1, 9, 9.1.6, 9.2.2, 9.2.4, 9.2.5, 9.3.1, 9.3.2				
<b>FECHA DE VIGENCIA: 13-08-12</b>						
DISTRIBUCIÓN			ESTADO DEL DOCUMENTO			
Copia Nº:			Fecha: 13,08.12			
Distribuyó:			Firma: FIRMA DEL RESPONSABLE DE LA CALIDAD			
<b>NOTA:</b> Este documento es propiedad de CNEA y se reserva todos los derechos legales sobre él. No está permitida la explotación, transferencia o liberación de ninguna información en el contenido, ni hacer reproducciones y entregarlas a terceros sin un acuerdo previo y escrito de CNEA.						

El Plan de la Calidad es un documento específico dedicado al proyecto de laminación al que pertenecen los valores del presente trabajo. En este documento se describen las características específicas del trabajo a realizar (o se hace referencia a otros documentos donde éstas se detallan). Los documentos presentados en el punto 5.2, junto con el Plan de Fabricación e Inspección específico son referenciados en este Plan de la Calidad.

FO-PR-001 r2

	<b>Gerencia Ciclo del Combustible Nuclear PPFAE</b>			PC-PPFAE-001 Rev.: 0		
	<b>PLAN DE LA CALIDAD</b>			Página: 01 de 6		
<b>TÍTULO: PRODUCCIÓN DE TUBOS</b>						
<b>1. OBJETIVO</b> Describir la documentación aplicable al proyecto de laminación de tubos dentro del Sistema de Gestión de la Calidad de la Planta Piloto de Fabricación de Aleaciones Especiales (PPFAE).						
<b>2. ALCANCE</b> Todas las actividades relacionadas con los procesos de laminación de tubos						
Preparó		Revisó			Intervino calidad	Aprobó
FIRMA ELABORADOR INTERNO		FIRMA REVISOR INTERNO			FIRMA RESPONSABLE DE LA CALIDAD	FIRMA JEFE DE PLANTA
<b>REVISIONES</b>						
Rev.	Fecha	Modificaciones				
0	03/07/2014	Original				
<b>FECHA DE VIGENCIA:</b>						
<b>DISTRIBUCIÓN</b>			<b>ESTADO DEL DOCUMENTO</b>			
Copia N°: Distribuyó:			Fecha: <i>03/07/2014</i> Firma: FIRMA DEL RESPONSABLE DE LA CALIDAD			
<b>NOTA:</b> Este documento es propiedad de CNEA y se reserva todos los derechos legales sobre él. No está permitida la explotación, transferencia o liberación de ninguna información en el contenido, ni hacer reproducciones y entregarlas a terceros sin un acuerdo previo y escrito de CNEA.						


El Procedimiento de Personal y Capacitación es el que establece las competencias necesarias para que a un operador se lo considere calificado, entre otras cosas, para realizar las mediciones de la producción. Este documento establece los registros necesarios asociados a esta temática (registros de calificación, programa de capacitación, etc.).

FO-PR-001 r2

	<b>GERENCIA CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR PPFAE</b>			PO-PPFAE-001 Rev.: 0		
	PROCEDIMIENTO OPERATIVO			Página: 1 de 6		
<b>TÍTULO: PERSONAL Y CAPACITACIÓN</b>						
<p><b>1. OBJETIVO</b> Establecer los métodos, la secuencia y la forma de mantener actualizada la capacitación, el entrenamiento y la calificación del personal de la PPFAE.</p> <p><b>2. ALCANCE</b> Aplicable al personal que realiza actividades en la PPFAE.</p>						
<b>Preparó</b>		<b>Revisó</b>			<b>Intervino calidad</b>	<b>Aprobó</b>
FIRMA ELABORADOR INTERNO		FIRMA REVISOR INTERNO			FIRMA RESPONSABLE DE LA CALIDAD	FIRMA JEFE DE PLANTA
<b>REVISIONES</b>						
<b>Rev.</b>	<b>Fecha</b>	<b>Modificaciones</b>				
0	13/04/2012	Original				
<b>FECHA DE VIGENCIA:</b> 26.4.12						
<b>DISTRIBUCIÓN</b>			<b>ESTADO DEL DOCUMENTO</b>			
Copia N°:			Fecha: 13.4.12			
Distribuyó:			Firma: FIRMA DEL RESPONSABLE DE LA CALIDAD			
<p><b>NOTA:</b> Este documento es propiedad de CNEA y se reserva todos los derechos legales sobre él. No está permitida la explotación, transferencia o liberación de ninguna información en el contenido, ni hacer reproducciones y entregarlas a terceros sin un acuerdo previo y escrito de CNEA.</p>						


El procedimiento de Tratamiento de No Conformidades es el que establece la metodología a seguir en caso de detectarse el incumplimiento de un requisito (por ejemplo la obtención de un producto no conforme con las especificaciones o una verificación errónea del estado de calibración de un instrumento).

FO-PR-001 r2

	<b>GERENCIA CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR PPFAE</b>			PO-PPFAE-007 Rev.: 0		
	<b>PROCEDIMIENTO OPERATIVO</b>			Página: 1 de 7		
<b>TÍTULO: Tratamiento de No Conformidades</b>						
<b>1. OBJETIVO</b>						
Establecer el tratamiento de quejas, trabajos no conformes y no conformidades que se presenten en el sistema de la calidad, para lograr la corrección y solución de las mismas, y evitar su ocurrencia o repetición.						
<b>2. ALCANCE</b>						
Aplicable a las quejas y trabajos no conformes, no conformidades de la PPFAE.						
<b>Preparó</b>		<b>Revisó</b>			<b>Intervino calidad</b>	<b>Aprobó</b>
<small>FIRMA ELABORADOR INTERNO</small>		<small>FIRMA REVISOR INTERNO</small>			<small>FIRMA RESPONSABLE DE LA CALIDAD</small>	<small>FIRMA JEFE DE PLANTA</small>
<b>REVISIONES</b>						
<b>Rev.</b>	<b>Fecha</b>	<b>Modificaciones</b>				
0	29/02/2012	Original				
<b>FECHA DE VIGENCIA:</b> 06/03/2012						
<b>DISTRIBUCIÓN</b>			<b>ESTADO DEL DOCUMENTO</b>			
Copia Nº:			LIBRE			
Distribuyó:			Fecha: 29/02/2012			
			Firma: FIRMA DEL RESPONSABLE DE LA CALIDAD			
<b>NOTA:</b> Este documento es propiedad de CNEA y se reserva todos los derechos legales sobre él. No está permitida la explotación, transferencia o liberación de ninguna información en el contenido, ni hacer reproducciones y entregarlas a terceros sin un acuerdo previo y escrito de CNEA.						


El procedimiento de Adquisiciones de Productos y Servicios establece los requisitos que deben cumplir los productos y servicios que recibe la Planta y que impactan en la calidad del servicio de laminación (por ejemplo adquisición del servicio de calibración de instrumentos o la adquisición de un nuevo instrumento de medición).

FO-PR-001 r2

	<b>GERENCIA CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR PPFAE</b>			PO-PPFAE-010 Rev.: 1		
	<b>PROCEDIMIENTO OPERATIVO</b>			Página: 1 de 8		
<b>TÍTULO: Adquisiciones de Productos y Servicios</b>						
<b>1. OBJETIVO</b> Establecer la metodología para la adquisición de suministros y servicios.						
<b>2. ALCANCE</b> Adquisición de productos o servicios que afecten la calidad de los servicios que provee la PPFAE No incluye los aspectos administrativos de gestión de las adquisiciones.  Las adquisiciones de productos o servicios de nivel II quedan fuera del alcance del presente procedimiento.						
Preparó		Revisó			Intervino calidad	Aprobó
<small>FIRMA ELABORADOR INTERNO</small>		<small>FIRMA REVISOR INTERNO</small>			<small>FIRMA RESPONSABLE DE LA CALIDAD</small>	<small>FIRMA JEFE DE PLANTA</small>
<b>REVISIONES</b>						
Rev.	Fecha	Modificaciones				
0	12/06/12	Original				
1	06/08/2012	3, 4.2, 6, 7				
<b>FECHA DE VIGENCIA:</b> 13.08.12						
<b>DISTRIBUCIÓN</b>			<b>ESTADO DEL DOCUMENTO</b>			
Copia N°:  Distribuyó:			Fecha: 13.08.12  Firma: <small>FIRMA DEL RESPONSABLE DE LA CALIDAD</small>			
<b>NOTA:</b> Este documento es propiedad de CNEA y se reserva todos los derechos legales sobre él. No está permitida la explotación, transferencia o liberación de ninguna información en el contenido, ni hacer reproducciones y entregarlas a terceros sin un acuerdo previo y escrito de CNEA.						


En el proceso de Revisión por la dirección, realizado según el documento correspondiente, se analiza de manera periódica el estado de las instalaciones de la Planta, incluyendo sus instrumentos y las actividades del Sistema de Gestión.

FO-PR-001 r2

	<b>GERENCIA CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR PPFAE</b>			PO-PPFAE-005 Rev.: 0		
	<b>PROCEDIMIENTO OPERATIVO</b>			Página: 01 de 7		
<b>TÍTULO: Revisión por la dirección del Sistema de Gestión</b>						
<b>1. OBJETIVO</b> Establecer el mecanismo para realizar la revisión por la dirección del sistema de gestión y de las actividades de la PPFAE.						
<b>2. ALCANCE</b> Se aplica a todas las actividades de la PPFAE.						
<b>Preparó</b>		<b>Revisó</b>			<b>Intervino calidad</b>	<b>Aprobó</b>
FIRMA ELABORADOR INTERNO		FIRMA REVISOR INTERNO			FIRMA RESPONSABLE DE LA CALIDAD	FIRMA JEFE DE PLANTA
<b>REVISIONES</b>						
<b>Rev.</b>	<b>Fecha</b>	<b>Modificaciones</b>				
0	24/07/2012	Original				
<b>FECHA DE VIGENCIA: 25-07-2012</b>						
<b>DISTRIBUCIÓN</b>			<b>ESTADO DEL DOCUMENTO</b>			
Copia Nº: Distribuyó:			Fecha: 25-07-2012 Firma: FIRMA DEL RESPONSABLE DE LA CALIDAD			
<b>NOTA:</b> Este documento es propiedad de CNEA y se reserva todos los derechos legales sobre él. No está permitida la explotación, transferencia o liberación de ninguna información en el contenido, ni hacer reproducciones y entregarlas a terceros sin un acuerdo previo y escrito de CNEA.						

El documento de Control de documentos y registros es el que permite la gestión de toda la documentación de la Planta de manera eficaz. Establece, entre otras particularidades, la estructura de la documentación, su organización y codificación. Asimismo contiene la gestión de los registros (entre los que se encuentran los certificados de calibración, los registros de verificaciones periódicas, los registros de control de producto, etc.) e indica las condiciones de acceso y archivo de estos.

FO-PR-001 r2

	<b>GERENCIA CICLO DEL COMBUSTIBLE NUCLEAR PPFAE</b>			PO-PPFAE-004 Rev.: 1		
	<b>PROCEDIMIENTO OPERATIVO</b>			Página: 1 de 9		
<b>TÍTULO: CONTROL DE DOCUMENTOS Y REGISTROS</b>						
<b>1. OBJETIVO</b> Asegurar la elaboración, revisión, aprobación, liberación, distribución y archivo de los documentos tanto en las primeras ediciones como en las revisiones posteriores. Establecer las pautas para identificar, recolectar, codificar, acceder, archivar, almacenar, conservar y eliminar los registros de la calidad y los registros técnicos.						
<b>2. ALCANCE</b> Aplicable a los documentos y registros que forman parte del Sistema de Gestión de la PPFAE.						
Preparó		Revisó			Intervino calidad	Aprobó
<small>FIRMA ELABORADOR INTERNO</small>		<small>FIRMA REVISOR INTERNO</small>			<small>FIRMA RESPONSABLE DE LA CALIDAD</small>	<small>FIRMA JEFE DE PLANTA</small>
<b>REVISIONES</b>						
<b>Rev.</b>	<b>Fecha</b>	<b>Modificaciones</b>				
0	13/04/2012	Original				
1	19/07/2012	4.2, 5, 6.1.1, 6.1.2, 6.1.2.1, 6.1.3, 6.2.1, 6.2.3, 6.2.5, 6.2.6, 6.2.7, 7				
<b>FECHA DE VIGENCIA: 23/07/2012</b>						
<b>DISTRIBUCIÓN</b> Copia N°: Distribuyó:			<b>ESTADO DEL DOCUMENTO</b> Fecha: 23/07/2012 Firma: FIRMA DEL RESPONSABLE DE LA CALIDAD			
<b>NOTA:</b> Este documento es propiedad de CNEA y se reserva todos los derechos legales sobre él. No está permitida la explotación, transferencia o liberación de ninguna información en el contenido, ni hacer reproducciones y entregarlas a terceros sin un acuerdo previo y escrito de CNEA.						

## 6 Análisis de los Resultados

### 6.1 Especificación

La especificación del proceso requerida por el cliente indica que la reducción de área se debe encontrar entre el 18 y el 20,5%. De estos valores podría considerarse un valor central de 19.25% con un desvío de 1,25 % a cada lado de este límite central. Este valor de 1,25% en relación con el centro (19,25%) implica una variación relativa de 6,49%%

Del presente análisis se desprende que el valor de la reducción de área en el tubo estudiado resultó ser, tal como se calculó en los puntos 4 y 4.7

$17,8 \pm 0,8\%$  (factor de cobertura  $k=2$ , basado en la distribución  $t$  de Student para  $\nu = \infty$  grados de libertad, definiendo un intervalo con una probabilidad de cobertura del 95,45%)

Lo que es lo mismo que

$$17,0 \leq \text{Reducción de Área} \leq 18,6 \%$$

El valor de la incertidumbre de la medición (0,8%) respecto del valor medido (17,8%) resulta ser de 4,49%%

Gráficamente:

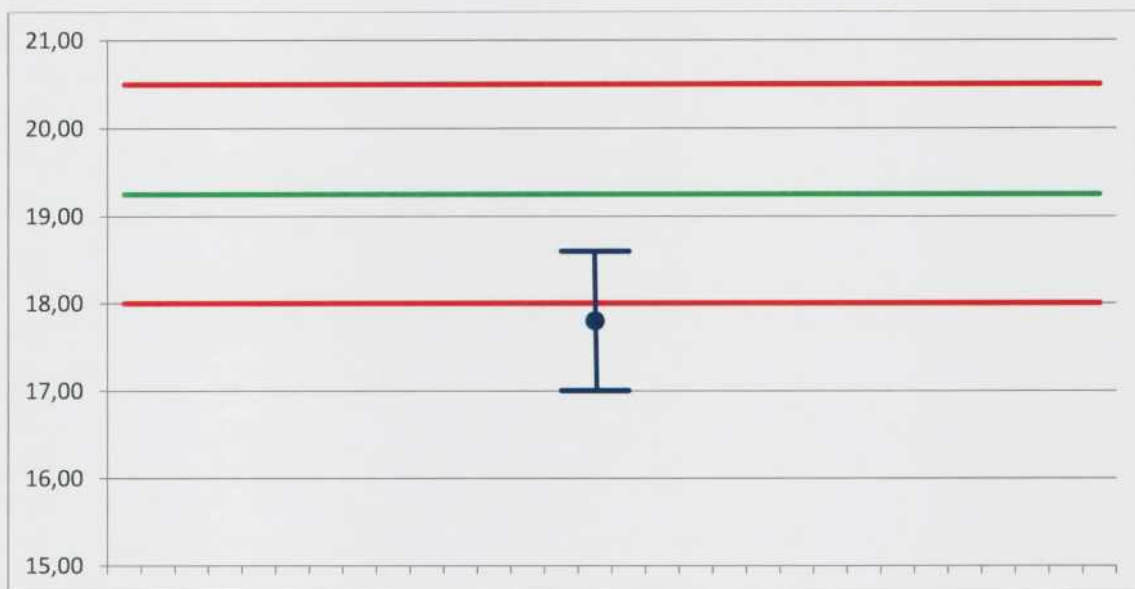


Figura 64 - Reducción de área: Especificación vs. Incertidumbre expandida

Nota: en color rojo se grafican los límites de especificación, en verde el valor medio entre los límites de especificación, en azul la incertidumbre asociada a la medición tomada como referencia (punto azul)

El valor de la incertidumbre en la medición ( $2 \times 4,49\% = 8,99\%$ ) es muy próximo a la dispersión admitida por especificación ( $2 \times 6,49\% = 12,99\%$ ), situación no recomendable por las normas de metrología.

De la literatura [5] se desprende que es recomendable que

$$3 \leq \frac{\text{Tolerancia}}{2U} \leq 10$$

Dado que si  $\frac{\text{Tolerancia}}{2U} > 10$  podrían ser necesarios instrumentos de medición costosos, y si  $\frac{\text{Tolerancia}}{2U} < 3$  se corre un alto riesgo de rechazar elementos correctos. En este caso

$$\frac{\text{Tolerancia}}{2U} = \frac{20,5\% - 18,0\%}{2 * 0,8\%} = 1,6$$

Si bien a primera vista podría considerarse que los medios de medición empleados no son los adecuados, en realidad la causa de este valor bajo no se debe a ellos (para más detalle de los medios de medición ver Anexos I y II) sino al aporte del error del método empleado.

Si el método de informar la reducción de área se reemplazara, por ejemplo indicando el valor máximo y mínimo de reducción de área por tubo (y no un valor promedio), la nueva incertidumbre expandida no tendría error de método, por lo tanto se calcularía a partir de:

$$u_{c,y} = 0,1\% \text{ (4.5.b)}$$

Recordando la ecuación (4.b)

$$u_c^2 = u_{c,y}^2 + u_{\text{método}}^2$$

suponiendo entonces que  $u_{\text{método}}^2 = 0$

$$u_c = 0,1\%$$

De acuerdo a lo indicado en la norma IRAM 35050 [8] en G.4.1, la incertidumbre expandida resulta:

$$U_p = k_p u_c(Y) = t_p(\vartheta_{eff}) u_c(y)$$

Dado que, como se indicó  $\vartheta_{eff} = 1369190$  (4.5.c), de la Tabla G.2 publicada en la norma IRAM 35.050 [8]  $t_p(\infty) = 2$  para  $p=95.45$

$$U_p = 2 u_c(y)$$

Reemplazando con la ecuación (4.6)

$$U_p = 2 \times 0,1\%$$

$$U_p = 0,2\%$$

por lo que

$$\frac{\text{Tolerancia}}{2U} = \frac{20,5\% - 18,0\%}{2 * 0,2\%} = 6,25$$

## **7 Conclusiones**

### **7.1 Perspectiva Metrológica**

Tal como se observó en el punto 6 y en los Anexos I y II, la elección de los dispositivos metrológicos resultó más que satisfactoria para cumplir con los requisitos del cliente.

La principal dificultad, que se ve reflejada en una alta incertidumbre respecto de la especificación, radica en la metodología requerida por el cliente para informar la Reducción de Área, es decir, informar un valor promedio por cada tubo laminado. Como se demostró en este trabajo, ésta es la principal fuente de incertidumbre (error de método), la cual se podría reducir si se especificara informar los valores máximos y mínimos de Reducción de Área de cada tubo.

Ciertamente que adoptando esta metodología propuesta se reduciría el error del método y sería conveniente realizar nuevos estudios, en donde se considerara como error de método el hecho de medir solamente en cuatro posiciones angulares ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  y  $135^\circ$ ) respecto de un mayor número de posiciones. En este trabajo no se consideró esta fuente de incertidumbre y se la asumió despreciable respecto del error asociado a informar el valor promedio por tubo laminado.

Asimismo es recomendable realizar estudios complementarios donde se incorporen los valores de las Reducciones de Área de distintos lotes de producción (y su consecuente variabilidad) para poder determinar la "Capacidad de Máquina" y "Capacidad del Proceso".

Estos estudios mencionados podrían tomar como referencia los cálculos aquí realizados y verificar, por una parte, si la asunción respecto de la cantidad de posiciones angulares es correcta, y por otro, si, tal como es deseable, la incertidumbre de la medición de la Reducción de Área resulta poco significativa respecto de la variación del proceso productivo.

### **7.2 Perspectiva de la Gestión de la Calidad**

Primeramente, en base a los cálculos realizados en este trabajo y de acuerdo a lo observado en 4.5, la variabilidad de los operadores resulta de principal importancia en lo que respecta al aporte de las fuentes de incertidumbre (excluyendo el error del método). Como se viera en el análisis de la repetibilidad y reproducibilidad, existen valores dudosos que han sido incorporados a los cálculos aquí realizados.

Concretamente, en los cálculos se han incorporado las mediciones de los operadores 6 y 4 a fin de adoptar un criterio conservador, a pesar de que los distintos análisis realizados indiquen que sus determinaciones son, al menos cuestionables. En el caso del Operador 6 podría suponerse que la causa de estos valores cuestionables es la baja cantidad de repeticiones, por lo que sería conveniente confirmar por algún medio la concordancia de sus resultados respecto de los otros operadores. El caso del Operador 4 es distinto dado que los cálculos realizados, tanto para las mediciones de diámetros como de espesores, indican un desvío respecto del resto de los operadores. El Sistema de Gestión de la Calidad debería incorporar este hecho y planificar su reentrenamiento. Una vez determinado que la capacitación ha sido eficaz, se podrá verificar que la contribución relativa (de la repetibilidad y reproducibilidad de los operadores) a la incertidumbre total resultará mejorada.

Es conveniente mencionar que se ha podido realizar el presente trabajo ya que el Sistema de Gestión de la Calidad implementado, a través de sus distintos elementos (Capítulo 5 de este

trabajo) permite obtener los datos necesarios de manera ordenada y eficaz y así, tal como lo indica la norma IRAM-ISO 9001 [9], “establecer procesos para asegurarse de que el seguimiento y medición pueden realizarse y se realizan de una manera coherente con los requisitos”. Sin un Sistema de Gestión de la Calidad implementado y mantenido resultaría muy difícil (y poco confiable) realizar estas actividades.

Finalmente, no obstante lo expresado en el párrafo anterior, también es pertinente destacar que un Sistema de Gestión de la Calidad implementado y mantenido en sectores productivos que no permitiera obtener información técnica acerca de la capacidad de los productos para cumplir con los requisitos solo sería un formalismo administrativo que no aporta valor a las actividades principales del sector.

## 8 Anexo I – Estudio para el caso de la especificación de diámetros

### 8.1 Diámetro Máximo

La especificación del cliente establece que el valor del diámetro debe ser  $114,55 \pm 0,25 \text{ mm}$  por lo tanto teniendo en cuenta el valor de la incertidumbre del diámetro máximo

$$u^2(\Phi_{M\acute{a}x}) = 56,7759 \times 10^{-5} \text{ mm}^2 \quad (4.1)$$

con 9 grados efectivos de libertad, por lo que la incertidumbre expandida resultará

$$U_p = k_p u(\Phi_{M\acute{a}x}) = t_p(\vartheta_{eff}) u(\Phi_{M\acute{a}x})$$

$$U_{\Phi_{M\acute{a}x}} = t_p(9) \sqrt{u^2(\Phi_{M\acute{a}x})} = 2,32 * 0,024 \text{ mm} = 0,06 \text{ mm}$$

Por lo tanto

$$\frac{\text{Tolerancia}}{2 U} = \frac{114,80 \text{ mm} - 114,30 \text{ mm}}{2 * 0,06 \text{ mm}} = 4,5$$

Gráficamente:

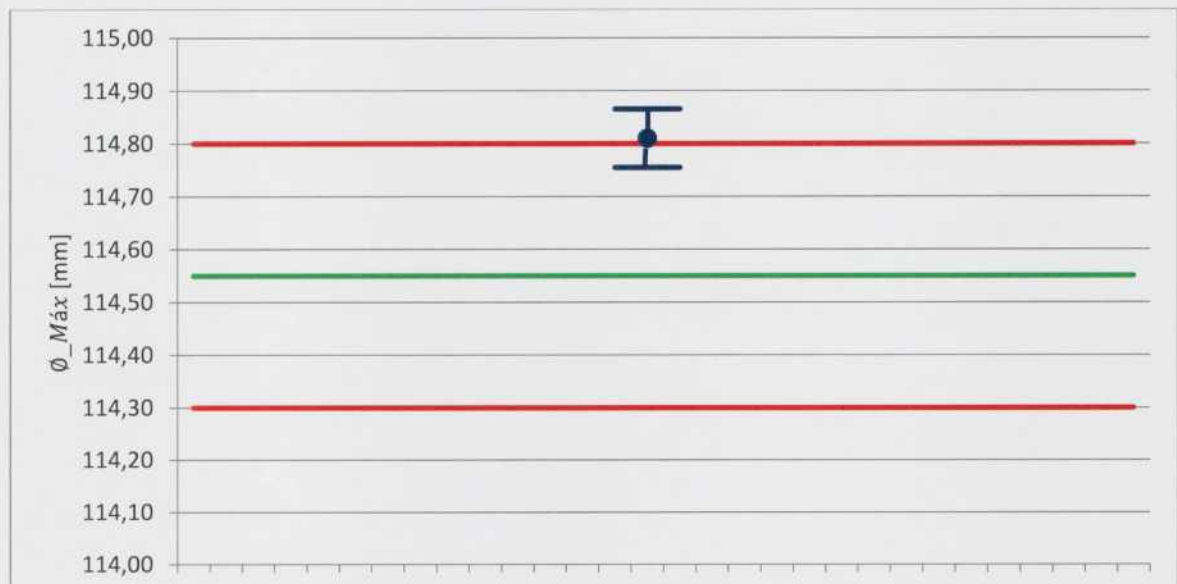


Figura 65 - Diámetro Máximo: Especificación vs. Incertidumbre expandida

Nota: en color rojo se grafican los límites de especificación, en verde el valor medio entre los límites de especificación, en azul la incertidumbre asociada a la medición tomada como referencia (punto azul)

### 8.2 Diámetro mínimo

La especificación del cliente es la misma que para lo que en este trabajo se denominó Diámetro Máximo, *i. e.* el valor del diámetro debe ser  $114,55 \pm 0,25 \text{ mm}$  por lo tanto teniendo en cuenta el valor de la incertidumbre del diámetro mínimo

$$u^2(\Phi_{m\acute{i}n}) = 17,0023 \times 10^{-5} \text{ mm}^2 \quad (4.2)$$

con 89 grados efectivos de libertad, por lo que la incertidumbre expandida resultará

$$U_p = k_p u(\phi_{\min}) = t_p(\vartheta_{eff}) u(\phi_{\min})$$

$$U_{\phi_{\min}} = t_p(89)\sqrt{u^2(\phi_{\min})} = 2,05 * 0,013 \text{ mm} = 0,03 \text{ mm}$$

Por lo tanto

$$\frac{\text{Tolerancia}}{2 U} = \frac{114,800 \text{ mm} - 114,300 \text{ mm}}{2 * 0,03 \text{ mm}} = 9,4$$



Figura 66 - Diámetro mínimo: Especificación vs. Incertidumbre expandida

Nota: en color rojo se grafican los límites de especificación, en verde el valor medio entre los límites de especificación, en azul la incertidumbre asociada a la medición tomada como referencia (punto azul)

## 9 Anexo II – Estudio para el caso de la especificación de espesor

### 9.1 Espesor Máximo

La especificación del cliente establece que el valor del espesor debe ser  $5,00 \pm 0,20 \text{ mm}$  por lo tanto teniendo en cuenta el valor de la incertidumbre del espesor máximo

$$u^2(\tau_{M\acute{a}x}) = 3,03592 \times 10^{-5} \text{ mm}^2 \quad (4.3)$$

con 60 grados efectivos de libertad, por lo que la incertidumbre expandida resultará

$$U_p = k_p u(\tau_{M\acute{a}x}) = t_p(\vartheta_{eff}) u(\tau_{M\acute{a}x})$$

$$U_{\tau_{M\acute{a}x}} = t_p(60) \sqrt{u^2(\tau_{M\acute{a}x})} = 2,05 * 0,0055 \text{ mm} = 0.011 \text{ mm}$$

Por lo tanto

$$\frac{\text{Tolerancia}}{2 U} = \frac{5,20 \text{ mm} - 4,80 \text{ mm}}{2 * 0.011 \text{ mm}} = 17,7$$

Gráficamente:



Figura 67 – Espesor Máximo: Especificación vs. Incertidumbre expandida

Nota: en color rojo se grafican los límites de especificación, en verde el valor medio entre los límites de especificación, en azul la incertidumbre asociada a la medición tomada como referencia (punto azul)

### 9.2 Espesor mínimo

Al igual que en el cálculo para el Espesor mínimo, la especificación del cliente establece que el valor del espesor debe ser  $5,00 \pm 0,20 \text{ mm}$  por lo tanto teniendo en cuenta el valor de la incertidumbre del espesor mínimo

$$u^2(\tau_{m\acute{i}n}) = 6,0941 \times 10^{-5} \text{ mm}^2 \quad (4.4)$$

con 24 grados efectivos de libertad, por lo que la incertidumbre expandida resultará

$$U_p = k_p u(\tau_{\min}) = t_p(\vartheta_{eff}) u(\tau_{\min})$$

$$U_{\tau_{\min}} = t_p(24)\sqrt{u^2(\tau_{\min})} = 2,13 * 0,0078 \text{ mm} = 0,02 \text{ mm}$$

Por lo tanto

$$\frac{\text{Tolerancia}}{2 U} = \frac{5,20 \text{ mm} - 4,80 \text{ mm}}{2 * 0,02 \text{ mm}} = 12,0$$

Gráficamente:

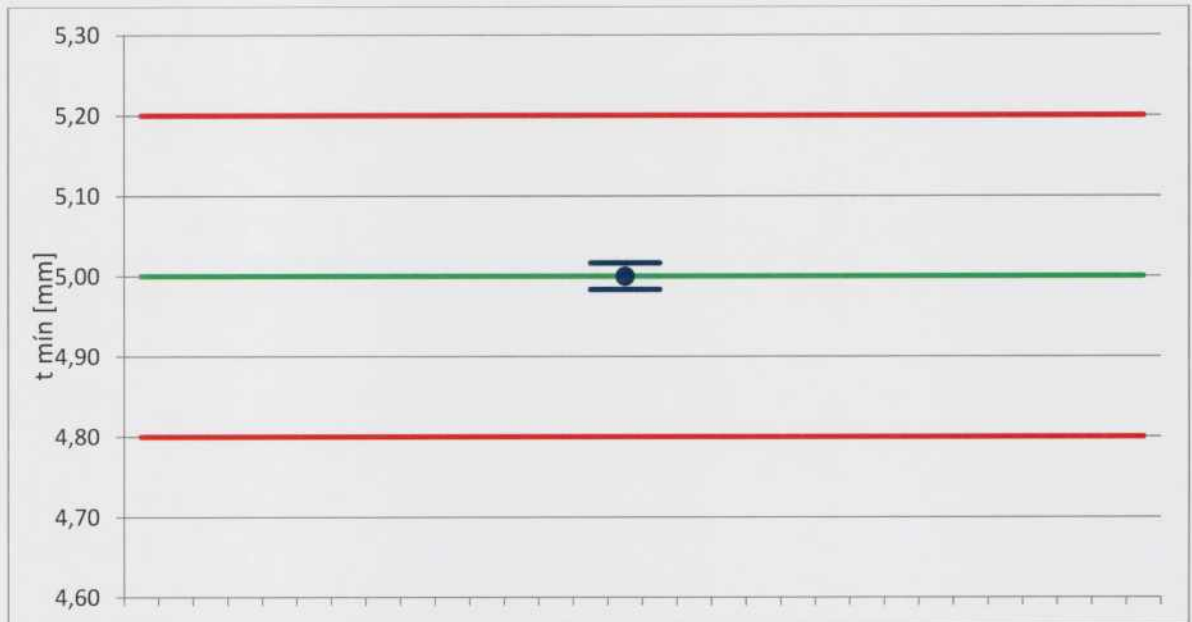


Figura 68 - Espesor mínimo: Especificación vs. Incertidumbre expandida

Nota: en color rojo se grafican los límites de especificación, en verde el valor medio entre los límites de especificación, en azul la incertidumbre asociada a la medición tomada como referencia (punto azul)

## 10 Bibliografía

- [1] ASM ready reference (2002), Thermal properties of metals, elaborado bajo la dirección del ASM International Materials Properties Database Committee; Fran Cverna editor técnico, Estados Unidos, ASM International®, p. 183 [en línea] Disponible en: <https://books.google.com.ar/books?id=qvrq96gJFxlC&pg=PA183&lpg=PA183&dq=zr+-+1.5+nb+%22thermal+expansion%22&source=bl&ots=Eg9s1QIC47&sig=p6ohnAWNxQABo8bFzLhqqLT2dsE&hl=es&sa=X&ei=36RKVZ6gJfOLsQTkkoCIDQ&ved=0CEMQ6AEwBg#v=onepage&q=zr%20-%201.5%20nb%20%22thermal%20expansion%22&f=false> [última consulta: 15/06/2015]
- [2] Ayala Gallego, G. (2005), Control estadístico de calidad, pp. 21-27 [en línea] Disponible en: [http://informatica.uv.es/iiguia/2000/SPI/control\\_cal.pdf](http://informatica.uv.es/iiguia/2000/SPI/control_cal.pdf) [última consulta: 15/06/2015]
- [3] Centro Nacional de Metrología (CNEAM) (2008), *Guía Técnica sobre Trazabilidad e Incertidumbre en Metrología Dimensional*, México.
- [4] *Estudios Interlaboratorios*, Sociedad española de bioquímica clínica y patología molecular [en línea] Disponible: <http://www.seqc.es/dl.asp?175.145.205.255.15.30.27.21.118.133.24.113.255.173.40.2.166.145.64.158.249.7.59.163.237.42.206.86.73.118.99.145.6.229.238.55.120.166.82.91.198.104.202.252.235.136.15.64.143.242.29.159.130.176.182.46.34.27.161> [última consulta: 15/06/2015]
- [5] Garonis, H. y F. di Giácomo (2013), *Calidad en las mediciones*, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, Escuela de Postgrado.
- [6] Hibbert, D. B. y J. Justin Gooding (2006), *Data analysis for chemistry: an introductory guide for students and laboratory scientists (1951)*, Nueva York, Oxford University Press, Inc.
- [7] Huerga Castro, C., P. Blanco Alonso y J. Abad González (2005), *Aplicación de los gráficos de control en el análisis de la calidad textil*, León, Revista Pecvnia 1 (2005), pp. 125-148.
- [8] IRAM 35.050:2001 “Procedimientos para la evaluación de la incertidumbre de la medición”
- [9] IRAM-ISO 9001:2008 “Sistemas de gestión de la calidad. Requisitos”
- [10] ISO 5725-2:1994 “Exactitud (veracidad y precisión) de resultados y métodos de medición – Parte 2: Método básico para la determinación de la repetibilidad y la reproducibilidad de un método de medición normalizado”
- [11] ISO 13.528:2005 “Métodos Estadísticos usados en ensayos de aptitud para comparación interlaboratorios”
- [12] Rincón Martínez, Á. (2013), *Selección de métodos estadísticos para la interpretación de intercomparaciones en ensayos de áridos para hormigón, mortero y balasto*, Escuela técnica superior de ingenieros de minas de Madrid, Universidad politécnica de Madrid.

- [13] Tabla de valores críticos para el test de Cochran para valores discrepantes de varianza [en línea] Disponible en: <http://docslide.us/documents/valores-criticos-prueba-cochran-alfa-001-y-005.html> [última consulta: 15/06/2015].
- [14] Valcárcel, M. y A. Ríos (1992), *La calidad en los laboratorios analíticos*, Barcelona, Reverté S.A.
- [15] Zaretsky, A. N. (2014), *Apuntes del curso “Acreditación de proveedores de ensayos de aptitud por comparaciones interlaboratorios”*, Buenos Aires.