



Universidad Nacional de San Martín
Instituto de Calidad Industrial

“Análisis cuantitativo de un proceso de laminación en frío de tubos de aleación de Circonio”

CARRERA: MAESTRÍA EN CALIDAD INDUSTRIAL
Título a obtener: Magister en Calidad Industrial

Tesista:	Ing. Gabriel Á. Carus Zega
Director:	Dr. Jorge F. Magallanes
Co-director:	Ing. Daniel R. Bianchi

Julio de 2017

*"Wer aber vor der Vergangenheit
die Augen verschließt,
wird blind für die Gegenwart"*

*"Quien ante el pasado
cierre los ojos,
estará ciego en el presente"*

Richard von Weizsäcker

Empleado de la fábrica de tubos sin costura Mannesman AG (1950-1953)

Presidente de Alemania (1984-1994)

ÍNDICE

0	Introducción	8
0.1	Antecedentes	8
0.2	Objetivo general	9
0.3	Objetivos particulares	9
0.4	Descripción del proceso global	10
0.4.1	Descripción de la producción de la materia prima	10
0.4.2	Descripción de la laminación en frío	10
0.4.3	Variables de estudio	11
0.4.3.1	Variables medidas.....	11
0.4.3.2	Variables derivadas.....	12
1	Materia Prima	13
1.1	Generalidades.....	13
1.2	Diámetro Máximo.....	18
1.3	Diámetro Mínimo	19
1.4	Espesor Máximo	20
1.5	Espesor Mínimo	21
1.6	Diámetro Promedio	22
1.7	Espesor Promedio	23
1.8	Ovalidad	24
1.9	Excentricidad	25
1.10	Conclusiones Materia Prima	26
1.10.1	Generalidades	26
1.10.2	Diámetros.....	29
1.10.2.1	Diámetro Máximo	29
1.10.2.2	Diámetro mínimo.....	29
1.10.2.3	Diámetro Promedio	29
1.10.2.4	Ovalidad	30
1.10.3	Espesores	30
1.10.3.1	Espesor Máximo.....	31
1.10.3.2	Espesor mínimo	31
1.10.3.3	Espesor Promedio	31
1.10.3.4	Excentricidad.....	31
2	Tubo Laminado L1	33
2.1	Generalidades.....	33
2.2	Diámetro Máximo.....	39
2.2.1	Resumen cuantitativo.....	41
2.3	Diámetro mínimo.....	42
2.3.1	Resumen cuantitativo.....	44
2.4	Espesor Máximo	45
2.4.1	Resumen cuantitativo.....	47
2.5	Espesor mínimo	48
2.5.1	Resumen cuantitativo.....	50
2.6	Diámetro Promedio	51
2.6.1	Resumen cuantitativo.....	53

2.7	Espesor Promedio	54
2.7.1	Resumen cuantitativo.....	56
2.8	Ovalidad	57
2.8.1	Resumen cuantitativo.....	59
2.9	Excentricidad	60
2.9.1	Resumen cuantitativo.....	62
2.10	Conclusiones.....	63
2.10.1	Generalidades	63
2.10.2	Diámetros.....	65
2.10.2.1	Diámetro máximo	65
2.10.2.2	Diámetro mínimo.....	65
2.10.2.3	Diámetro Promedio	65
2.10.2.4	Ovalidad	65
2.10.3	Espesores	66
2.10.3.1	Espesor Máximo.....	66
2.10.3.2	Espesor mínimo	66
2.10.3.3	Espesor Promedio	66
2.10.3.4	Excentricidad.....	66
3	Relación Entrada-Salida (Materia Prima -Tubo Laminado)	67
3.1	Análisis Cualitativo.....	67
3.1.1	Análisis Gráfico	67
3.2	Análisis Cuantitativo	73
3.2.1	Cuadro Comparativo de los resultados	73
3.2.2	Consideraciones sobre la capacidad del proceso	75
3.2.3	Análisis Predictivo	76
3.2.3.1	Relación con la Incertidumbre de la medición.....	81
3.2.3.2	Aproximación por Redes Neuronales Artificiales	83
3.2.4	Análisis Predictivo – Carta de Control	85
3.2.5	Conclusiones.....	91
4	Relación entrada-salida del macroproceso	92
5	Conclusiones.....	101
	Anexo I – Distribución del error de método en la Reducción de Área.....	103
	Bibliografía	104

TABLAS

Tabla 1 - Laminado – Resumen de Diámetro Máximo	41
Tabla 2 - Laminado - Resumen de Diámetro mínimo	44
Tabla 3 - Laminado - Resumen de Espesor Máximo.....	47
Tabla 4 - Laminado - Resumen de Espesor mínimo	50
Tabla 5 - Laminado - Resumen de Diámetro Promedio	53
Tabla 6 - Laminado - Resumen de Espesor Promedio.....	56
Tabla 7 - Laminado - Resumen de Ovalidad.....	59
Tabla 8 - Laminado - Resumen de Excentricidad.....	62
Tabla 9 – Posiciones con varianzas independientes del día de laminación.....	64
Tabla 10 – Diámetro Máximo – Valores de extrudado y laminado.....	73
Tabla 11 – Diámetro mínimo – Valores de extrudado y laminado	73
Tabla 12 – Espesor Máximo – Valores de extrudado y laminado.....	73
Tabla 13 – Espesor mínimo – Valores de extrudado y laminado.....	74
Tabla 14 – Diámetro Promedio – Valores de extrudado y laminado.....	74
Tabla 15 – Espesor Promedio – Valores de extrudado y laminado	74
Tabla 16 – Ovalidad – Valores de extrudado y laminado	75
Tabla 17 – Excentricidad – Valores de extrudado y laminado	75
Tabla 18 – Valores de Capacidad del Proceso (con aproximación robusta).....	76
Tabla 19 – Desvíos de los residuos de las distintas aproximaciones	80
Tabla 20 – Incertidumbres de las aproximaciones	81
Tabla 21 – Mapa de Kohonen - Matrices de confusión	94

FIGURAS

Figura 1- Esquema del Proceso.....	10
Figura 2 - Magnitudes medidas.....	11
Figura 3 - Medición del tubo real.....	11
Figura 4 – Extrudado - Lote Completo - Resumen de Variables de Entrada	13
Figura 5 – Extrudado - Dendograma de variables medidas	14
Figura 6 - Extrudado - Loadings de variables medidas	16
Figura 7 – Extrudado - Scree Plot de variables medidas.....	16
Figura 8 – Extrudado - Diámetro Máximo - Resumen Gráfico	18
Figura 9 - Extrudado - Diámetro Máximo - Diagrama Caja y Bigotes	18
Figura 10 - Extrudado - Diámetro mínimo - Resumen Gráfico.....	19
Figura 11 - Extrudado - Diámetro mínimo - Diagrama Caja y Bigotes	19
Figura 12 – Extrudado - Espesor Máximo - Resumen Gráfico	20
Figura 13 – Extrudado - Espesor Máximo - Diagrama Caja y Bigotes.....	20
Figura 14 – Extrudado - Espesor mínimo - Resumen Gráfico	21
Figura 15 – Extrudado - Espesor mínimo - Diagrama Caja y Bigotes.....	21
Figura 16 – Extrudado - Diámetro Promedio - Resumen Gráfico	22
Figura 17 – Extrudado - Diámetro Promedio - Diagrama Caja y Bigotes.....	22
Figura 18 – Extrudado - Espesor Promedio - Resumen Gráfico.....	23
Figura 19 – Extrudado - Espesor Promedio - Diagrama Caja y Bigotes	23
Figura 20 – Extrudado - Ovalidad - Resumen Gráfico.....	24
Figura 21 – Extrudado - Ovalidad - Diagrama Caja y Bigotes	24
Figura 22 – Extrudado - Excentricidad - Resumen Gráfico	25
Figura 23 – Extrudado - Excentricidad - Diagrama Caja y Bigotes	25
Figura 24 - Ejemplo de Histograma de t Robusto.....	27
Figura 25 – Extrudado - Diámetro Máximo – Test de normalidad en tubos individuales.....	28
Figura 26 – Extrudado - Diámetro Promedio - Transformada de Johnson.....	30
Figura 27 - Extrudado - Excentricidad – Distribución de Probabilidad	32
Figura 28 - Laminado - Variables medidas en función del tiempo	33
Figura 29 - Laminado - Secciones de estudio	33
Figura 30 – Laminado - Dendograma de las variables medidas.....	34
Figura 31 - Laminado – Loadings de las variables medidas.....	36
Figura 32 - Laminado - Secree Plot de autovalores	37
Figura 33 - Laminado - Análisis de normalidad por posición	38
Figura 34 – Laminado – Diámetro Máximo - Resumen Gráfico.....	39
Figura 35 – Laminado – Diámetro Máximo - Diagrama Caja y Bigotes	40
Figura 36 – Laminado – Diámetro mínimo - Resumen Gráfico.....	42
Figura 37 – Laminado –Diámetro mínimo - Diagrama Caja y Bigotes	43
Figura 38 – Laminado – Espesor Máximo - Resumen Gráfico	45
Figura 39 – Laminado – Sección A – Espesor Máximo - Diagrama Caja y Bigotes.....	46
Figura 40 – Laminado – Sección A – Espesor Máximo – Secuencia temporal.....	47
Figura 41 – Laminado –Espesor mínimo - Resumen Gráfico	48
Figura 42 – Laminado – Espesor mínimo - Diagrama Caja y Bigotes	49
Figura 43 – Laminado – Sección A – Espesor mínimo – Secuencia temporal.....	50
Figura 44 – Laminado – Diámetro Promedio - Resumen Gráfico	51
Figura 45 – Laminado - Diámetro Promedio - Diagrama Caja y Bigotes	52
Figura 46 – Laminado - Espesor Promedio - Resumen Gráfico	54
Figura 47 – Laminado – Espesor Promedio - Diagrama Caja y Bigotes	55
Figura 48 – Laminado – Ovalidad - Resumen Gráfico.....	57
Figura 49 – Laminado – Ovalidad - Diagrama Caja y Bigotes	58
Figura 50 – Laminado –Excentricidad - Resumen Gráfico	60
Figura 51 – Laminado – Excentricidad - Diagrama Caja y Bigotes.....	61
Figura 52 - Diámetro Máximo Laminado en función de los diámetros de extrudado	68
Figura 53 - Diámetro mínimo Laminado en función de los diámetros de extrudado	68
Figura 54 - Ovalidad Extrudado en función de diámetros de extrudado	69
Figura 55 - Ovalidad Laminado en función de diámetros de extrudado.....	69

Figura 56 - Espesor Máximo laminado en función de espesores de extrudado.....	70
Figura 57 - Espesor mínimo laminado en función de los espesores de extrudado	70
Figura 58 - Excentricidad Extrudado en función de espesores de extrudado	71
Figura 59 - Excentricidad Laminado en función de espesores de extrudado.....	71
Figura 60 - Ovalidad extrudado y laminado, discriminado por posición	72
Figura 61 - Excentricidad extrudado y laminado, discriminado por posición.....	72
Figura 62 – Sección A – Diámetro Máximo - Residuos Ajuste robusto multivariante n=15 tubos ..	77
Figura 63 – Diámetro Máximo – Sección A - Residuos de la variable <i>Diámetro Máximo</i>	78
Figura 64 – Sección A - Diámetro Máximo - Residuos de aproximación constante	79
Figura 65 – Modelo de una red neuronal artificial utilizado	83
Figura 66 – Resultado de la red neurona feed forward	84
Figura 67 – Residuos de una aproximación con ANN.....	84
Figura 68 – Residuos con aproximación multivariable robusta.....	85
Figura 69 – Sección A – Diámetro Máximo Laminado - Carta de Control – Límites globales	86
Figura 70 – Sección A – Diámetro Máximo Laminado - Carta de Control – Límites puntuales	87
Figura 71 – Sección A – Diámetro Máximo Laminado - Carta de Control - Total.....	87
Figura 72 - Sección B – Espesor Máximo Laminado - Carta de Control – Límites puntuales y globales	88
Figura 73 - Sección B - Espesor Máximo – MADN y desvío estándar de aproximación	89
Figura 74 - Carta de control en Minitab®	89
Figura 75 - Sección A – Diámetro Máximo Laminado - Carta de Control – Minitab®	90
Figura 76 – Mapa de Kohonen – Configuración según Universidad de Milán	92
Figura 77 – Mapa de Kohonen - Red calculada	93
Figura 78 – Mapa de Kohonen - Predicción	93
Figura 79 – Parámetros cuantitativos del mapa de Kohonen empleado.....	94
Figura 80 - Mapa de Kohonen - Pesos por clases y variables.....	95
Figura 81 – Mapa de Kohonen – Configuración 2D según CNEA	96
Figura 82 - Mapa de Kohonen – Entrenamiento 2D	96
Figura 83 - Mapa de Kohonen – Configuración 3D según CNEA	97
Figura 84 - Mapa de Kohonen – Entrenamiento 3D	98
Figura 85 - Mapa de Kohonen – Densidades 3D	98
Figura 86 - Mapa de Kohonen – K-Means	99
Figura 87- Mapa de Kohonen - Resultado entrenamiento 3D	99
Figura 88 - Reducción de Área - Distribución de errores.....	103

0 Introducción

0.1 Antecedentes

En el año 2012 se inició la producción en Argentina de un tipo de tubos de aleación de circonio de alta resistencia mecánica mediante laminación en frío. Estos se emplean en centrales nucleares de potencia y son considerados como componentes críticos, en virtud de la función que cumplen los mismos y su relación con la seguridad de la instalación.

Una de las variables que permite fundamentar la importancia de la producción nacional de estos componentes es el beneficio económico obtenido, dado que la materia prima (tubo extrudado) representa entre 30 y el 40% del valor del producto terminado (tubo listo para instalar). Sin perjuicio de esta consideración, es necesario tener en cuenta la importancia estratégica de haber desarrollado localmente las etapas más críticas del proceso que permite obtener el producto final conforme a estrictas especificaciones. A consecuencia de este desarrollo, actualmente Argentina se convirtió en el primer proveedor alternativo de dicho componente.

Durante la producción de estos tubos se han realizado estudios para caracterizar al proceso [3], como así también para determinar las incertidumbres de las mediciones realizadas [8].

El propósito de este trabajo es profundizar estos estudios a fin de contar con mayor conocimiento en el momento de encarar la producción de una nueva partida de estos tubos.

Para los análisis estadísticos a realizar en el presente trabajo se empleará el software Minitab® y para el procesamiento matemático y análisis matricial se empleará el software Matlab® y rutinas desarrolladas para éste último.

0.2 Objetivo general

Optimizar el proceso de laminación en frío de tubos de aleación de circonio a partir de un análisis cuantitativo del primer paso de laminación de un lote de tubos.

0.3 Objetivos particulares

1. Caracterizar dimensionalmente la materia prima (“tubo extrudado”).
2. Caracterizar dimensionalmente el primer paso de laminación (“tubo laminado L1”).
3. Relacionar las características dimensionales del tubo laminado con las características dimensionales de la materia prima.
4. Establecer nuevos métodos de control del proceso estudiado.
5. Analizar la existencia de relaciones entre una característica cualitativa del proceso global de laminación y las características de la materia prima.

0.4 Descripción del proceso global

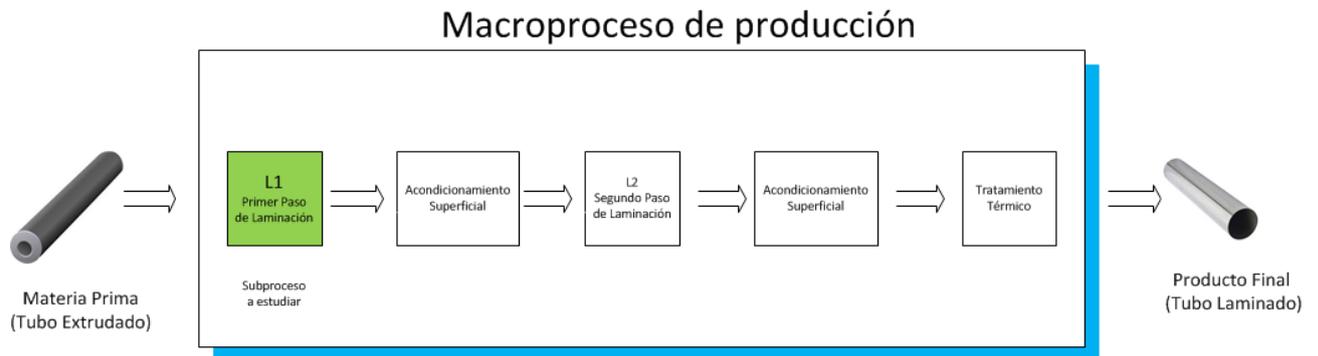


Figura 1- Esquema del Proceso

Durante el proceso de fabricación de los tubos, esquemáticamente presentado en la Figura 1, a partir de la materia prima recibida, se realizan sucesivamente dos laminaciones en frío. Luego de cada una de esas etapas se realiza un acondicionamiento superficial (pulido externo y bruñido interno). Para finalizar el proceso, se realiza un tratamiento térmico en autoclave bajo atmósfera de agua a 400 grados de temperatura durante 24 horas. Esta operación relaja levemente las tensiones del material generadas por la laminación en frío. Además, genera una capa de óxido protector en las superficies interna y externa. Luego de las revisiones finales y el mapeo de tolerancias dimensionales, el tubo queda terminado y listo para ser instalado en el reactor nuclear.

El subproceso L1, es decir el primer paso de laminación, es el que será analizado en detalle en este trabajo.

0.4.1 Descripción de la producción de la materia prima

El proveedor,

- 1) a partir de un lingote de la aleación requerida (identificado por código de colada), lo forja,
- 2) luego lo mecaniza, cortándolo en este paso en tres partes (T, “top”; M, “médium” y B “Bottom”) generando así los “billets”, luego
- 3) extruda en caliente cada uno de los “billets”,
- 4) finalmente, cada “billet” (identificado por el código de la colada más la parte a la que perteneció) es mecanizado para obtener la materia prima, es decir, cada uno de los tubos extrudados.

0.4.2 Descripción de la laminación en frío

Mediante el proceso de laminación en frío se aplica un trabajo de deformación plástica de la superficie externa del tubo, mediante rodillos que se desplazan rodando simultáneamente sobre el tubo y guías asociadas y colocando en el interior del tubo un mandril de respaldo que permite el afinado de la pared. Este trabajo de deformación modifica tanto las dimensiones físicas del tubo (reduciendo diámetros y espesores y aumentando la longitud del mismo), como así también produce un cambio en la estructura cristalina del mismo.

En este trabajo se analizarán exclusivamente las modificaciones dimensionales del primer paso de laminación. Existen, asimismo, trabajos realizados [12] sobre los efectos en la estructura del material.

0.4.3 Variables de estudio

Cada tubo, ya sea extrudado o laminado posee dos características físicas típicas de interés: el diámetro exterior y el espesor.

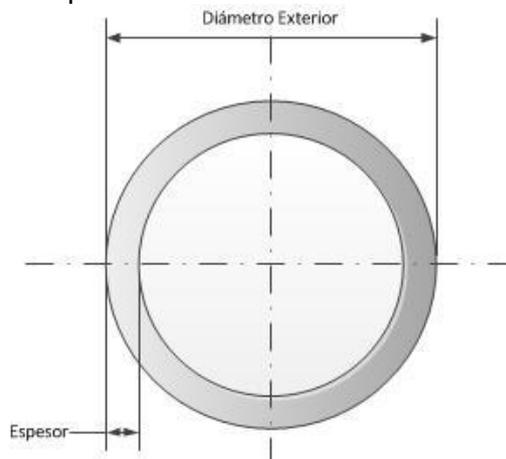


Figura 2 - Magnitudes medidas

Una particularidad es que los tubos no son perfectamente cilíndricos ni sus valores son constantes a lo largo de ellos, sino que se modifican punto a punto

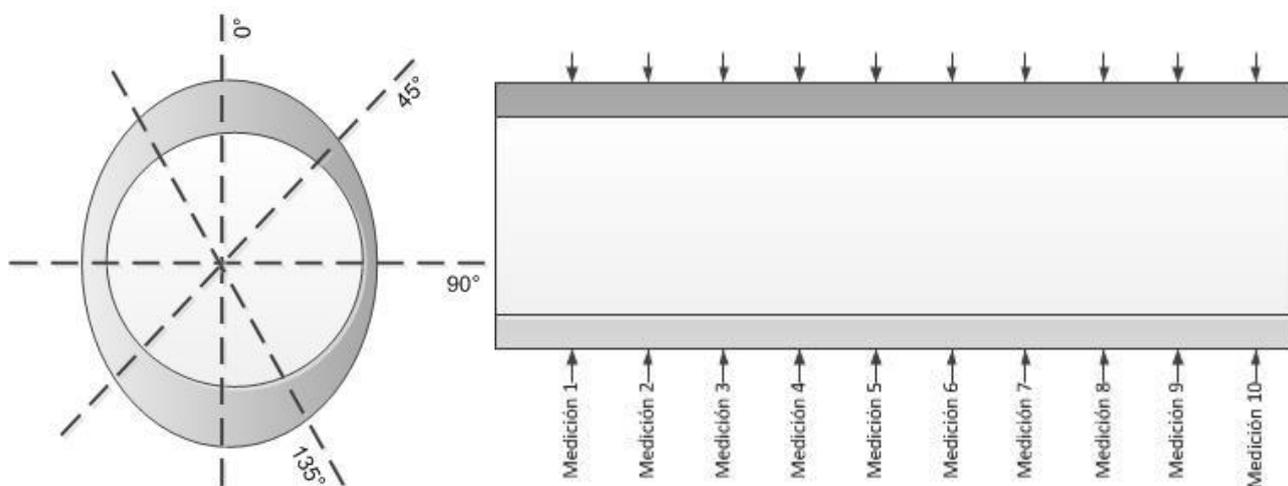


Figura 3 - Medición del tubo real

0.4.3.1 Variables medidas

Como consecuencia de lo enunciado anteriormente, el proceso de medición consiste en medir, a lo largo del tubo, en cada posición,

- con micrómetro, diámetros a distintos ángulos (0-180°, 45-225°, 90-270° y 135-315°) y
- con equipo de ultrasonido portátil, espesores, también a distintos ángulos (0°, 90°, 180° y 270°),

resultando entonces, para cada posición a lo largo del tubo, las siguientes variables:

- *Posición de medición*
- $\phi_{Máx}$ *Diámetro Máximo* (mayor diámetro de los medidos en los distintos ángulos) [mm]
- $\phi_{mín}$ *Diámetro mínimo* (menor diámetro de los medidos en los distintos ángulos) [mm]
- $\tau_{Máx}$ *Espesor Máximo* (mayor espesor de los medidos en los distintos ángulos) [mm]
- $\tau_{mín}$ *Espesor mínimo* (menor espesor de los medidos en los distintos ángulos) [mm]

0.4.3.2 Variables derivadas

$$Ovalidad = 100 \cdot \frac{\phi_{Máx} - \phi_{mín}}{\frac{\phi_{Máx} + \phi_{mín}}{2}} [\%]$$

$$Diámetro Promedio = \bar{\phi} = \frac{\phi_{Máx} + \phi_{mín}}{2} [\text{mm}]$$

$$Excentricidad = 100 \cdot \frac{\tau_{Máx} - \tau_{mín}}{\frac{\tau_{Máx} + \tau_{mín}}{2}} [\%]$$

$$Espesor Promedio = \bar{\tau} = \frac{\tau_{Máx} + \tau_{mín}}{2} [\text{mm}]$$

1 Materia Prima

1.1 Generalidades

A partir de los valores medidos de todos los tubos extrudados que integran del lote de producción, sin distinción alguna (billet o colada) se analizaron globalmente los valores de las variables de interés.

De este primer análisis surgieron una serie de mediciones que resultaron fácilmente diferenciables del resto de la población, se las identificó y se estudió el origen de los datos. En muchos de los casos se los corrigió o eliminó, dado que se trataban estrictamente de valores extremos [5] con causas asignables, por ejemplo fueron claramente identificables errores de transcripción. A lo largo de este trabajo se empleará el término “outlier” para referir aquellos valores de un determinado grupo (lote, sección, billet, etc., según corresponda) que no correspondan a la distribución estadística propia del resto del grupo [14] [22].

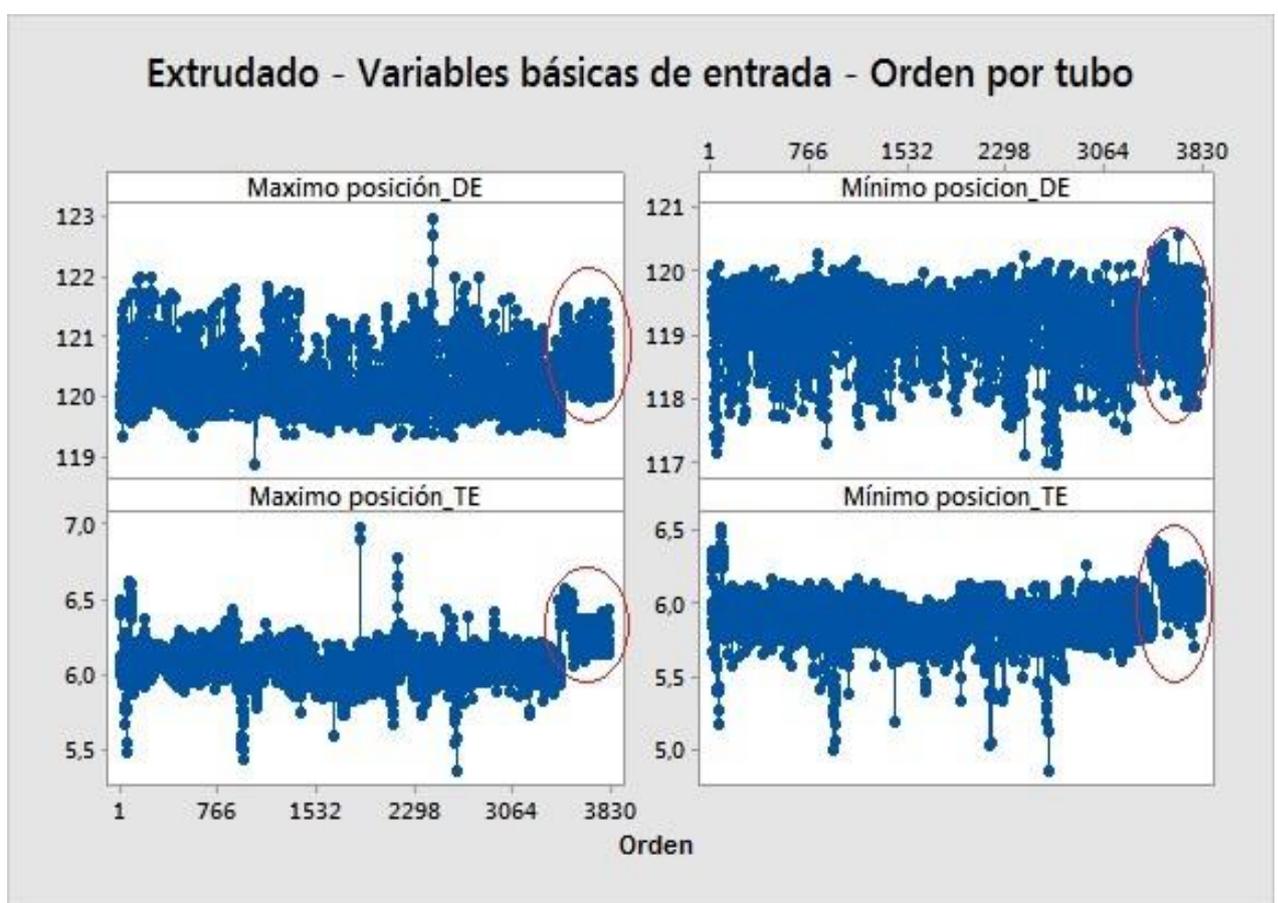


Figura 4 – Extrudado - Lote Completo - Resumen de Variables de Entrada
DE: Diámetro Extrudado TE: Espesor Extrudado

Analizando la Figura 4, en donde se grafican los valores de las cuatro variables medidas de la materia prima, se identifican dos zonas, una relativamente uniforme y otra claramente diferenciable de la primera (indicada en color rojo). Para realizar el análisis se empleará tanto el lote global (todos los tubos) como el lote reducido (sin los tubos correspondientes a las mediciones seleccionadas en color rojo).

Existe una razón práctica que justifica esta disgregación: la primer sección de materia prima se recibió en conjunto, y luego de dos años se fabricó y recibió un conjunto adicional de materia prima, que coincide con la sección indicada en color rojo, es por ello que podría considerarse que existen causas asignables a la heterogeneidad de las variables de entrada al proceso.

Para el análisis se denominará “lote completo” a la totalidad de los tubos laminados y “lote reducido” a los tubos correspondientes a la sección no resaltada.

A fin de encontrar las relaciones entre las variables de cada tubo, tomando en cuenta el lote reducido, se genera la matriz M de mediciones cuya dimensión es m x n

m filas = número de muestras, i.e. 430 tubos (lote reducido)

n columnas = número de variables, i.e. 32 = 8 variables de diámetros máximos, 8 de diámetros mínimos, 8 de espesores máximos y 8 de espesores mínimos (el tubo extrudado se midió en 8 posiciones longitudinales)

A partir de esta matriz se realiza el gráfico (dendrograma) de similaridad entre variables de la Figura 5.

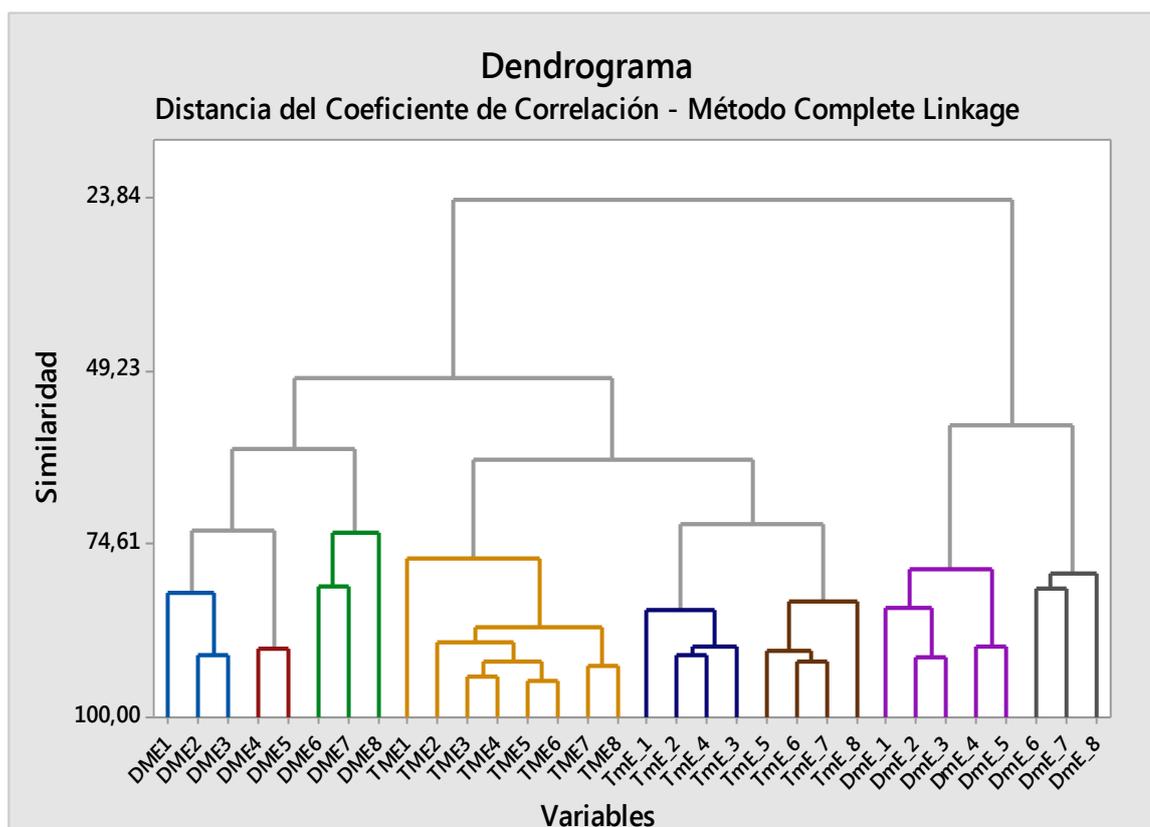


Figura 5 – Extrudado - Dendrograma de variables medidas

El dendrograma de la Figura 5 permite visualizar que es posible hallar relaciones de afinidad entre las variables medidas (notar que resultan agrupadas entre sí las 8 variables medidas).

Esta asociación se puede detectar realizando un análisis de correlación de las variables. En este caso se realizó el análisis por el método de Spearman, dado que como se indicará *a posteriori*, las variables no presentan un comportamiento gaussiano.

Spearman Rho:

Variables	DME1	DME2	DME3	DME4	DME5	DME6	DME7	DME8	DmE1	DmE2	DmE3	DmE4	DmE5	DmE6	DmE7	DmE8
DME2	0.73															
DME3	0.62	0.80														
DME4	0.50	0.64	0.75													
DME5	0.43	0.59	0.67	0.75												
DME6	0.29	0.41	0.49	0.54	0.67											
DME7	0.19	0.24	0.27	0.37	0.47	0.59										
DME8	0.25	0.29	0.35	0.44	0.52	0.51	0.37									
DmE1	-0.38	-0.36	-0.31	-0.26	-0.20	-0.10	-0.03	0.02								
DmE2	-0.38	-0.43	-0.39	-0.33	-0.24	-0.11	0.01	-0.04	0.70							
DmE3	-0.34	-0.45	-0.41	-0.34	-0.28	-0.07	0.04	0.00	0.61	0.78						
DmE4	-0.21	-0.29	-0.34	-0.33	-0.33	-0.13	-0.03	-0.02	0.55	0.63	0.75					
DmE5	-0.21	-0.25	-0.26	-0.24	-0.22	-0.10	0.01	0.02	0.51	0.60	0.67	0.75				
DmE6	-0.10	-0.15	-0.14	-0.12	-0.15	0.10	-0.01	0.08	0.42	0.41	0.51	0.64	0.64			
DmE7	-0.02	-0.03	-0.04	-0.04	-0.10	0.01	-0.12	0.16	0.31	0.24	0.35	0.49	0.50	0.61		
DmE8	0.11	0.03	0.04	0.02	0.02	0.09	0.05	0.12	0.19	0.18	0.25	0.33	0.38	0.51	0.51	
TME1	0.18	0.21	0.16	0.20	0.19	0.19	0.17	0.14	-0.06	-0.04	-0.02	0.10	0.19	0.18	0.20	0.26
TME2	0.15	0.16	0.17	0.19	0.18	0.22	0.17	0.17	0.03	0.03	0.06	0.14	0.22	0.24	0.26	0.28
TME3	0.10	0.12	0.16	0.15	0.21	0.24	0.21	0.21	0.07	0.08	0.11	0.16	0.22	0.22	0.21	0.21
TME4	0.12	0.14	0.17	0.18	0.24	0.26	0.21	0.22	0.04	0.06	0.12	0.16	0.20	0.24	0.23	0.21
TME5	0.12	0.14	0.17	0.17	0.22	0.24	0.23	0.24	0.05	0.10	0.13	0.16	0.19	0.26	0.23	0.23
TME6	0.09	0.13	0.17	0.16	0.24	0.31	0.24	0.28	0.01	0.04	0.11	0.09	0.17	0.20	0.28	0.20
TME7	0.08	0.09	0.15	0.15	0.23	0.31	0.24	0.27	0.02	0.03	0.10	0.10	0.18	0.21	0.26	0.21
TME8	0.02	0.05	0.13	0.14	0.24	0.30	0.24	0.27	-0.00	0.05	0.08	0.04	0.15	0.13	0.23	0.18
TmE1	0.20	0.15	0.10	0.15	0.12	0.13	0.12	-0.07	0.02	0.08	0.17	0.25	0.26	0.20	0.24	0.24
TmE2	0.22	0.19	0.16	0.17	0.15	0.21	0.16	0.18	-0.07	0.01	0.11	0.20	0.23	0.27	0.27	0.28
TmE3	0.17	0.14	0.11	0.11	0.14	0.21	0.15	0.18	-0.03	0.04	0.12	0.20	0.28	0.28	0.29	0.26
TmE4	0.17	0.17	0.15	0.14	0.15	0.22	0.14	0.19	-0.04	0.01	0.08	0.17	0.21	0.22	0.26	0.22
TmE5	0.16	0.19	0.17	0.14	0.15	0.22	0.14	0.24	-0.02	0.00	0.06	0.15	0.17	0.24	0.29	0.24
TmE6	0.11	0.16	0.15	0.10	0.13	0.22	0.17	0.20	-0.02	-0.00	0.08	0.15	0.15	0.20	0.26	0.23
TmE7	0.08	0.10	0.16	0.12	0.14	0.25	0.13	0.23	0.04	0.05	0.17	0.16	0.18	0.27	0.26	0.24
TmE8	-0.01	0.02	0.05	0.02	0.08	0.18	0.12	0.14	-0.02	0.08	0.13	0.13	0.14	0.17	0.13	0.08

Variables	TME1	TME2	TME3	TME4	TME5	TME6	TME7	TME8	TmE1	TmE2	TmE3	TmE4	TmE5	TmE6	TmE7
TME2	0.83														
TME3	0.74	0.86													
TME4	0.69	0.77	0.85												
TME5	0.62	0.70	0.78	0.79											
TME6	0.54	0.69	0.76	0.75	0.83										
TME7	0.52	0.64	0.69	0.72	0.75	0.83									
TME8	0.53	0.63	0.69	0.68	0.71	0.82	0.79								
TmE1	0.69	0.62	0.58	0.59	0.58	0.49	0.49	0.44							
TmE2	0.60	0.64	0.59	0.59	0.57	0.54	0.57	0.49	0.84						
TmE3	0.61	0.61	0.63	0.62	0.60	0.60	0.61	0.58	0.81	0.85					
TmE4	0.53	0.56	0.55	0.61	0.58	0.58	0.60	0.56	0.74	0.80	0.85				
TmE5	0.51	0.53	0.52	0.54	0.63	0.62	0.63	0.58	0.67	0.72	0.78	0.81			
TmE6	0.47	0.55	0.56	0.56	0.58	0.65	0.63	0.57	0.59	0.68	0.74	0.74	0.78		
TmE7	0.40	0.48	0.49	0.52	0.57	0.59	0.63	0.53	0.55	0.65	0.65	0.69	0.72	0.78	
TmE8	0.22	0.34	0.41	0.42	0.52	0.57	0.56	0.50	0.40	0.48	0.52	0.59	0.59	0.64	0.70

DM: Diámetro Máximo; Dm: Diámetro mínimo; TM Espesor Máximo; Tm espesor mínimo luego posición en el tubo

(se resaltaron las correlaciones mayores a 0.75, considerándolas en este trabajo como fuertes)

Realizando un análisis de componentes principales [23] se obtiene el gráfico de loadings de la Figura 6 (a partir de la matriz de correlación, dado que las variables de diámetros y espesores tienen magnitudes significativamente diferentes).

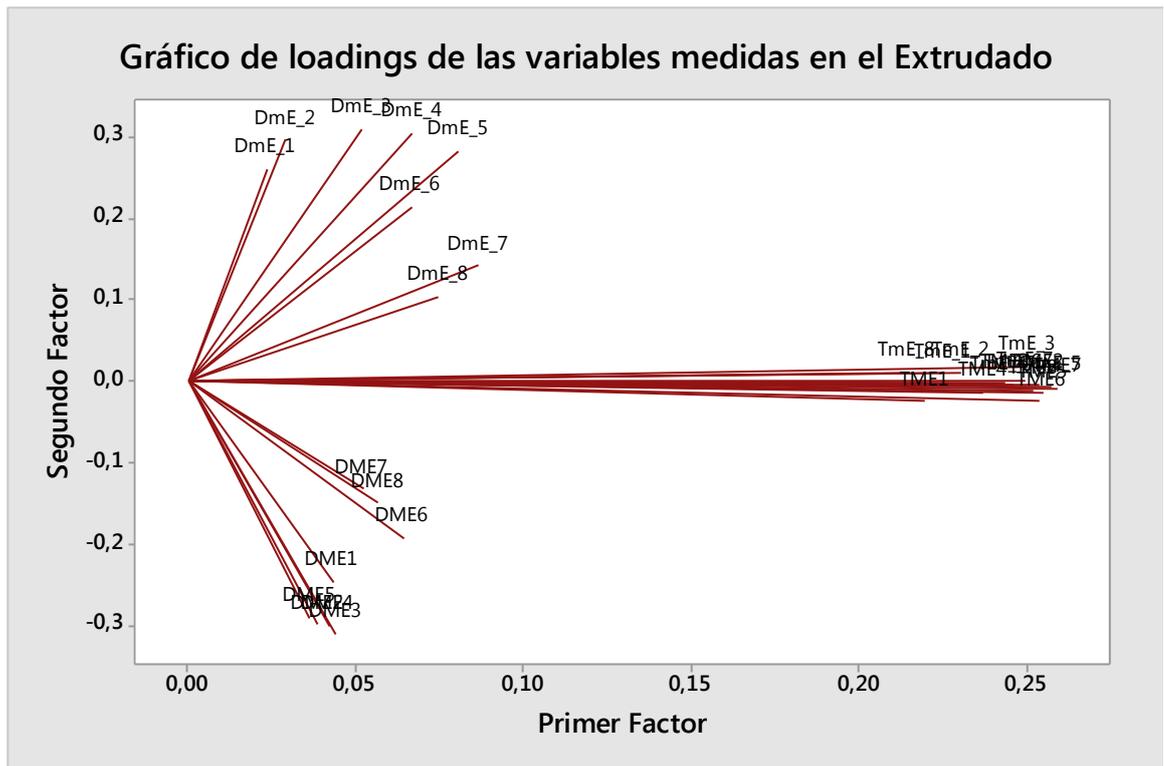


Figura 6 - Extrudado - Loadings de variables medidas

En el gráfico de la Figura 6 se puede visualizar en el sistema de coordenadas de los autovectores de la matriz de correlación de M que existe una asociación de variables, diferenciando entre sí un conjunto correspondiente a las variables de los diámetros máximos de otro conjunto correspondiente a las variables de los diámetros mínimos y un tercer conjunto correspondiente a las variables de los espesores (aunque con poca diferenciación entre ellos entre espesores máximos y mínimos).

Cabe destacar que el gráfico de loadings emplea combinaciones lineales de la matriz M, mientras que el dendograma emplea distancias euclidianas en pares de variables.

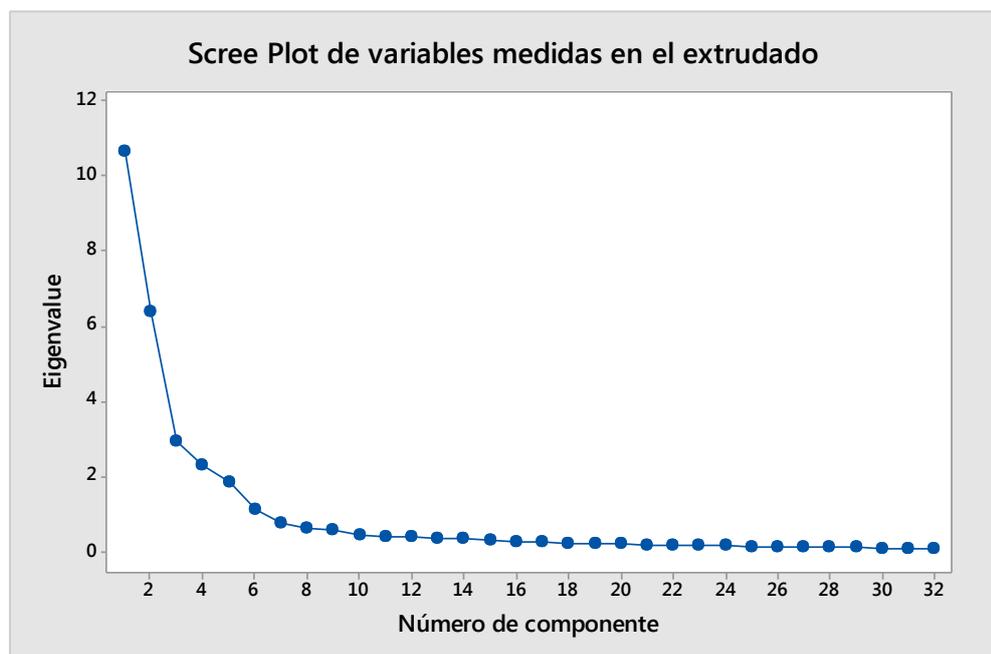


Figura 7 – Extrudado - Scree Plot de variables medidas

A partir del análisis de los autovalores se puede concluir que, haciendo un análisis de componentes principales, los primeros 8 autovectores explican el 83 % de la varianza (y con los 13 primeros el 90%).

Eigenanalysis of the Correlation Matrix

Eigenvalue	10,659	6,403	2,931	2,306	1,858	1,104	0,773	0,601	0,560	0,456	0,401
Proportion	0,333	0,200	0,092	0,072	0,058	0,034	0,024	0,019	0,018	0,014	0,013
Cumulative	0,333	0,533	0,625	0,697	0,755	0,789	0,814	0,832	0,850	0,864	0,877

Eigenvalue	0,391	0,343	0,323	0,283	0,262	0,245	0,219	0,207	0,206	0,181	0,172
Proportion	0,012	0,011	0,010	0,009	0,008	0,008	0,007	0,006	0,006	0,006	0,005
Cumulative	0,889	0,900	0,910	0,919	0,927	0,934	0,941	0,948	0,954	0,960	0,965

El gráfico de la Figura 7 resume los valores anteriores de autovalores (eigenvalue) y permite relacionarlos entre sí.

Tanto la técnica de dendograma como la de análisis por componentes principales permiten diferenciar correctamente las variables correspondientes a los diámetros de las correspondientes a espesores, las cuales en ambas técnicas no son agrupadas entre sí por lo que se puede concluir que existe correspondencia en cuanto a las clasificaciones logradas por ambas técnicas.

Observando el análisis por componentes principales se podría especular que los dos primeros componentes contienen las variables que discriminan el proceso, al menos para diferenciar diámetros de espesores. El segundo factor discrimina los diámetros mayores de los menores y ambos de los espesores. No es posible con los dos primeros factores discriminar espesores entre sí.

1.2 Diámetro Máximo

Empleando el software Minitab® se puede apreciar en la Figura 8 un resumen gráfico del comportamiento de esta variable. En color rojo se representa cuál sería la distribución gaussiana que mejor se ajusta a los valores medidos.

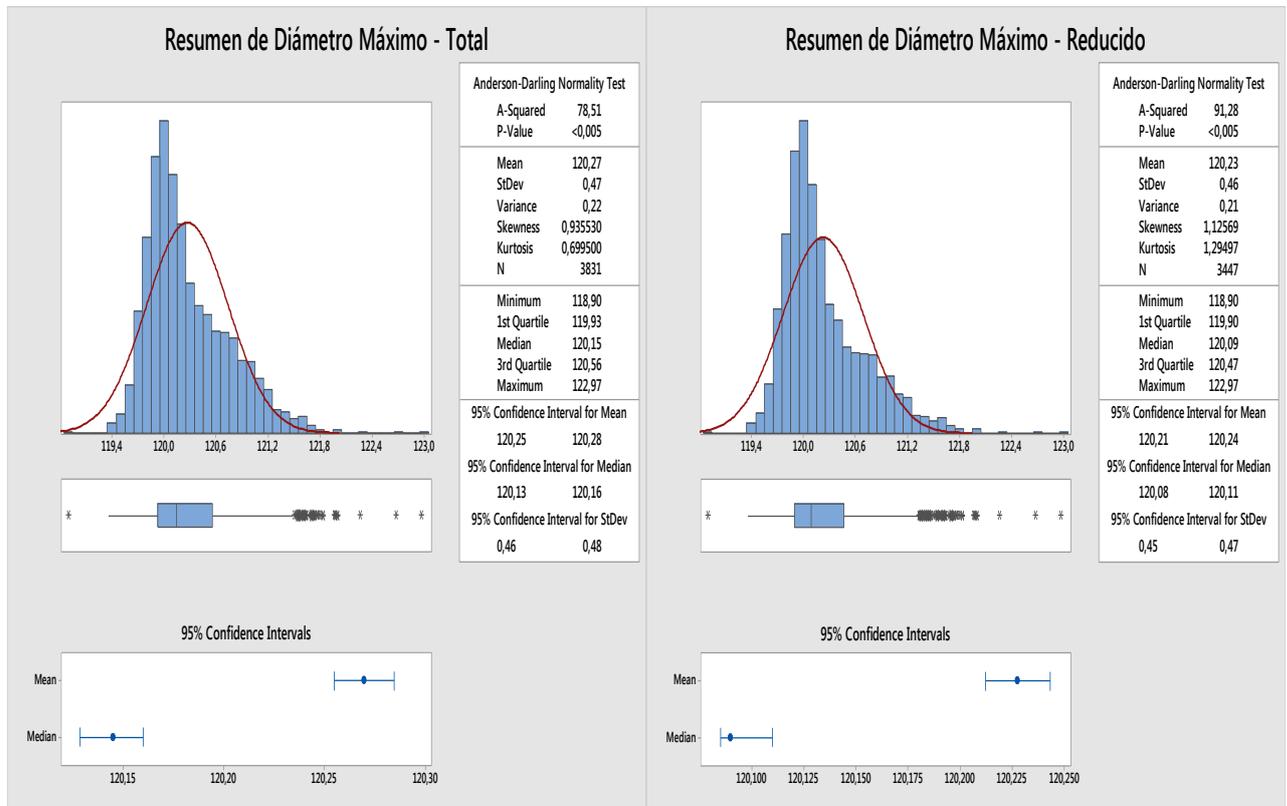


Figura 8 – Extrudado - Diámetro Máximo - Resumen Gráfico

Para cada posición medida en el tubo, en la Figura 9 se presenta un gráfico de caja y bigotes, indicando en el centro de la caja la mediana de esa posición y su intervalo de confianza (para el cálculo del intervalo de confianza de la mediana Minitab® emplea la prueba de Wilcoxon de una muestra [7]).

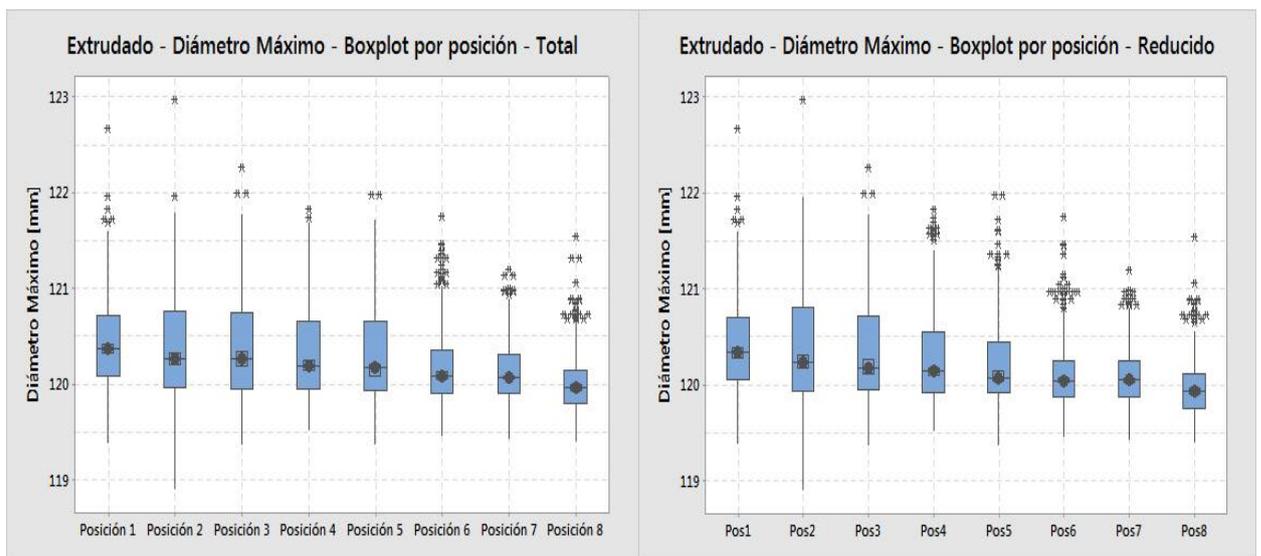


Figura 9 - Extrudado - Diámetro Máximo - Diagrama Caja y Bigotes

NOTA: En los tubos extrudados, “Posición” se refiere al número de noveno de la longitud total, medido desde el frente del tubo. Ejemplo: “Posición 3” es la posición correspondiente al 3 noveno del tubo, es decir a un tercio de la longitud total, medido desde el frente.

1.3 Diámetro Mínimo

De mismo modo que para el diámetro máximo, se emplea el software Minitab® para obtener el resumen gráfico de la Figura 10, correspondiente al comportamiento de la variable *Diámetro mínimo* (en color rojo se representa cuál sería la distribución gaussiana que mejor se ajusta a los valores medidos).

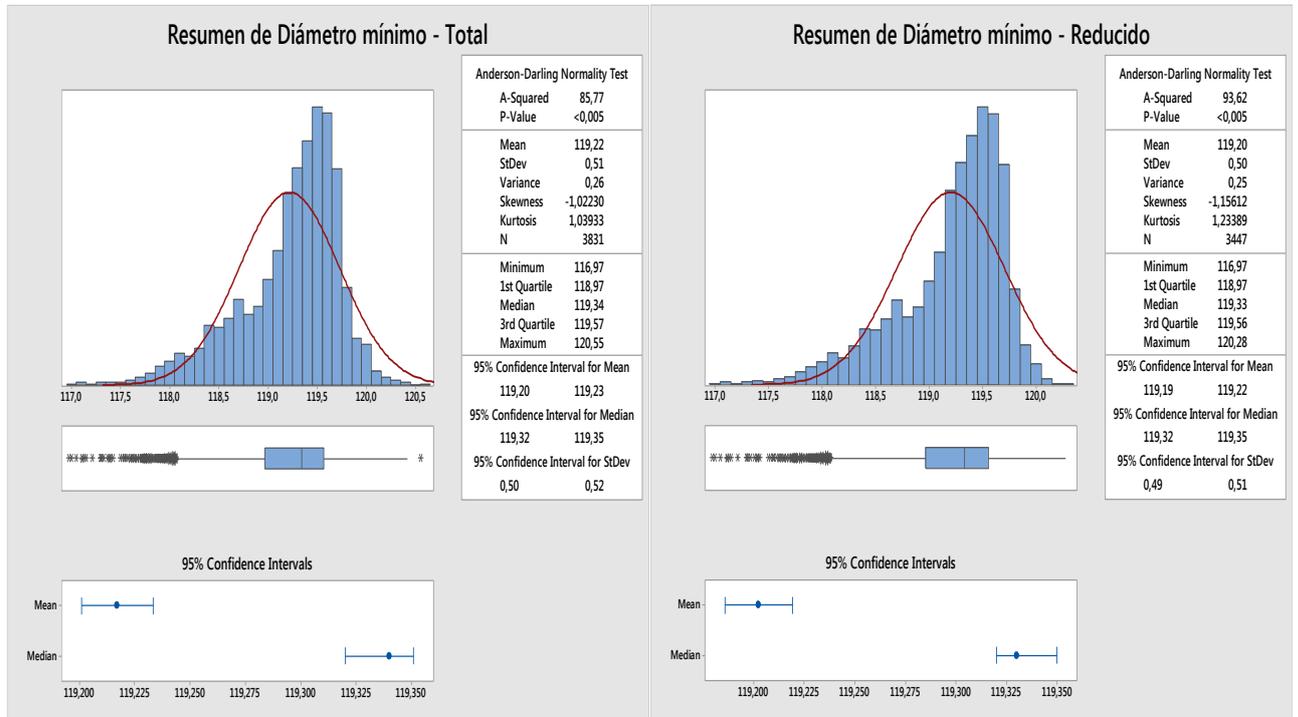


Figura 10 - Extrudado - Diámetro mínimo - Resumen Gráfico

Para cada posición medida en el tubo, en la Figura 11 se presenta un gráfico de caja y bigotes, indicando en el centro de la caja la mediana de esa posición y su intervalo de confianza.

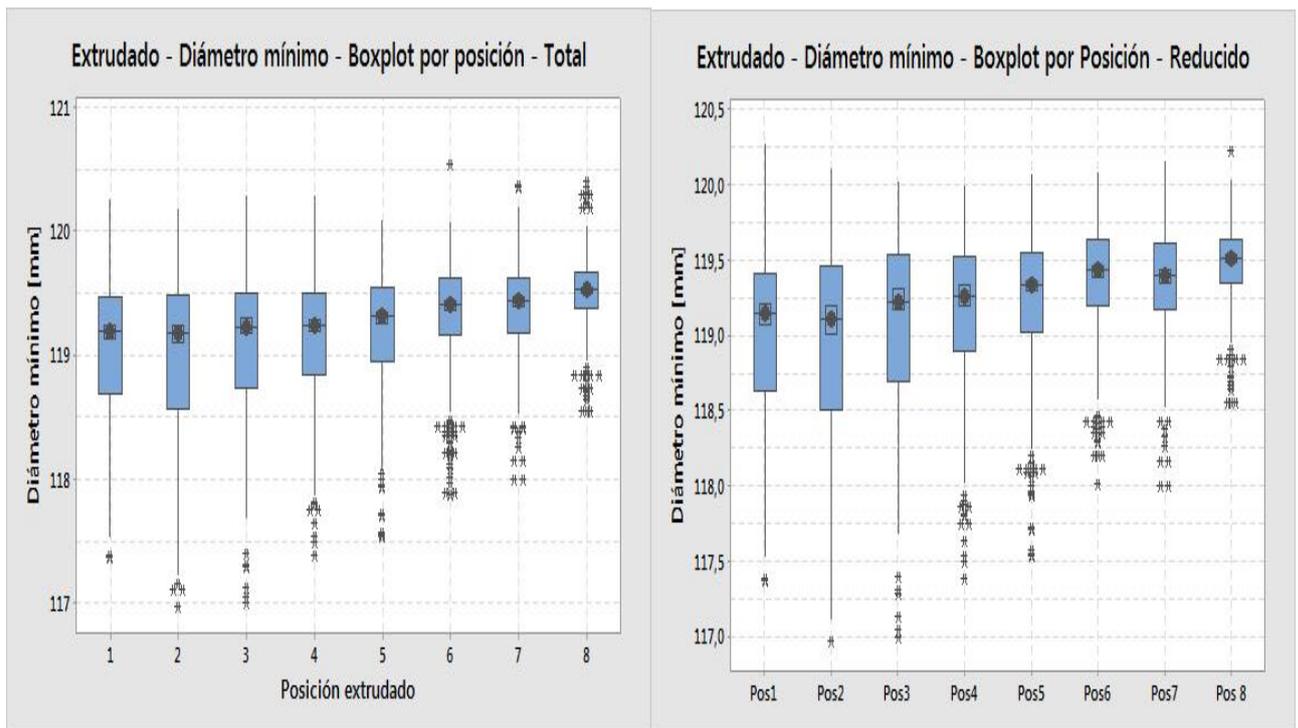


Figura 11 - Extrudado - Diámetro mínimo - Diagrama Caja y Bigotes

1.4 Espesor Máximo

El resumen gráfico de los valores de esta variable, mediante el software Minitab® es el indicado en la Figura 12 (en color rojo se representa cuál sería la distribución gaussiana que mejor se ajusta a los valores medidos).

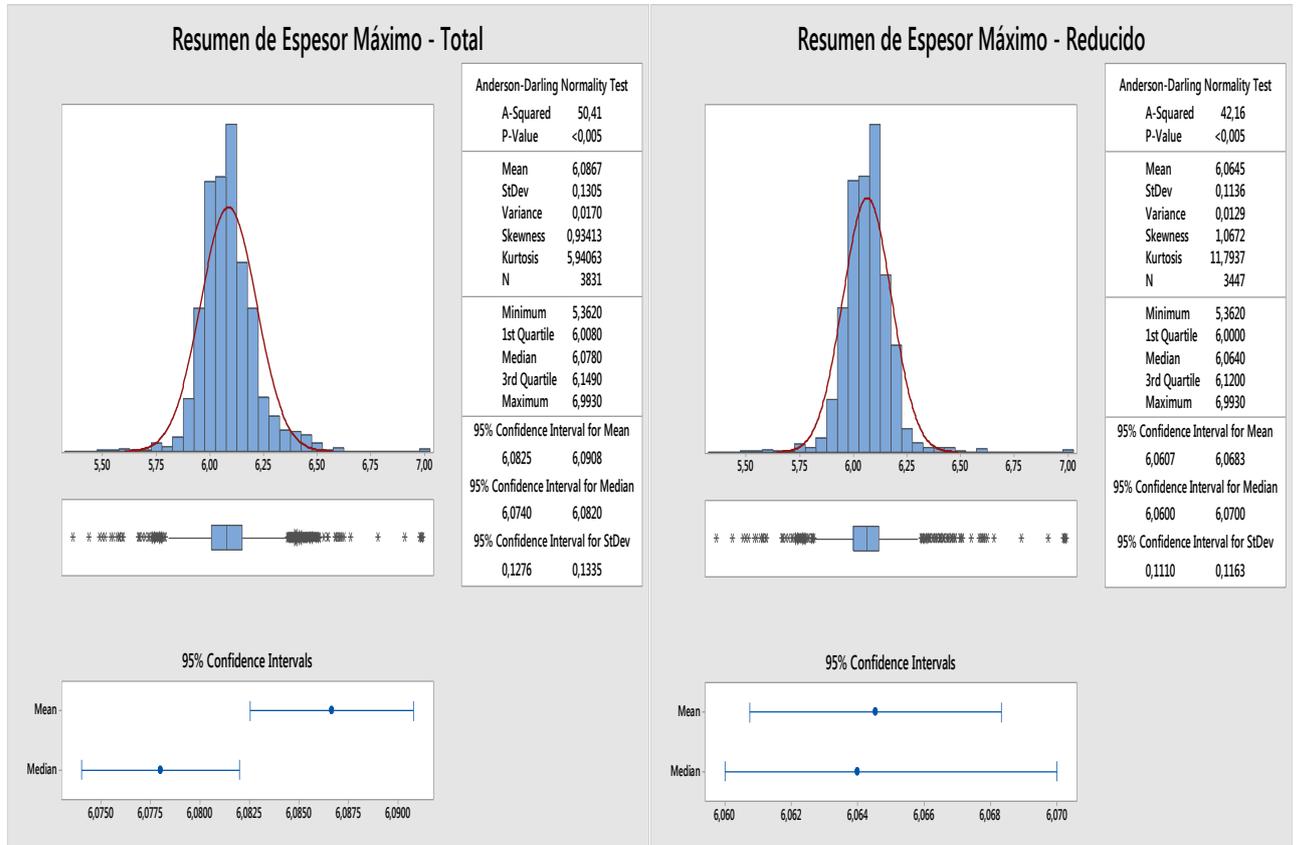


Figura 12 – Extrudado - Espesor Máximo - Resumen Gráfico

Para cada posición medida en el tubo, en la Figura 13 se presenta un gráfico de caja y bigotes, indicando en el centro de la caja la mediana de esa posición y su intervalo de confianza.

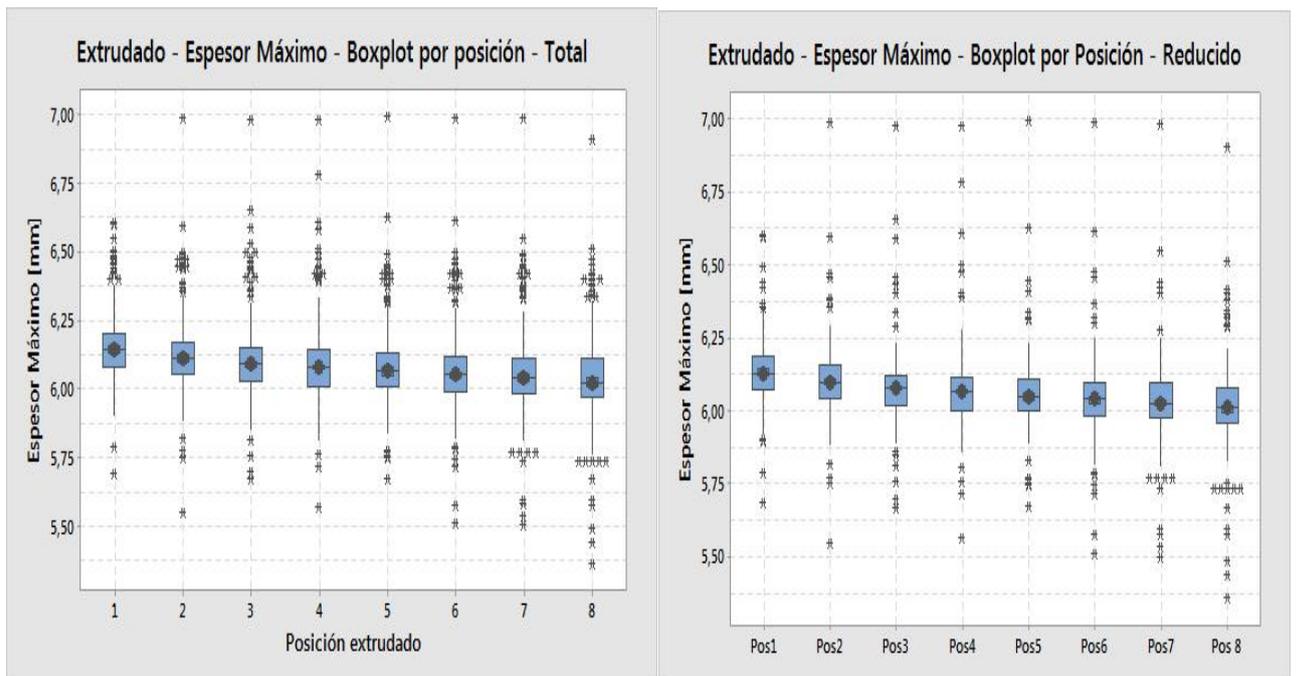


Figura 13 – Extrudado - Espesor Máximo - Diagrama Caja y Bigotes

1.5 Espesor Mínimo

La Figura 14 presenta el resumen gráfico de los valores de la variable *Espesor mínimo*, mediante el software Minitab® (en color rojo se representa cuál sería la distribución gaussiana que mejor se ajusta a los valores medidos).

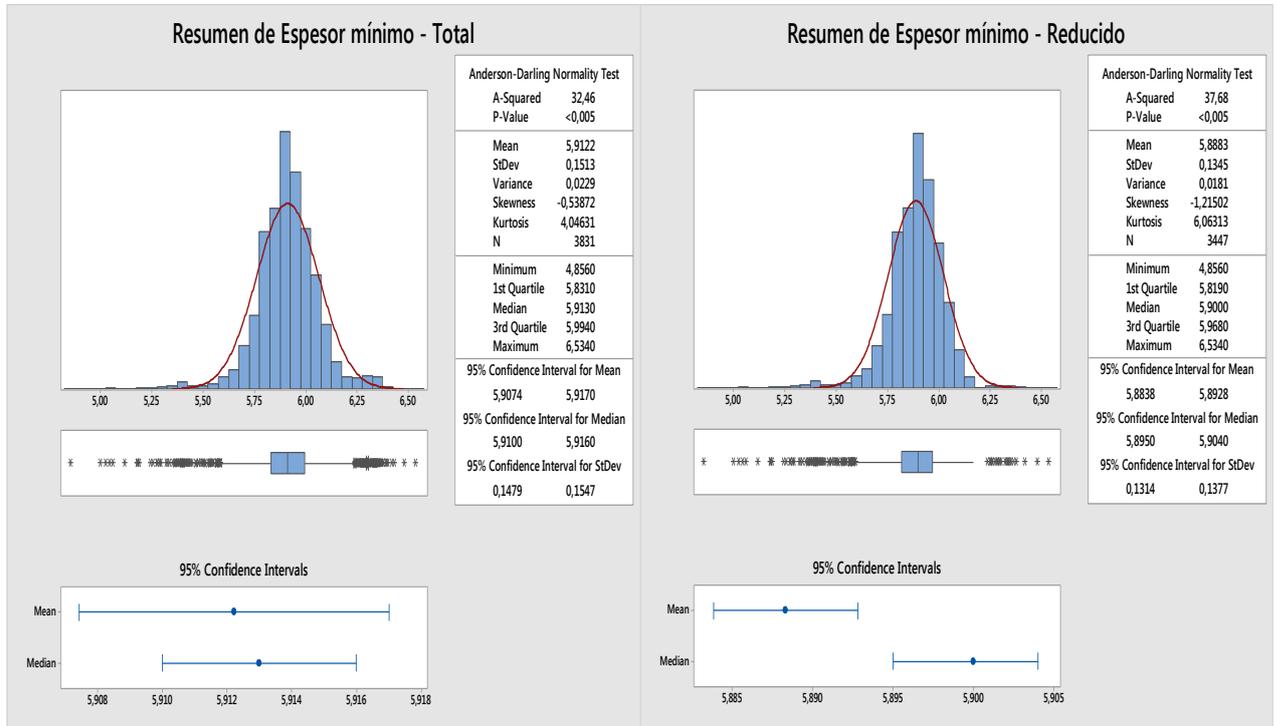


Figura 14 – Extrudado - Espesor mínimo - Resumen Gráfico

A continuación, para cada posición medida en el tubo, se presenta en la Figura 15 un gráfico de caja y bigotes, indicando en el centro de la caja la mediana de esa posición y su intervalo de confianza.

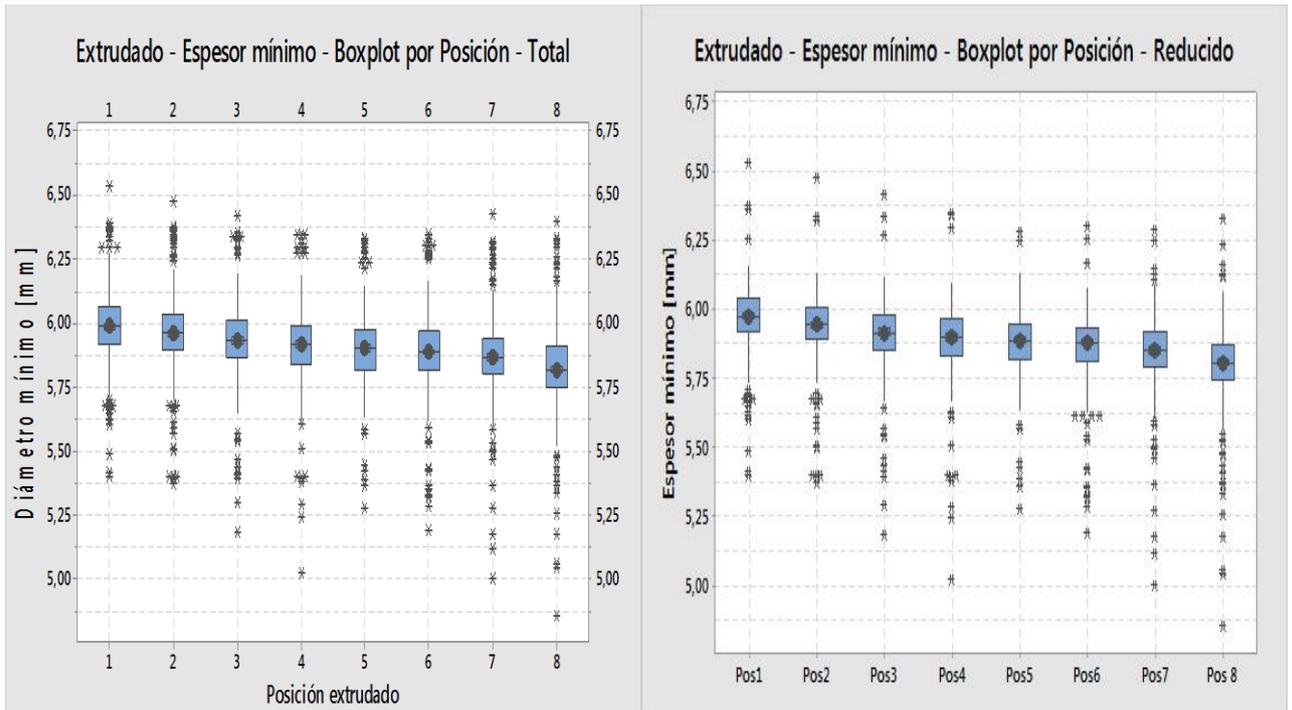


Figura 15 – Extrudado - Espesor mínimo - Diagrama Caja y Bigotes

1.6 Diámetro Promedio

El resumen gráfico de los valores de la variable *Diámetro Promedio*, mediante el software Minitab® es el representado en la Figura 16 (en color rojo se representa cuál sería la distribución gaussiana que mejor se ajusta a los valores medidos).

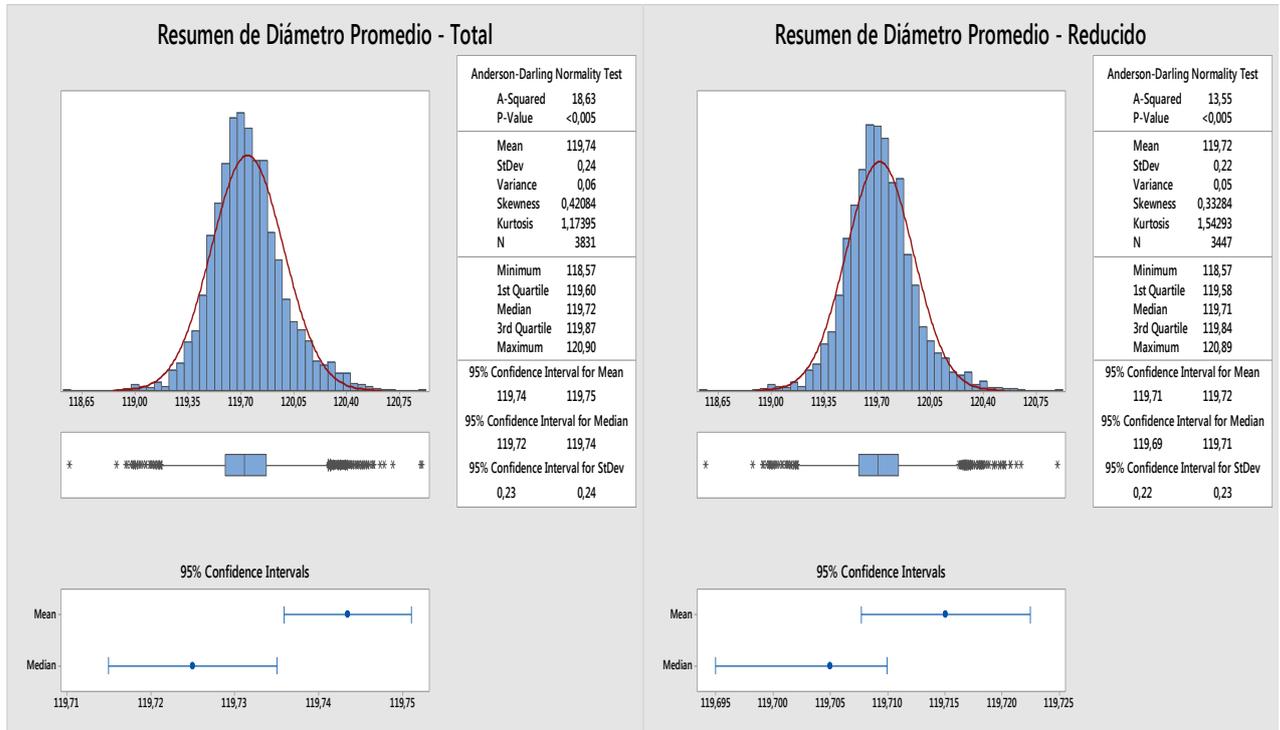


Figura 16 – Extrudado - Diámetro Promedio - Resumen Gráfico

Para cada posición medida en el tubo, en la Figura 17 se presenta un gráfico de caja y bigotes, indicando en el centro de la caja la mediana de esa posición y su intervalo de confianza.

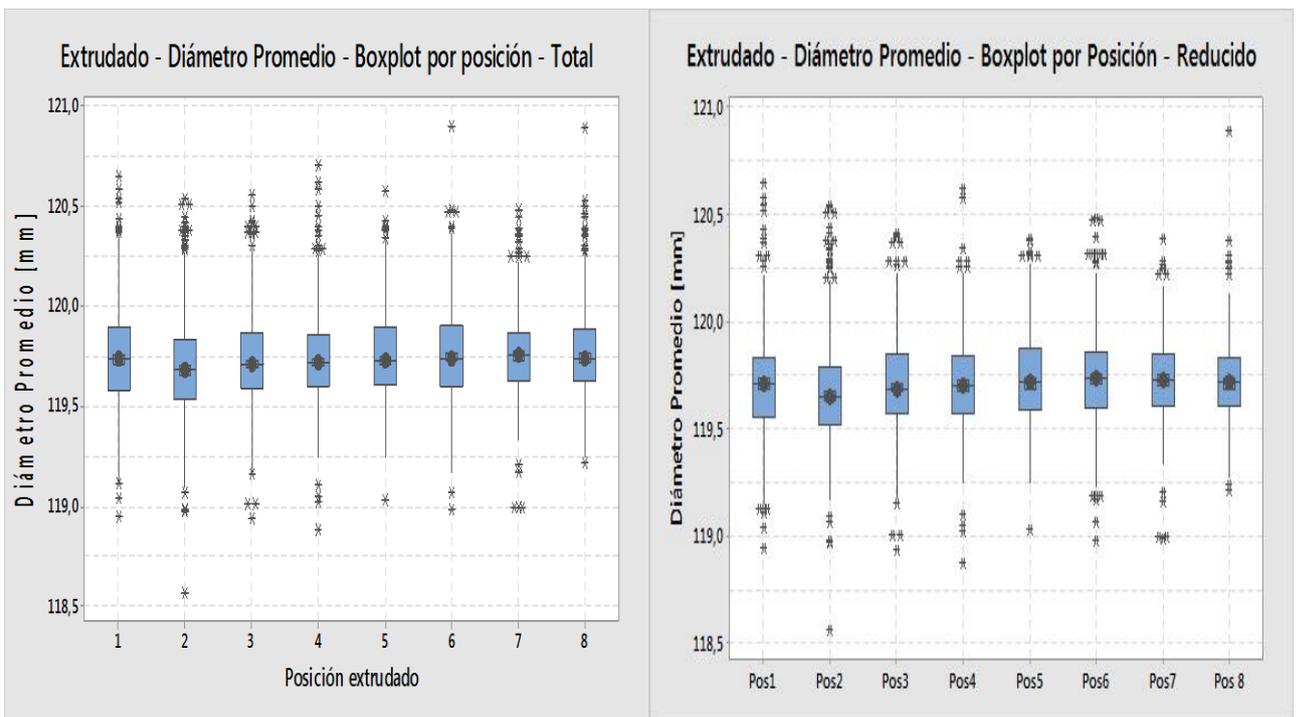


Figura 17 – Extrudado - Diámetro Promedio - Diagrama Caja y Bigotes

1.7 Espesor Promedio

El resumen gráfico de los valores de la variable *Espesor Promedio*, mediante el software Minitab® es el presentado en la Figura 18 (en color rojo se representa cuál sería la distribución gaussiana que mejor se ajusta a los valores medidos).

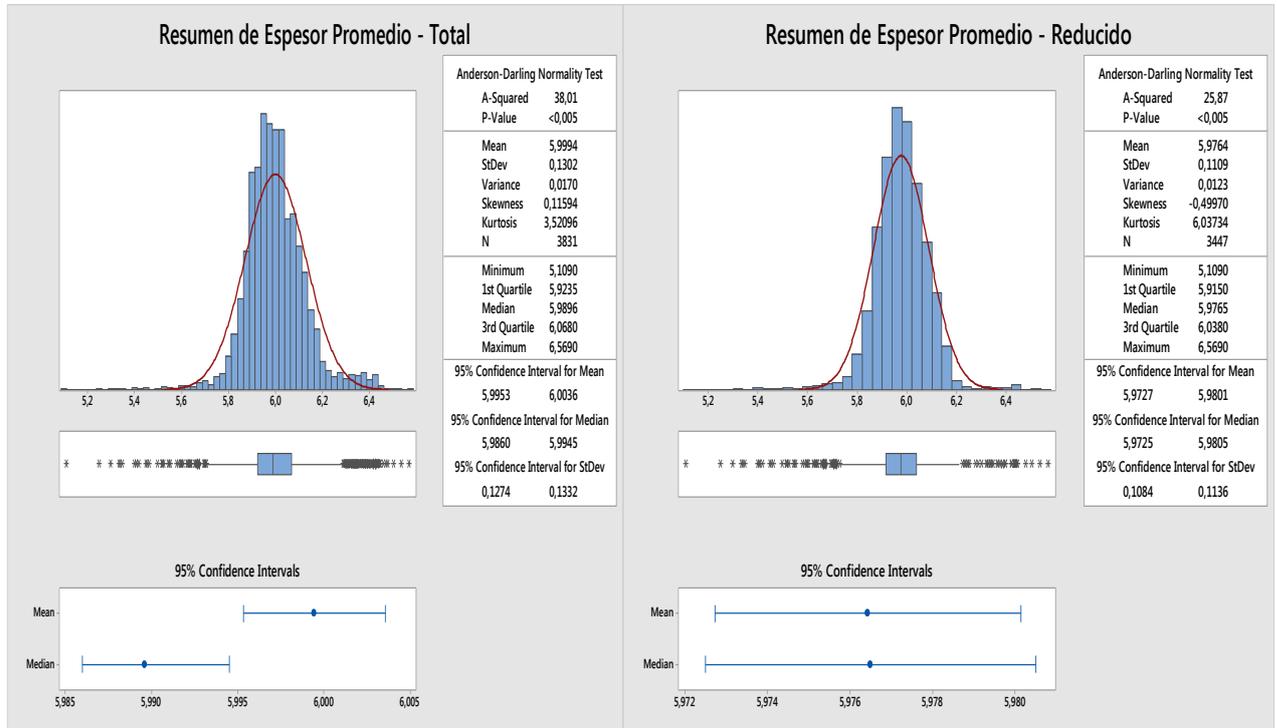


Figura 18 – Extrudado - Espesor Promedio - Resumen Gráfico

Para cada posición medida en el tubo, la Figura 19 presenta un gráfico de caja y bigotes, indicando en el centro de la caja la mediana de esa posición y su intervalo de confianza.

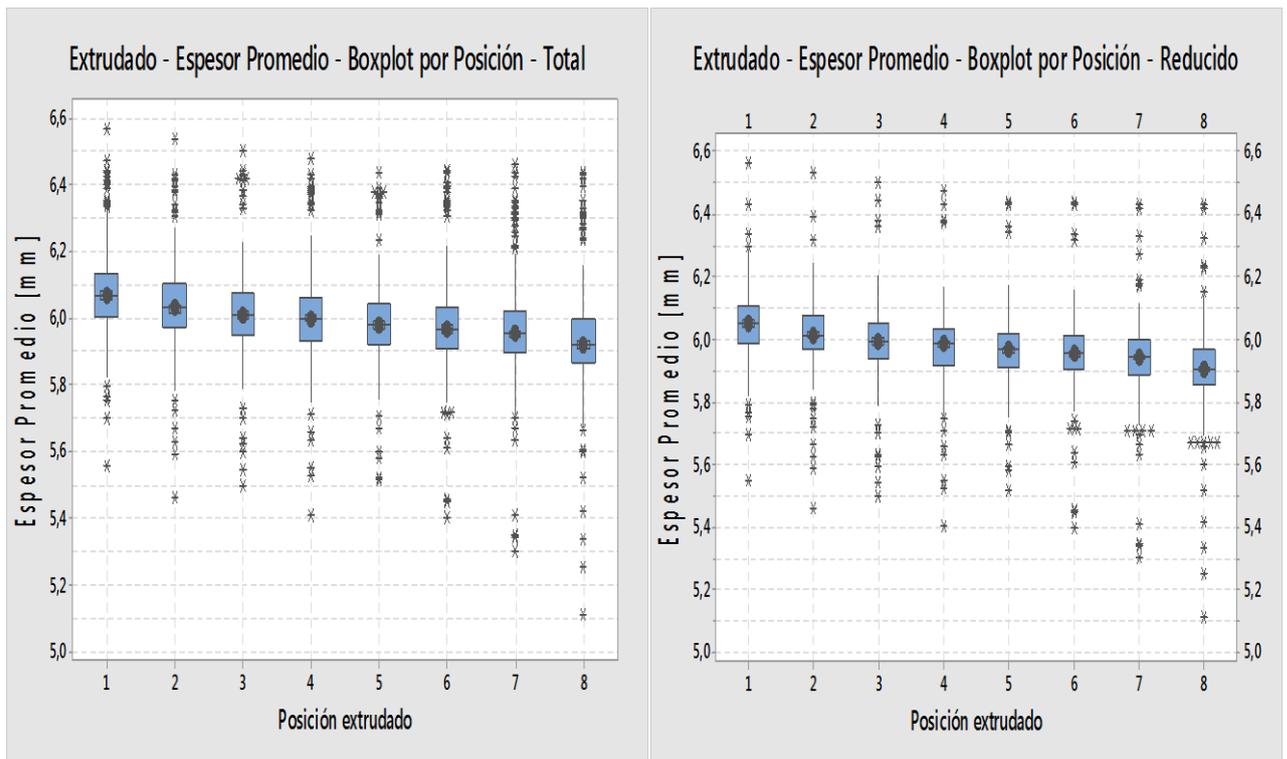


Figura 19 – Extrudado - Espesor Promedio - Diagrama Caja y Bigotes

1.8 Ovalidad

El resumen gráfico de los valores de la variable *Ovalidad*, mediante el software Minitab® es el presentado en la Figura 20 (en color rojo se representa cuál sería la distribución gaussiana que mejor se ajusta a los valores medidos).

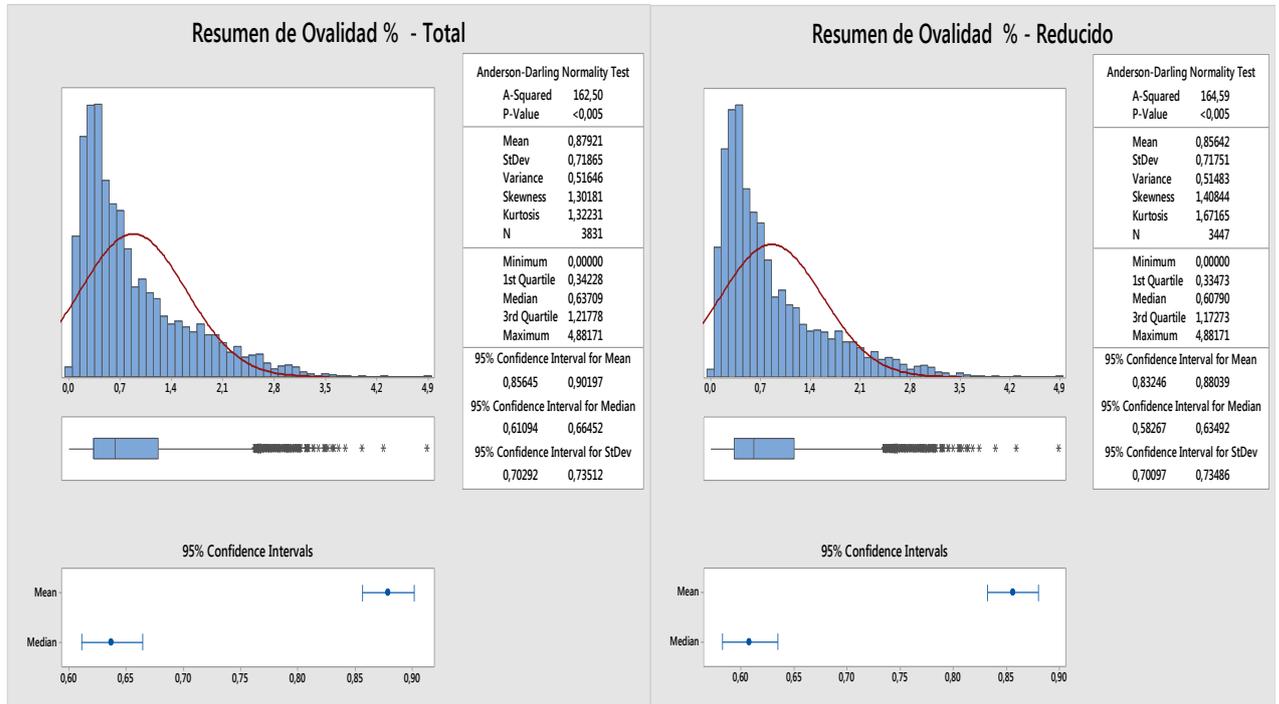


Figura 20 – Extrudado - Ovalidad - Resumen Gráfico

Para cada posición medida en el tubo, se presenta en la Figura 21 un gráfico de caja y bigotes, indicando en el centro de la caja la mediana de esa posición y su intervalo de confianza.

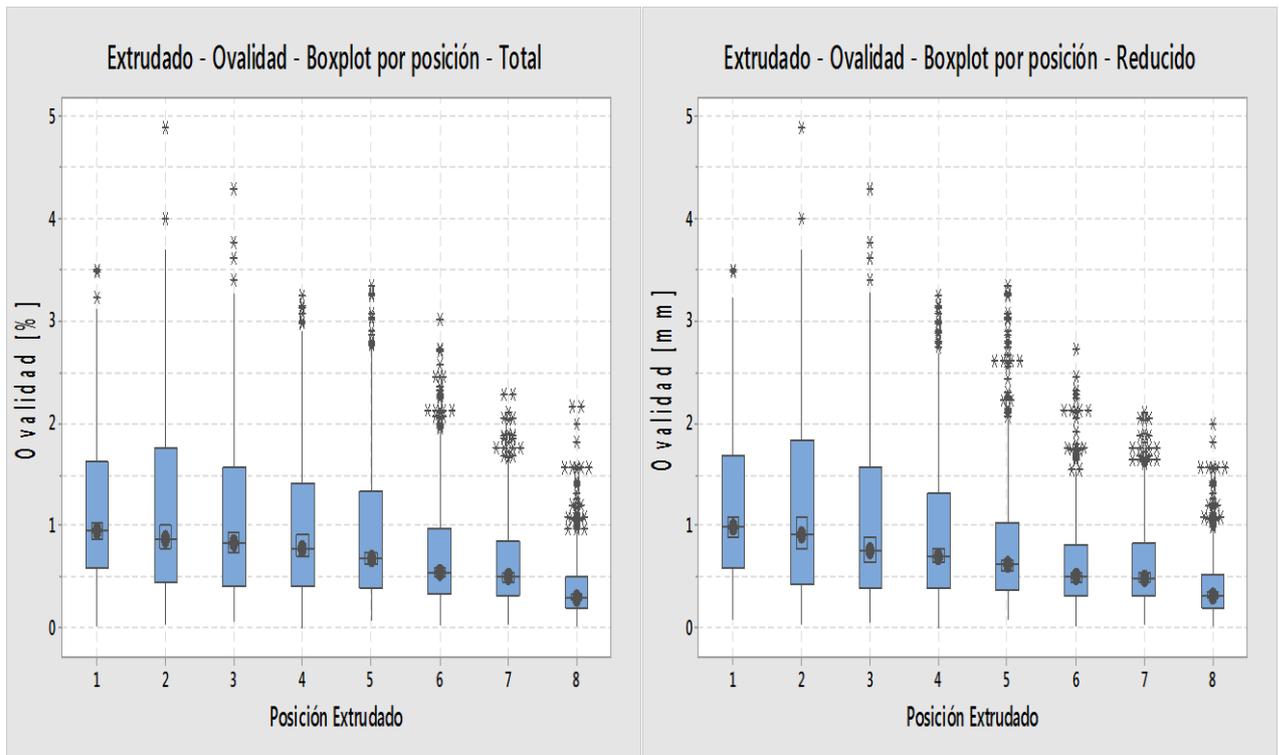


Figura 21 – Extrudado - Ovalidad - Diagrama Caja y Bigotes

1.9 Excentricidad

El resumen gráfico de los valores de la variable *Excentricidad*, mediante el software Minitab® es el presentado en la Figura 22 (en color rojo se representa cuál sería la distribución gaussiana que mejor se ajusta a los valores medidos).

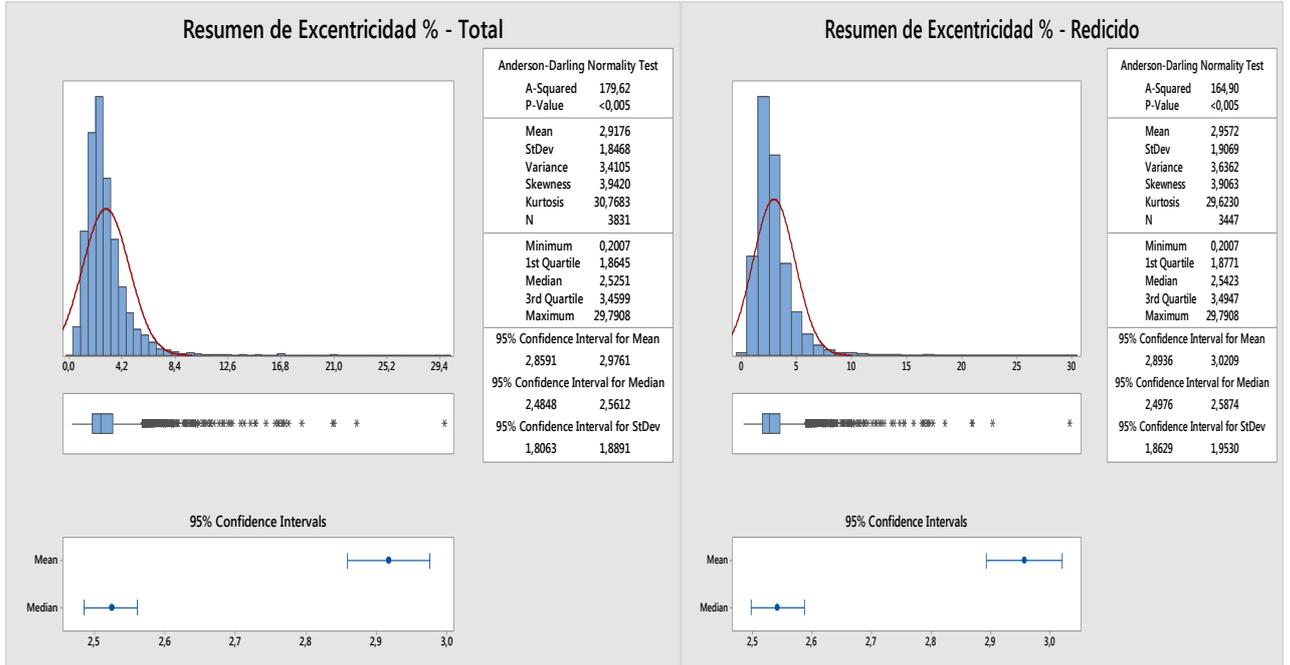


Figura 22 – Extrudado - Excentricidad - Resumen Gráfico

Para cada posición medida en el tubo, en la Figura 23 se presenta un gráfico de caja y bigotes, indicando en el centro de la caja la mediana de esa posición y su intervalo de confianza.

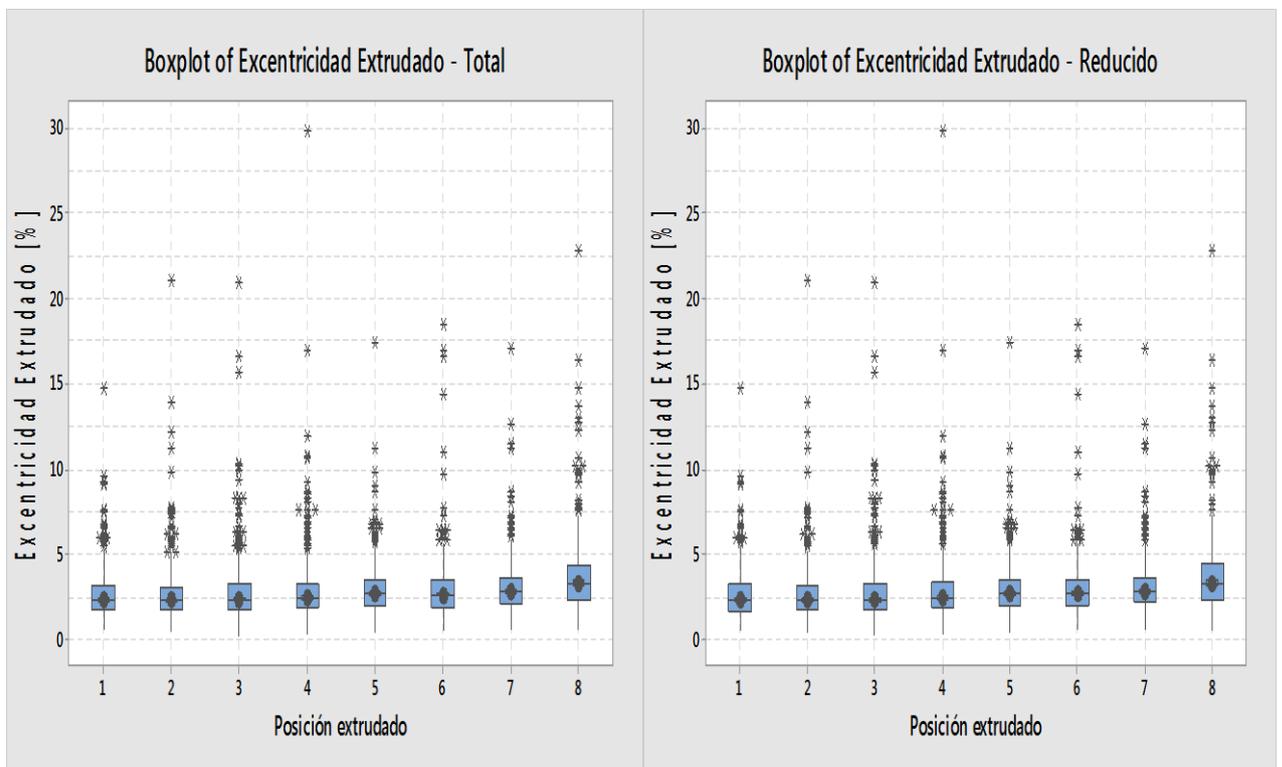


Figura 23 – Extrudado - Excentricidad - Diagrama Caja y Bigotes

1.10 Conclusiones Materia Prima

1.10.1 Generalidades

Para todas las variables, excepto para *Diámetro Promedio* y *Excentricidad* (ver 1.10.2.3 y 1.10.3.4), con un 95 % de nivel de confianza, no se encontró alguna de las siguientes distribuciones estadísticas que las represente:

- Normal
- Transformación Box-Cox
- Lognormal
- Lognormal de 3 parámetros
- Exponencial
- Exponencial de 2 parámetros
- Weibull
- Weibull de 3 parámetros
- Valor del extremo más pequeño (Smallest Extreme Value)
- Valor del extremo mayor (Largest Extreme Value)
- Gamma
- Gamma de 3 parámetros
- Logistic
- Log-logística
- Log logística de tres parámetros

Para cada variable se realizó un análisis de normalidad en cada una de las posiciones del tubo, empleando los métodos de Anderson-Darling, Ryan-Joiner y Kolmogorov-Smirnov y en ningún caso se puede concluir que los valores en alguna posición, para alguna de las variables de estudio puedan ser representados por una distribución gaussiana.

Teniendo en cuenta que las distribuciones no son gaussianas, se realizó un análisis de outliers empleando estadística robusta, dado que la misma posee, entre otras ventajas, la de ser independiente de las distribuciones de los datos [20][13]. Haciendo una analogía con la estadística convencional, el objetivo es detectar valores que se encuentren más allá de tres desvíos estándar de la media. La diferencia radica en que, al emplear estadística robusta, se reemplaza la media por la mediana y el desvío estándar por la Mediana de la Desviación Absoluta Alrededor de la Mediana (MAD); para hacer la MAD comparable a la desviación estándar se define la MAD normalizada (MADN) como:

$$MADN(x) = \frac{MAD(x)}{0.6745}$$

Resultando finalmente el indicador t robusto definido como:

$$t_i = \frac{x_i - \text{Mediana}}{MADN}$$

Para cada posición i [$i=1:8$], para cada tubo m [$m=1:430$], se calculó el t Robusto en 3 modos distintos (se presenta la variable *Diámetro Máximo* a modo de ejemplo):

a) Respecto de la mediana de la Posición Global:

- x_i es el valor de diámetro máximo del tubo m en la posición i
- *Mediana* corresponde a la mediana de todos los diámetros máximos de la posición i
- *MADN* corresponde la mediana de la desviación absoluta alrededor de la mediana normalizada de todos los diámetros máximos de la posición i

b) Respecto de la mediana del Tubo:

- x_i es el valor de diámetro máximo del tubo m en la posición i

- *Mediana* corresponde a la mediana de todos los diámetros máximos del tubo m
- *MADN* corresponde a la mediana de la desviación absoluta alrededor de la mediana normalizada de todos los diámetros máximos del tubo m

c) Respecto de la mediana global de todas las mediciones:

- x_i es el valor de diámetro máximo de cada tubo en la posición i
- *Mediana* corresponde a la mediana de todos los diámetros máximos de todas las mediciones de todos los tubos
- *MADN* corresponde a la mediana de la desviación absoluta alrededor de la mediana normalizada de todos los diámetros máximos de todas las posiciones de todos los tubos

Para cada posición, para cada tubo, para cada caso se puede visualizar la distribución de los indicadores t robusto, resultando similares a la indicada en la Figura 24.

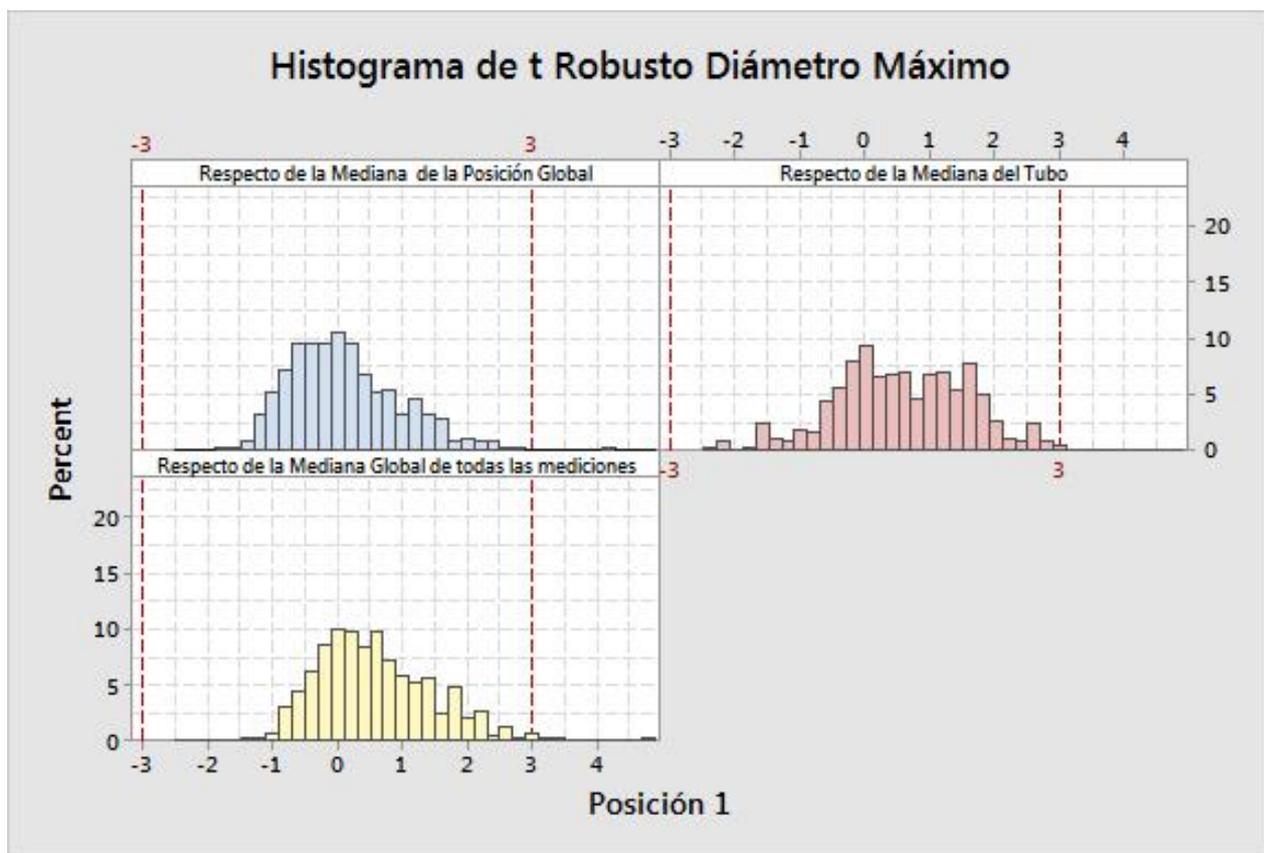


Figura 24 - Ejemplo de Histograma de t Robusto

Luego se realiza el análisis de los tubos cuyo valor absoluto del indicador t robusto es mayor a 3 y se los registra.

A partir de la estadística robusta, habiendo hecho un análisis general de las variables medidas y considerando que si un mismo tubo tiene 4 o más indicadores robustos de outlier, ese tubo se lo considera outlier. Del lote reducido se identificaron 16 tubos, correspondientes al 3% del total.

Para todas las variables, y relacionándolas con las distintas coladas, se realizó un análisis de igualdad de varianzas mediante el software Minitab®, donde se concluye que no se puede asumir que las varianzas sean independientes de las coladas, es decir que hay evidencia estadística que indica que las varianzas de todas las variables de estudio están relacionadas con las coladas de la materia prima (con un nivel de confianza del 95%), o dicho de otro modo, **las varianzas no son uniformes en relación con las coladas**. Si bien se ha demostrado que los

valores no siguen una distribución normal, el algoritmo empleado por Minitab® para calcular la igualdad de varianzas (expresado a partir del valor de “multiple comparisons” cuya hipótesis nula H_0 es la igualdad de varianzas) se comporta como un algoritmo robusto [4]. Asimismo está demostrado que el test de Levene es poco sensible a la desviación de la normalidad [11]

Para cada colada, teniendo en cuenta el test de Anderson Darling se verifica que:

- Ninguna variable describe una distribución gaussiana en la totalidad de los tubos de esa colada.
- No puede concluirse que alguna parte del tubo siempre siga una distribución gaussiana, excepto para la variable *Excentricidad* (ver 1.10.3.4).

Para cada billet, para cada variable de estudio se concluye que en ninguna posición los valores siempre sigan una distribución gaussiana; sí es más probable que en una posición específica sigan una distribución gaussiana en un billet que en una colada (compuesta de tres billets), excepto para la ovalidad y la excentricidad en donde no se encontró relación posible.

El hecho que una variable en una determinada posición en una colada específica siga una distribución gaussiana, no implica que lo hagan todos los billets, que con esa colada se generaron.

En cada tubo extrudado de manera individual, a partir de las mediciones en las 8 posiciones, empleando el test de Ryan-Joiner para evaluar normalidad se obtuvieron resultados similares a los indicados en la Figura 25.

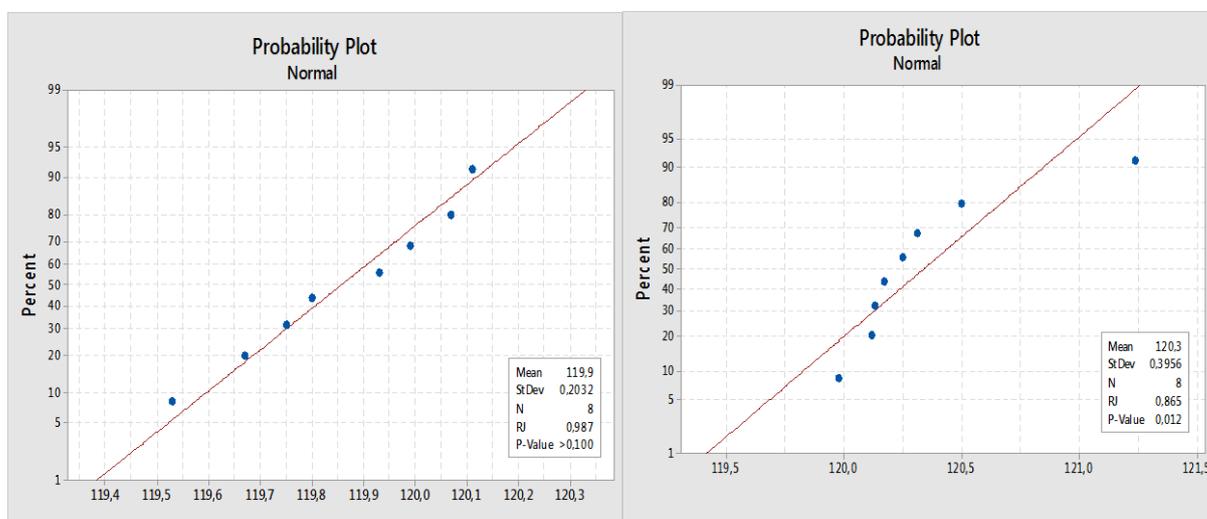


Figura 25 – Extrudado - Diámetro Máximo – Test de normalidad en tubos individuales

Con la precaución que debería considerarse por ser n (número de mediciones) chico, se verifica normalidad de valores en las siguientes proporciones:

- Diámetro Máximo: 70%
- Diámetro mínimo: 85%
- Espesor Máximo: 90%
- Espesor mínimo: 85%
- Diámetro Promedio: 85%
- Espesor Promedio: 90%
- Ovalidad: 85%
- Excentricidad: 92%

A continuación se presentan las particularidades de cada variable de estudio:

1.10.2 Diámetros

Comparando lo analizado en los apartados 1.2 y 1.3, se verifica que en la variable *Diámetro Máximo* opera un desplazamiento del histograma de mediciones hacia valores menores al valor medio de una hipotética distribución normal; en *Diámetro mínimo* ocurre lo contrario, desplazándose hacia valores mayores. Lo antedicho se verifica en la Figura 8 y en la Figura 10 observando el cálculo de la asimetría (“Skewness”), resultando positiva en un caso y negativa en el otro.

El diámetro máximo disminuye hacia el final del tubo, el diámetro mínimo se incrementa hacia el final del tubo, en ambos casos con menor dispersión.

En las variables correspondientes a los diámetros se repite el hecho que la correlación entre las distintas posiciones es fuerte al principio y se debilita al final; éste hecho se puede ver en las matrices del apartado 1.1. Esto ocurre solo entre las posiciones espaciales de una misma variable (por ejemplo, la variable correspondiente a la posición espacial 2 del diámetro máximo está correlacionada con la correspondiente a la posición espacial 3 del diámetro máximo con un coeficiente de 0.80), no habiendo correlación fuerte entre las posiciones espaciales de distintas variables (por ejemplo, no se considera que haya correlación fuerte entre el diámetro máximo y el mínimo en la posición espacial 1, ya que el coeficiente de correlación resulta -0.38).

1.10.2.1 Diámetro Máximo

En una colada específica, es probable que el diámetro máximo del primer octavo del tubo siga una distribución gaussiana (69%), siendo la posición central la menos probable (7%).

Se verifica de manera regular la tendencia a disminuir el valor de diámetro máximo y su dispersión desde el frente hacia el final del tubo. Esto se verificó al realizar los cálculos de estadística robusta: la menor mediana y MADN ocurren al final del tubo.

1.10.2.2 Diámetro mínimo

Se verifica de manera regular la tendencia a incrementar el valor de la mediana del diámetro y disminuir su dispersión desde el frente hacia el final del tubo. Esto mismo se comprobó al realizar los cálculos de estadística robusta: hacia el final del tubo se encuentra la mayor mediana y la menor MADN.

El histograma presentado en la Figura 10 y el comportamiento de las primeras tres posiciones indicado en la Figura 11 podrían sugerir la existencia de dos grupos de datos. Para verificarlo, se analizaron los datos de las tres primeras posiciones de forma independiente al resto de las posiciones, y de los nuevos histogramas (tanto de los datos de las primeras tres posiciones, como de los datos de las posiciones restantes) se concluye la ausencia de dos poblaciones diferenciables entre sí.

1.10.2.3 Diámetro Promedio

Existe una transformación de Johnson que, con un 95% de nivel de confianza, describe la variable (tanto para el lote total como para el reducido), en la Figura 26 a modo de ejemplo se grafica el caso del lote total, donde la transformación hallada es:

$$y = -0.56472 + 1.74601 \operatorname{Asinh} \left(\frac{\emptyset_{\text{Promedio}} - 119.611}{0.33713} \right)$$

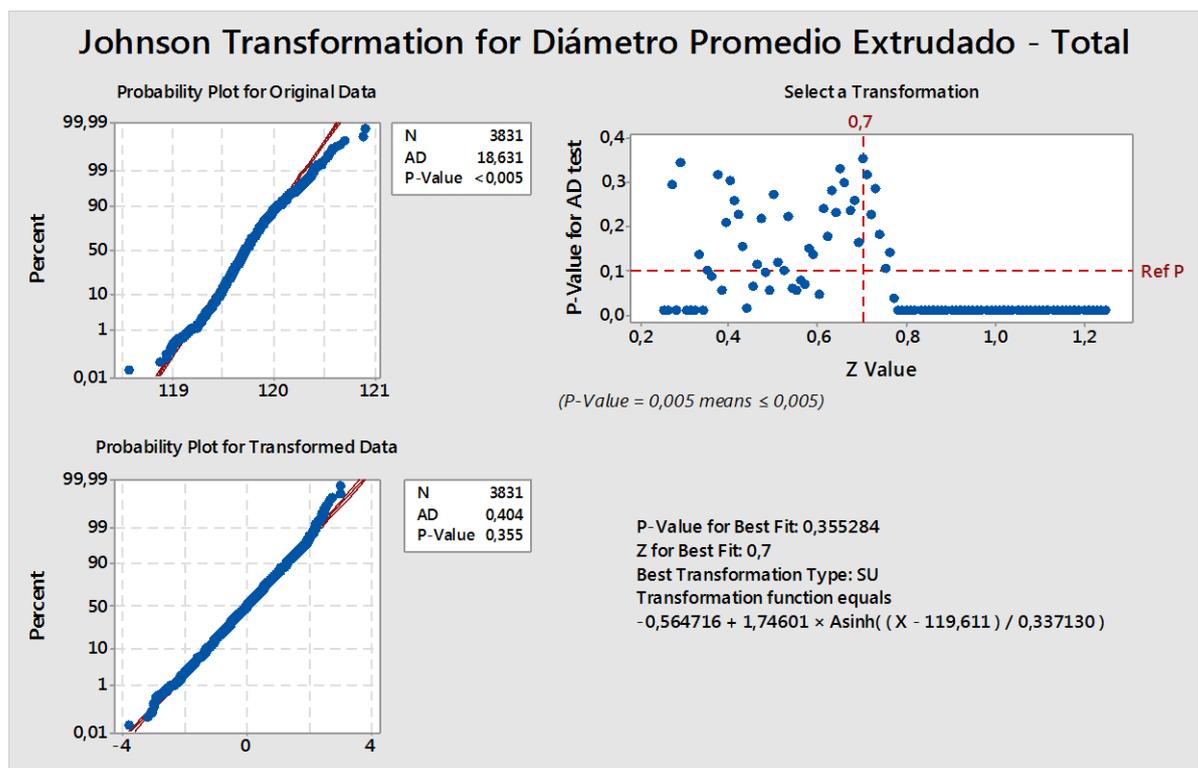


Figura 26 – Extrudado - Diámetro Promedio - Transformada de Johnson

A partir de la distribución de los diámetros máximos (Figura 8) y mínimos (Figura 10) se puede ver cómo, al combinarse estas variables matemáticamente, resultan los diámetros promedio. Un cálculo para verificar esto es el valor de asimetría (más próximo a 0 que en las variables medidas).

También puede apreciarse el efecto en las distintas posiciones del tubo: el diámetro máximo tiende a reducirse hacia el final del tubo, mientras que el mínimo tiende a crecer, la combinación de estos dos efectos produce la tendencia casi uniforme que se observa en la Figura 17, operando asimismo una disminución en la dispersión de los valores medidos hacia el final del tubo.

1.10.2.4 Ovalidad

Como resulta evidente a partir de la fórmula utilizada, la máxima varianza se produce en la colada que presenta la mayor varianza en diámetro máximo y mínimo.

Por último puede apreciarse el siguiente efecto en las distintas posiciones del tubo: el diámetro máximo tiende a reducirse hacia el final del tubo, el diámetro mínimo tiende a crecer, y en concordancia, la ovalidad, que combina estas variables, posee también una tendencia decreciente, la cual se observa en la Figura 21.

1.10.3 Espesores

Al realizar el análisis espacial, tanto el espesor máximo como el mínimo, siempre decrecen hacia el final del tubo.

Analizando las variables de espesor en las distintas posiciones espaciales, de acuerdo a los valores indicados en el apartado 1.1, la mayor correlación entre las variables espaciales correspondientes a espesores ocurre en torno a las posiciones centrales del tubo y disminuye a medida que se alejan de las mismas. Esto ocurre solo entre las posiciones espaciales de una

misma variable (por ejemplo, la variable correspondiente a la posición espacial 1 del espesor mínimo está correlacionada con la correspondiente a la posición espacial 2 del espesor mínimo con un coeficiente de 0.84), no habiendo correlación fuerte entre las posiciones espaciales de distintas variables (por ejemplo, no se considera que haya correlación fuerte entre el espesor mínimo en la posición espacial 1 y el espesor máximo en la posición espacial 1, ya que el coeficiente de correlación resulta 0.69).

1.10.3.1 Espesor Máximo

En la Figura 13 se verifica de manera regular la tendencia a disminuir el valor de espesor máximo desde el frente hacia el final del tubo, creciendo la dispersión levemente en el mismo sentido. Esto se verifica con estadística robusta observando el valor de la mediana y la MADN.

1.10.3.2 Espesor mínimo

En la Figura 15 se verifica de manera regular la tendencia a disminuir el valor de espesor mínimo desde el frente hacia el final del tubo, manteniéndose la dispersión aproximadamente constante a lo largo del tubo. Esto se verifica con estadística robusta observando el valor de la mediana y la MADN.

1.10.3.3 Espesor Promedio

La máxima varianza que se produce en una determinada colada en las variables de diámetro no manifiesta un correlato en las variables de espesores.

Por último puede apreciarse las tendencias en las distintas posiciones del tubo: tanto el espesor máximo (Figura 13) como el mínimo (Figura 15) tienden a reducirse hacia el final del tubo, tendencia que también ocurre con la variable *Espesor Promedio* (Figura 19). Las mayores dispersiones se producen hacia el final del tubo.

1.10.3.4 Excentricidad

Tanto para el lote total como para el reducido la distribución Log-logística, y la versión de tres parámetros resultaron significativas para representar la distribución de esta variable: Para el lote reducido se obtuvo $p > 0.250$ (en la Figura 27 se presenta el análisis gráfico)

Goodness of Fit Test

Distribution	AD	P	LRT P
Loglogistic	0,311	>0,250	
3-Parameter Loglogistic	0,298	*	0,619

ML Estimates of Distribution Parameters

Distribution	Location	Shape	Scale	Threshold
Loglogistic	0,92964		0,28321	
3-Parameter Loglogistic	0,91816		0,28668	0,02745

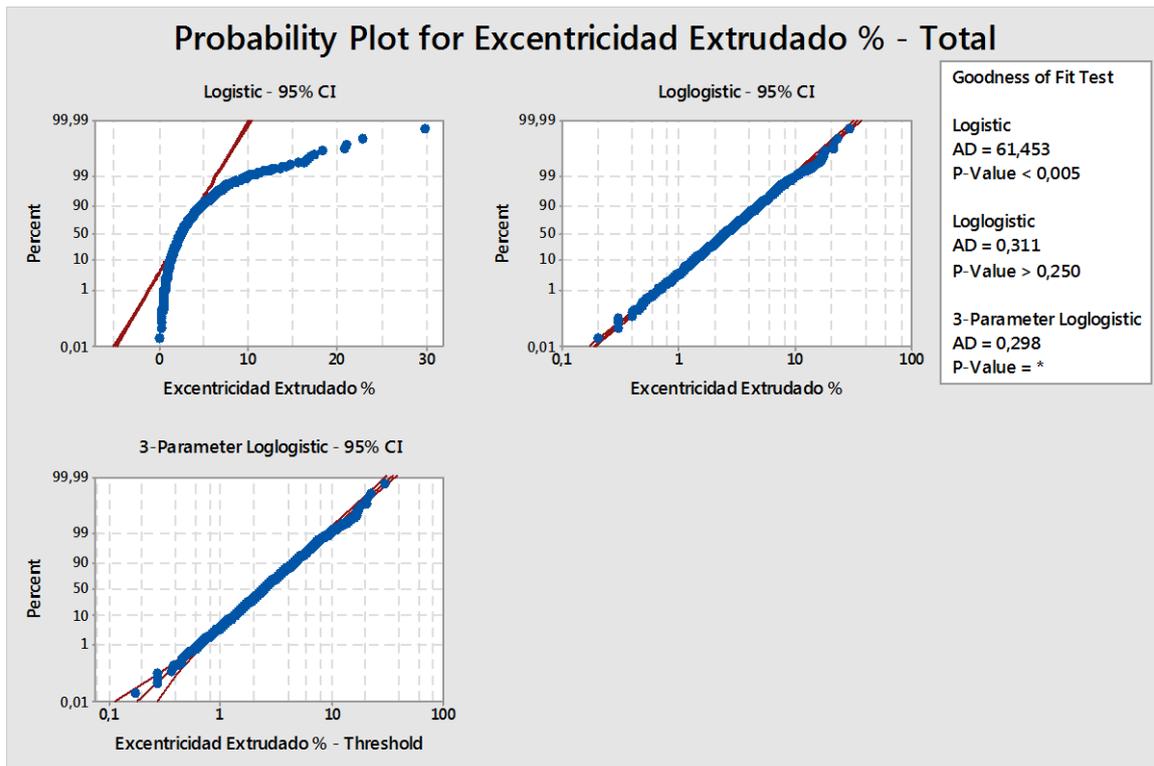


Figura 27 - Extrudado - Excentricidad – Distribución de Probabilidad

Si bien no tiene mayor relevancia, tanto en el lote total como en el reducido, se verificó que en la posición 4 la transformada de Johnson describe el comportamiento de la variable: ejemplo para el lote total:

Goodness of Fit Test

Distribution	AD	P
Johnson Transformation	0,580	0,131

Johnson transformation function:

$$-0,790905 + 0,980743 \times \text{Asinh} \left(\frac{X - 1,75809}{0,718121} \right)$$

La máxima varianza en la excentricidad no tiene un correlato directo con la varianza en espesores máximo y mínimo.

Separando los tubos por coladas, en cada una de ellas en la posición 6 no hay elementos para descartar un comportamiento gaussiano de la variable *Excentricidad*.

Por último es conveniente resumir las tendencias en las distintas posiciones del tubo: Si bien los espesores máximos y mínimos tienden a reducirse hacia el final del tubo, la excentricidad presenta un comportamiento estable, a excepción de la última posición, la cual posee mayores valores y dispersión en relación a las otras posiciones (Figura 23).

2 Tubo Laminado L1

2.1 Generalidades

A lo largo de más de dos años se produjo la laminación del lote bajo estudio. En este período se sucedieron períodos estables, donde no se modificó la configuración de la máquina (guías y mandril) y períodos donde se fueron modificando las condiciones de laminación a pedido del cliente y también por efecto del herramental empleado. Estos cambios pueden apreciarse en la Figura 28, en donde se grafican las variables medidas en función del tiempo.

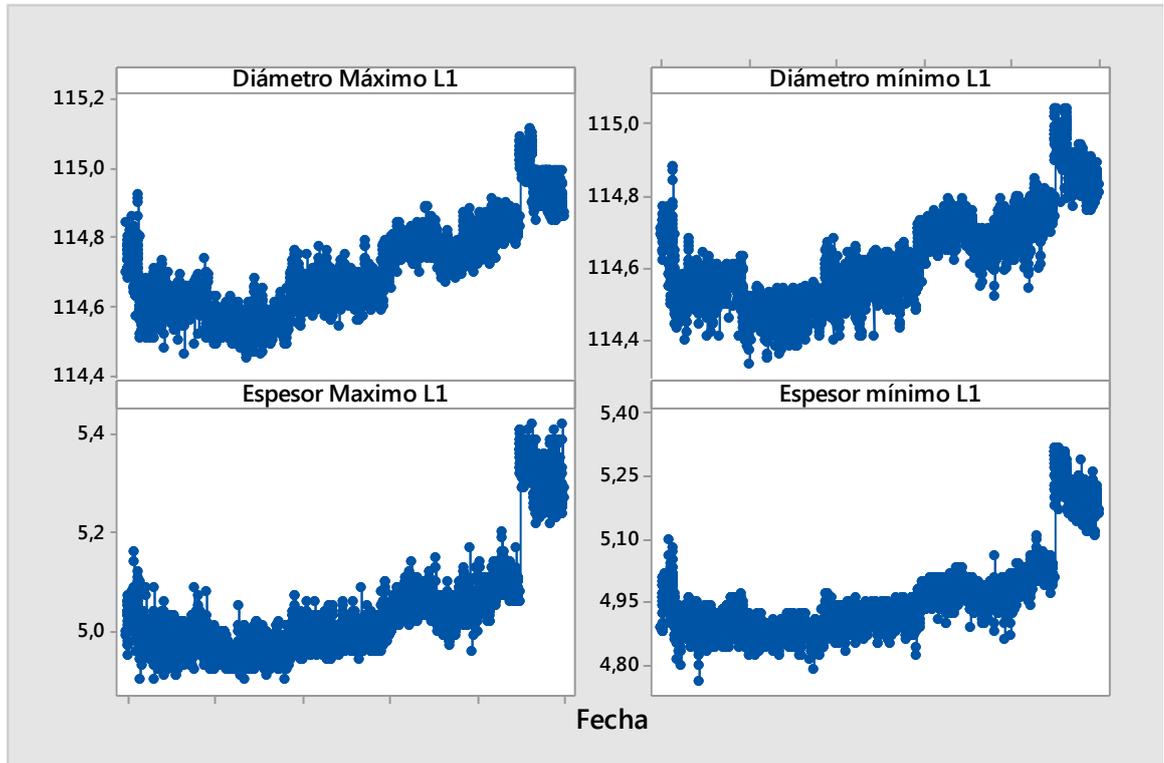


Figura 28 - Laminado - Variables medidas en función del tiempo

Teniendo en cuenta lo anterior, en la Figura 29 se grafica la variable *Diámetro Máximo* donde se aprecian tres secciones de relativa estabilidad. Analizando los registros de producción, estos períodos coinciden con configuraciones de la herramienta en los cuales no se cambió las condiciones de laminación (mismo herramental y mismos requisitos del cliente). Estas tres secciones se estudiarán de manera independiente a fin de obtener conclusiones de los períodos de funcionamiento estable.

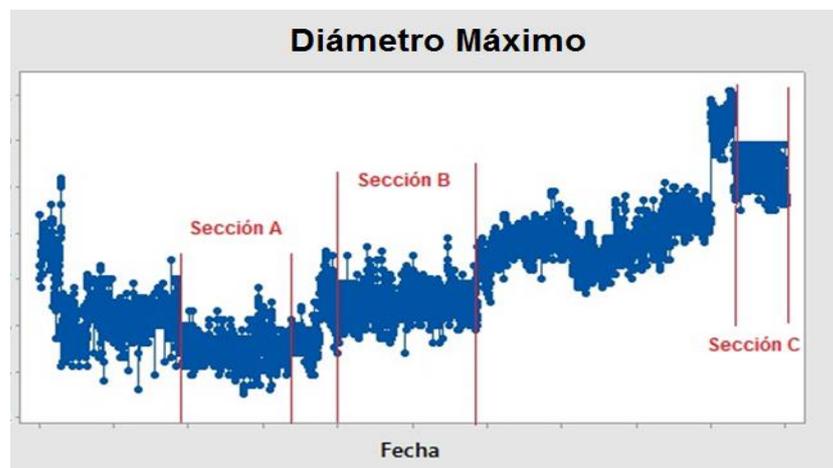


Figura 29 - Laminado - Secciones de estudio

En la Figura 30 se presenta un análisis de las variables bajo estudio, donde se aprecia su similitud y en el cual los valores obtenidos permiten diferenciar las variables del proceso (diámetros y espesores afines entre sí).

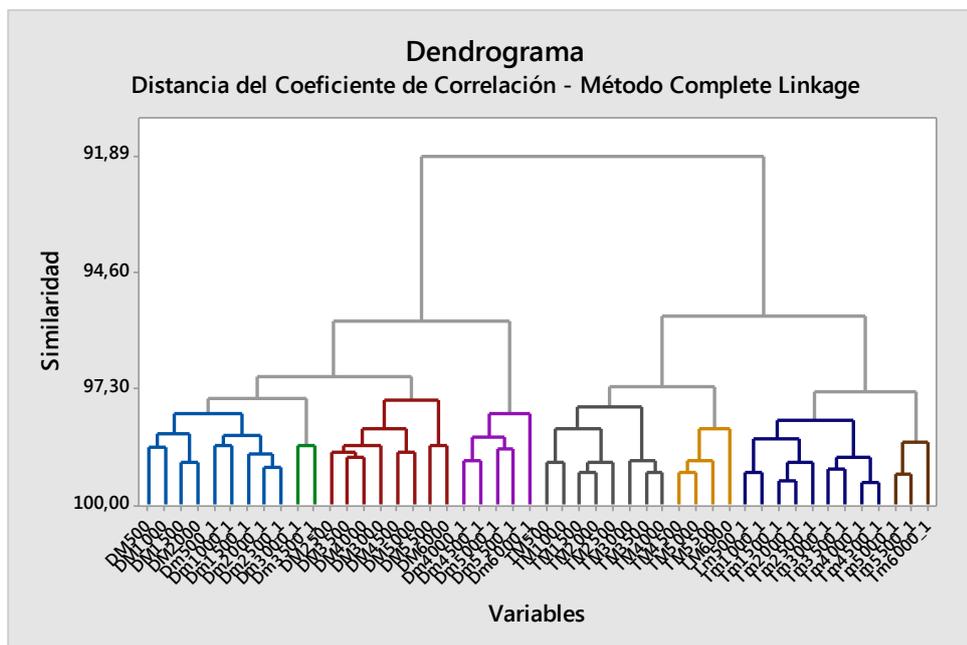


Figura 30 – Laminado - Dendrograma de las variables medidas

Estas afinidades pueden apreciarse también en un estudio de correlación entre las variables, donde se aprecia una fuerte correlación entre todas ellas (en el capítulo 1 se consideró como fuerte un valor de correlación mayor a 0.75). Se calcularon las correlaciones por el método de Spearman dado que, como se demostrará *a posteriori*, muchas variables no poseen un comportamiento gaussiano.

Spearman Rho:

Variables	DM500	DM1000	DM1500	DM2000	DM2500	DM3000	DM3500	DM4000
DM1000	0,964							
DM1500	0,957	0,967						
DM2000	0,953	0,957	0,971					
DM2500	0,951	0,959	0,961	0,966				
DM3000	0,936	0,949	0,942	0,942	0,959			
DM3500	0,944	0,950	0,949	0,954	0,963	0,961		
DM4000	0,937	0,946	0,946	0,952	0,961	0,955	0,969	
DM4500	0,934	0,944	0,945	0,943	0,955	0,949	0,957	0,963
DM5000	0,934	0,939	0,938	0,938	0,945	0,942	0,952	0,958
DM5500	0,923	0,936	0,935	0,930	0,938	0,934	0,939	0,948
DM6000	0,923	0,938	0,938	0,930	0,930	0,928	0,935	0,940
Dm500	0,952	0,949	0,944	0,940	0,942	0,925	0,927	0,931
Dm1000	0,951	0,960	0,944	0,940	0,944	0,934	0,930	0,933
Dm1500	0,940	0,944	0,945	0,940	0,942	0,925	0,929	0,935
Dm2000	0,947	0,944	0,945	0,953	0,949	0,932	0,937	0,941
Dm2500	0,938	0,942	0,943	0,944	0,947	0,924	0,935	0,939
Dm3000	0,933	0,935	0,934	0,927	0,931	0,949	0,927	0,934
Dm3500	0,929	0,936	0,930	0,936	0,936	0,928	0,934	0,933
Dm4000	0,929	0,928	0,930	0,931	0,933	0,929	0,932	0,931
Dm4500	0,925	0,926	0,930	0,930	0,934	0,924	0,928	0,929
Dm5000	0,933	0,929	0,928	0,932	0,935	0,929	0,931	0,933
Dm5500	0,916	0,922	0,914	0,923	0,926	0,920	0,923	0,926
Dm6000	0,910	0,918	0,917	0,919	0,921	0,920	0,920	0,922
Tm500	0,893	0,888	0,874	0,875	0,873	0,872	0,871	0,868
Tm1000	0,896	0,898	0,890	0,887	0,883	0,883	0,876	0,877
Tm1500	0,900	0,899	0,906	0,900	0,895	0,889	0,885	0,886
Tm2000	0,906	0,900	0,899	0,907	0,903	0,895	0,891	0,893
Tm2500	0,914	0,909	0,907	0,913	0,913	0,905	0,904	0,907
Tm3000	0,894	0,893	0,891	0,891	0,895	0,918	0,903	0,896
Tm3500	0,904	0,899	0,901	0,905	0,903	0,899	0,915	0,904
Tm4000	0,911	0,905	0,900	0,904	0,903	0,904	0,915	0,905
Tm4500	0,901	0,905	0,901	0,906	0,900	0,904	0,916	0,906
Tm5000	0,897	0,893	0,896	0,901	0,897	0,896	0,912	0,900
Tm5500	0,885	0,892	0,896	0,895	0,898	0,892	0,904	0,903
Tm6000	0,842	0,854	0,860	0,854	0,861	0,863	0,872	0,872
Tm500	0,917	0,914	0,911	0,910	0,901	0,888	0,905	0,905
Tm1000	0,915	0,921	0,914	0,910	0,907	0,898	0,912	0,914
Tm1500	0,908	0,912	0,917	0,913	0,901	0,889	0,906	0,908
Tm2000	0,902	0,899	0,903	0,909	0,900	0,885	0,900	0,900
Tm2500	0,885	0,883	0,889	0,888	0,896	0,879	0,891	0,895
Tm3000	0,878	0,876	0,879	0,873	0,886	0,896	0,884	0,892
Tm3500	0,877	0,881	0,878	0,873	0,890	0,879	0,888	0,893
Tm4000	0,876	0,878	0,878	0,876	0,889	0,887	0,890	0,896
Tm4500	0,886	0,891	0,892	0,890	0,901	0,895	0,897	0,907
Tm5000	0,896	0,899	0,889	0,893	0,898	0,893	0,893	0,902
Tm5500	0,907	0,913	0,903	0,909	0,911	0,905	0,903	0,902
Tm6000	0,887	0,891	0,880	0,882	0,883	0,880	0,880	0,882

Análisis cuantitativo de un proceso de laminación en frío de tubos de aleación de Circonio

Instituto de Calidad Industrial – Maestría en Calidad Industrial

Variables	DM4500	DM5000	DM5500	DM6000	Dm500	Dm1000	Dm1500	Dm2000
DM5000	0,962							
DM5500	0,957	0,962						
DM6000	0,948	0,954	0,961					
Dm500	0,932	0,924	0,919	0,919				
Dm1000	0,940	0,930	0,921	0,932	0,965			
Dm1500	0,928	0,928	0,918	0,923	0,958	0,962		
Dm2000	0,943	0,938	0,928	0,926	0,958	0,960	0,967	
Dm2500	0,942	0,931	0,927	0,927	0,951	0,953	0,958	0,972
Dm3000	0,932	0,925	0,916	0,912	0,938	0,943	0,944	0,950
Dm3500	0,927	0,926	0,916	0,917	0,932	0,939	0,938	0,951
Dm4000	0,927	0,925	0,913	0,916	0,934	0,938	0,942	0,951
Dm4500	0,928	0,913	0,905	0,906	0,929	0,934	0,931	0,944
Dm5000	0,924	0,911	0,907	0,904	0,929	0,929	0,926	0,941
Dm5500	0,915	0,902	0,896	0,894	0,915	0,922	0,914	0,930
Dm6000	0,916	0,905	0,897	0,889	0,910	0,916	0,914	0,914
TM500	0,874	0,871	0,871	0,864	0,881	0,881	0,866	0,871
TM1000	0,889	0,878	0,879	0,879	0,891	0,899	0,884	0,879
TM1500	0,893	0,887	0,884	0,879	0,888	0,891	0,893	0,884
TM2000	0,892	0,889	0,884	0,882	0,893	0,901	0,895	0,897
TM2500	0,909	0,904	0,888	0,895	0,906	0,918	0,904	0,908
TM3000	0,894	0,892	0,880	0,877	0,888	0,898	0,880	0,893
TM3500	0,904	0,896	0,881	0,887	0,890	0,898	0,882	0,900
TM4000	0,903	0,895	0,878	0,881	0,894	0,901	0,884	0,897
TM4500	0,907	0,897	0,881	0,888	0,889	0,900	0,889	0,901
TM5000	0,901	0,889	0,884	0,882	0,881	0,887	0,882	0,900
TM5500	0,901	0,889	0,890	0,889	0,884	0,889	0,894	0,900
TM6000	0,873	0,858	0,868	0,867	0,857	0,855	0,857	0,860
Tm500	0,892	0,883	0,874	0,881	0,921	0,913	0,910	0,917
Tm1000	0,902	0,891	0,887	0,897	0,915	0,917	0,909	0,915
Tm1500	0,892	0,885	0,885	0,891	0,910	0,908	0,917	0,917
Tm2000	0,892	0,886	0,884	0,884	0,902	0,894	0,901	0,914
Tm2500	0,894	0,880	0,878	0,874	0,892	0,881	0,891	0,905
Tm3000	0,885	0,877	0,878	0,872	0,884	0,872	0,881	0,890
Tm3500	0,888	0,879	0,884	0,872	0,884	0,875	0,883	0,890
Tm4000	0,886	0,890	0,891	0,878	0,883	0,875	0,883	0,892
Tm4500	0,899	0,898	0,900	0,885	0,896	0,887	0,895	0,900
Tm5000	0,898	0,899	0,898	0,889	0,898	0,894	0,890	0,901
Tm5500	0,905	0,900	0,896	0,890	0,902	0,903	0,898	0,910
Tm6000	0,876	0,873	0,862	0,870	0,873	0,883	0,879	0,880

Variables	Dm2500	Dm3000	Dm3500	Dm4000	Dm4500	Dm5000	Dm5500	Dm6000
Dm3000	0,949							
Dm3500	0,958	0,952						
Dm4000	0,952	0,955	0,967					
Dm4500	0,946	0,946	0,957	0,972				
Dm5000	0,939	0,939	0,951	0,959	0,971			
Dm5500	0,934	0,930	0,947	0,955	0,962	0,967		
Dm6000	0,924	0,924	0,938	0,945	0,950	0,951	0,959	
TM500	0,865	0,851	0,847	0,840	0,833	0,838	0,828	0,817
TM1000	0,875	0,869	0,858	0,854	0,849	0,852	0,841	0,839
TM1500	0,884	0,871	0,863	0,855	0,851	0,856	0,841	0,842
TM2000	0,891	0,879	0,878	0,870	0,865	0,874	0,862	0,853
TM2500	0,909	0,895	0,893	0,886	0,884	0,887	0,879	0,867
TM3000	0,887	0,911	0,884	0,879	0,880	0,882	0,870	0,862
TM3500	0,896	0,891	0,900	0,896	0,897	0,900	0,889	0,877
TM4000	0,896	0,893	0,896	0,897	0,897	0,898	0,894	0,879
TM4500	0,895	0,899	0,892	0,897	0,903	0,900	0,891	0,880
TM5000	0,888	0,886	0,894	0,890	0,896	0,890	0,892	0,872
TM5500	0,889	0,884	0,890	0,891	0,893	0,883	0,884	0,874
TM6000	0,852	0,845	0,851	0,847	0,850	0,851	0,852	0,847
Tm500	0,906	0,891	0,889	0,897	0,898	0,902	0,898	0,882
Tm1000	0,913	0,899	0,900	0,903	0,902	0,904	0,900	0,895
Tm1500	0,916	0,898	0,902	0,905	0,905	0,906	0,902	0,895
Tm2000	0,912	0,892	0,903	0,901	0,900	0,898	0,901	0,885
Tm2500	0,912	0,890	0,892	0,891	0,894	0,887	0,890	0,869
Tm3000	0,889	0,902	0,884	0,884	0,884	0,882	0,879	0,864
Tm3500	0,899	0,874	0,890	0,882	0,881	0,876	0,882	0,865
Tm4000	0,893	0,876	0,884	0,884	0,878	0,876	0,880	0,862
Tm4500	0,899	0,886	0,890	0,888	0,882	0,884	0,886	0,876
Tm5000	0,898	0,884	0,890	0,890	0,882	0,893	0,892	0,875
Tm5500	0,908	0,902	0,895	0,894	0,893	0,898	0,899	0,883
Tm6000	0,883	0,879	0,878	0,882	0,879	0,883	0,886	0,875

Variables	TM500	TM1000	TM1500	TM2000	TM2500	TM3000	TM3500	TM4000
TM1000	0,943							
TM1500	0,916	0,946						
TM2000	0,904	0,926	0,957					
TM2500	0,881	0,909	0,934	0,959				
TM3000	0,860	0,881	0,897	0,925	0,947			
TM3500	0,850	0,866	0,873	0,907	0,929	0,948		
TM4000	0,856	0,870	0,876	0,903	0,930	0,944	0,968	
TM4500	0,839	0,854	0,862	0,881	0,914	0,926	0,950	0,963
TM5000	0,841	0,848	0,859	0,881	0,902	0,907	0,929	0,947
TM5500	0,835	0,845	0,849	0,858	0,878	0,873	0,887	0,908
TM6000	0,827	0,831	0,837	0,842	0,851	0,838	0,847	0,860
Tm500	0,814	0,825	0,844	0,865	0,882	0,866	0,886	0,895
Tm1000	0,807	0,826	0,829	0,851	0,869	0,862	0,874	0,888
Tm1500	0,810	0,819	0,824	0,830	0,849	0,840	0,862	0,879
Tm2000	0,819	0,819	0,820	0,822	0,831	0,821	0,840	0,861
Tm2500	0,828	0,823	0,825	0,811	0,827	0,809	0,822	0,846
Tm3000	0,825	0,825	0,827	0,815	0,809	0,816	0,802	0,823
Tm3500	0,834	0,832	0,835	0,825	0,813	0,796	0,799	0,811
Tm4000	0,828	0,827	0,840	0,831	0,828	0,810	0,798	0,803
Tm4500	0,848	0,850	0,857	0,853	0,848	0,827	0,813	0,815
Tm5000	0,841	0,849	0,855	0,862	0,866	0,841	0,837	0,833
Tm5500	0,848	0,863	0,868	0,873	0,885	0,870	0,860	0,856
Tm6000	0,823	0,849	0,848	0,849	0,862	0,847	0,852	0,843

Variables	Tm4500	Tm5000	Tm5500	Tm6000	Tm500	Tm1000	Tm1500	Tm2000
TM5000	0,954							
TM5500	0,930	0,951						
TM6000	0,882	0,914	0,941					
Tm500	0,894	0,890	0,883	0,850				
Tm1000	0,892	0,884	0,883	0,853	0,959			
Tm1500	0,885	0,886	0,896	0,862	0,946	0,963		
Tm2000	0,868	0,882	0,894	0,863	0,924	0,940	0,967	
Tm2500	0,855	0,871	0,887	0,861	0,895	0,912	0,936	0,959
Tm3000	0,836	0,847	0,867	0,842	0,875	0,890	0,902	0,930
Tm3500	0,822	0,837	0,862	0,847	0,871	0,886	0,901	0,926
Tm4000	0,814	0,832	0,859	0,843	0,868	0,878	0,886	0,905
Tm4500	0,809	0,822	0,833	0,824	0,873	0,878	0,881	0,894
Tm5000	0,823	0,821	0,815	0,798	0,883	0,887	0,883	0,881
Tm5500	0,841	0,835	0,815	0,784	0,888	0,889	0,880	0,876
Tm6000	0,828	0,807	0,785	0,736	0,876	0,877	0,866	0,854
Variables	Tm2500	Tm3000	Tm3500	Tm4000	Tm4500	Tm5000	Tm5500	
Tm3000	0,946							
Tm3500	0,942	0,953						
Tm4000	0,923	0,942	0,961					
Tm4500	0,908	0,925	0,943	0,959				
Tm5000	0,890	0,895	0,919	0,931	0,960			
Tm5500	0,876	0,877	0,887	0,894	0,932	0,958		
Tm6000	0,841	0,844	0,844	0,848	0,885	0,913	0,942	

Cell Contents: Spearman rho; DM: Diámetro Máximo; Dm: Diámetro mínimo; TM Espesor Máximo; Tm espesor mínimo luego posición en el tubo

En la Figura 31 se presenta un análisis por componentes principales, donde quedan perfectamente diferenciadas las variables correspondientes a diámetros y espesores y la afinidad entre ellas.

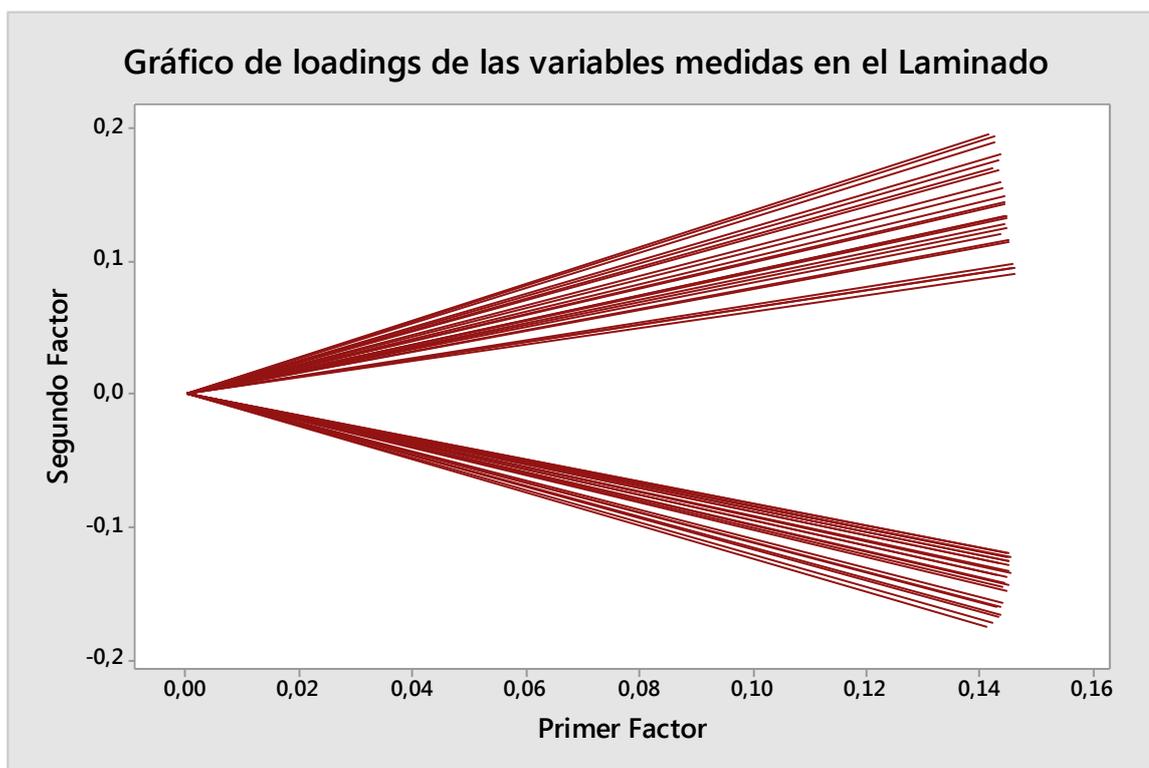


Figura 31 - Laminado – Loadings de las variables medidas

En la mitad superior cada línea corresponde a cada una de las variables medidas de espesores (*Espesor Máximo* en la posición 500, 1000, etc. y *Espesor mínimo* en la posición 500, 1000, etc. en total 24 variables), en la mitad inferior, cada línea corresponde a cada una de las variables medidas de los diámetros (*Diámetro Máximo* en la posición 500, 1000, etc. y *Diámetro mínimo* en la posición 500, 1000, etc. en total 24 variables).

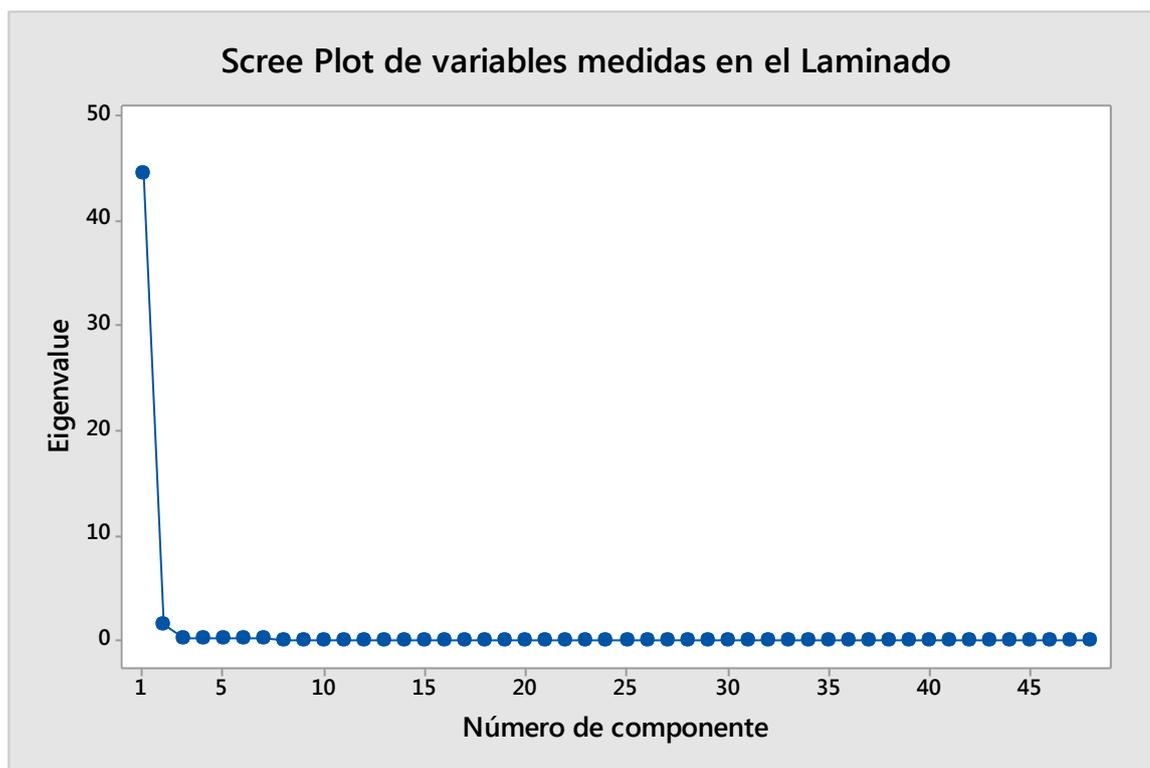


Figura 32 - Laminado - Scree Plot de autovalores

A partir del análisis de los autovalores se puede concluir que, haciendo un análisis de componentes principales, los primeros 4 autovectores explican el 97% de la varianza.

Eigenvalue	44,577	1,517	0,284	0,210	0,178	0,122	0,100	0,091	0,067	0,055	0,051
Proportion	0,929	0,032	0,006	0,004	0,004	0,003	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001
Cumulative	0,929	0,960	0,966	0,971	0,974	0,977	0,979	0,981	0,982	0,983	0,984

El gráfico de la Figura 32 resume los valores anteriores de autovalores (eigenvalue) y permite relacionarlos entre sí.

En este caso, al igual que para el tubo extrudado, existen coincidencias en los resultados obtenidos por las técnicas de análisis por componentes principales y dendograma; ambas permiten clasificar las variables de estudio. A diferencia del tubo extrudado en este caso, a partir de análisis por componentes principales se observa que el segundo factor permite discriminar las variables correspondientes a los espesores entre sí y éstas de las variables correspondientes a los diámetros.

En los siguientes apartados, para las variables bajo estudio, se presenta un resumen gráfico de los valores obtenidos para cada sección. Para cada posición medida en el tubo se presenta un gráfico de caja y bigotes, indicando en el centro de la caja la mediana de esa posición y su intervalo de confianza.

En cada posición de medición se analizó la correspondencia de los valores medidos con una distribución gaussiana, obteniendo siempre resultados de la forma presentada en la Figura 33.

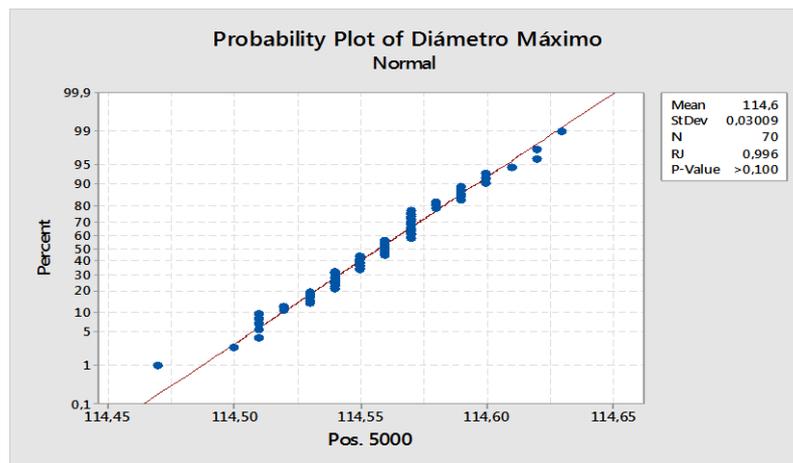


Figura 33 - Laminado - Análisis de normalidad por posición

De acuerdo a la bibliografía, este tipo de respuesta es característica de redondeo de decimales [10] o de baja resolución del instrumento de medición. Para este caso particular resulta adecuado emplear el test de Ryan-Joiner. Los resultados obtenidos para cada variable se presentan en las distintas tablas de los siguientes apartados (2.2 a 2.9, Tabla 1 a Tabla 8).

En relación con lo antedicho, para las variables medidas en el tubo laminado y teniendo en cuenta las incertidumbres de las mediciones [8], todas las mediciones expresadas en milímetros poseen dos cifras decimales verdaderas (centésima de milímetro), siendo el resto inciertas, presentándose en este trabajo únicamente a fines informativos.

Dado que, como se concluirá *a posteriori*, no todos los valores medidos permiten asumir un comportamiento gaussiano de variables correspondientes, para cada variable bajo estudio, para cada sección, se presentan en las distintas tablas los cálculos de las dispersiones de las variables de estudio teniendo en cuenta la estadística robusta, informando la Mediana de la Desviación Absoluta Alrededor de la Mediana normalizada (MADN), tanto en valor absoluto, como en valor relativo a la mediana correspondiente, calculada como

$$MADN_{\%} = 100 \left(\frac{MADN}{Mediana} \right)$$

Teniendo en cuenta la ausencia de comportamiento gaussiano de las variables, para cada sección, para cada variable medida se realizó un estudio de outliers (similar al realizado con el tubo extrudado en el apartado 1.10.1) a fin de poder individualizar aquellos tubos cuyos valores no se corresponden con los del resto de la población.

De modo similar a lo realizado para la materia prima, para todas las variables, y relacionándolas con los distintos billets, se realizó un análisis de igualdad de varianzas mediante el software Minitab®, cuyos resultados se resumen en las tablas correspondientes.

Se incluyen también los resultados surgidos de la aplicación del test de Kruskal-Wallis (debido a la falta de comportamiento gaussiano de todas las variables) para analizar la independencia de la mediana de la variable bajo estudio con respecto al día de laminación.

Se analizó en cada uno de los tubos laminados la correspondencia de los valores medidos (para cada variable) con una distribución gaussiana. En las citadas tablas se indica en qué porcentaje de los tubos de cada sección no puede descartarse individualmente una distribución gaussiana.

2.2 Diámetro Máximo

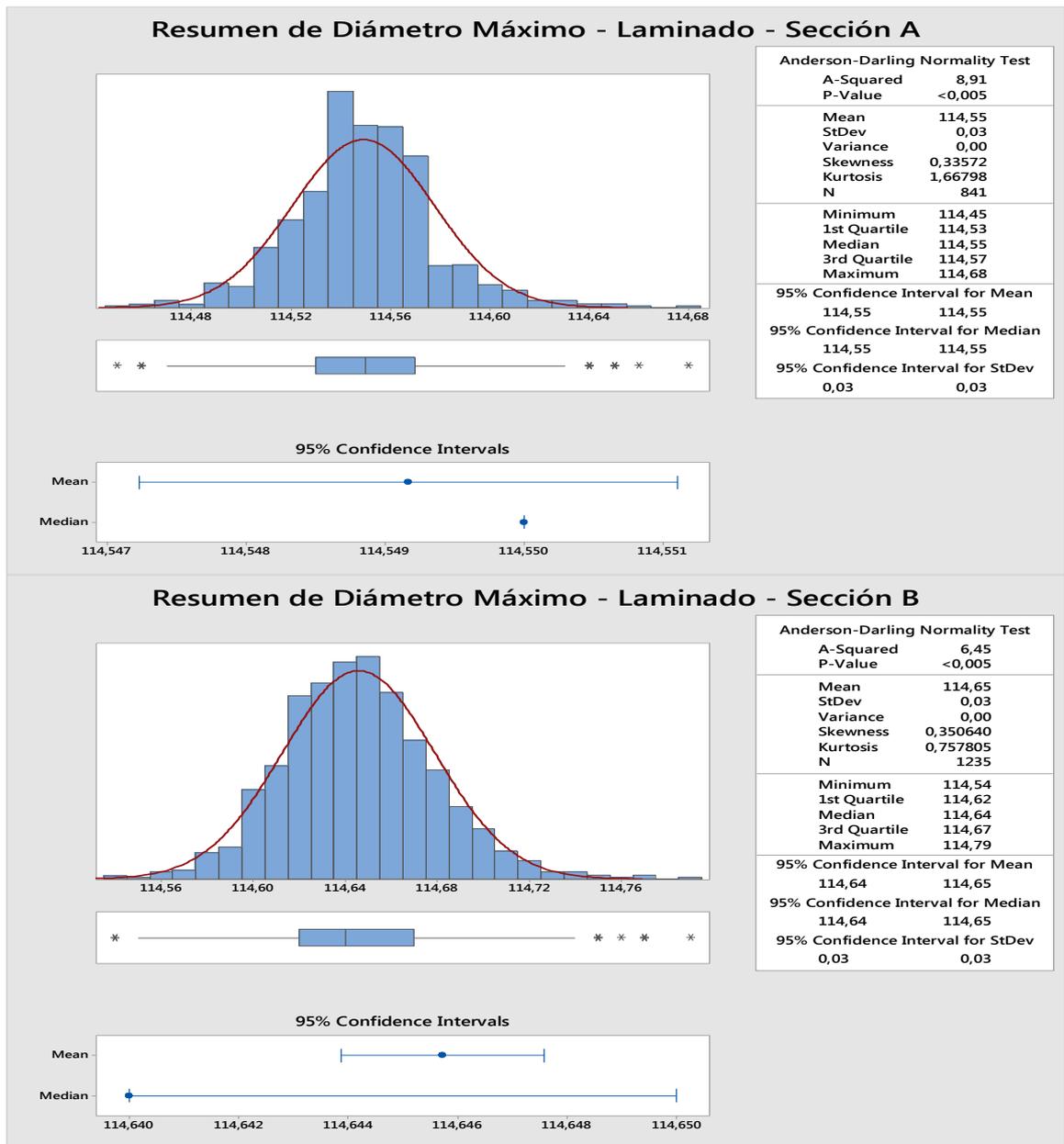


Figura 34 – Laminado – Diámetro Máximo - Resumen Gráfico

Para la Sección C no se presenta el estudio de esta variable, dado que durante el procesamiento de la información ocurrió una falla en el sistema de carga de datos que truncó muchas de las mediciones entre 115,01 y 115,03 al valor 114,99 (ver Sección C en la Figura 29). Este error se presentó solo en el caso particular de la Sección C de la variable medida *Diámetro Máximo*.

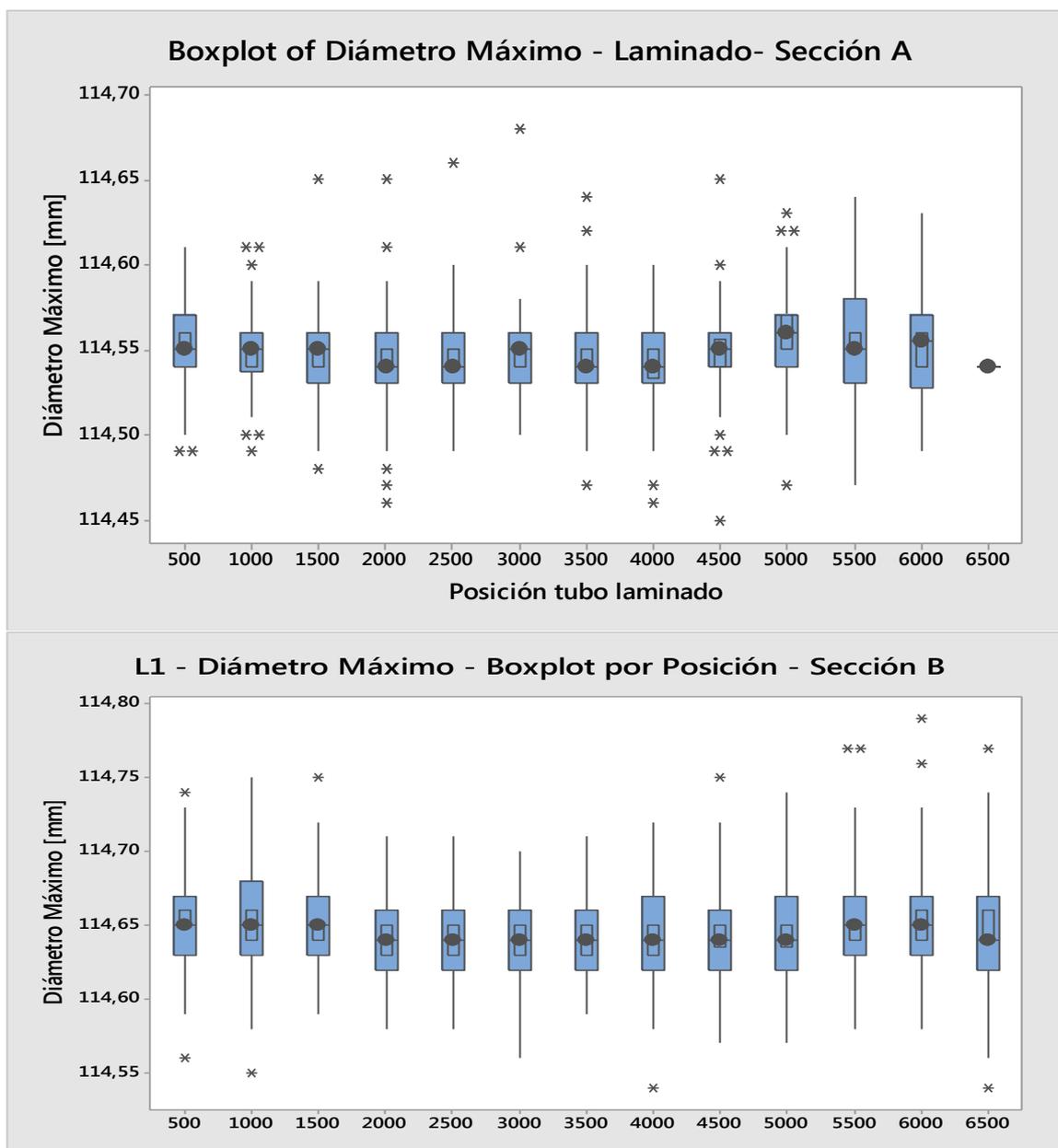


Figura 35 – Laminado – Diámetro Máximo - Diagrama Caja y Bigotes

NOTA: En los tubos laminados, cuando se indica "Posición" implica distancia, en mm, desde el frente del tubo.

2.2.1 Resumen cuantitativo

Características		Sección A	Sección B	Unidades
Diámetro Máximo	Asimetría	0,33	0,35	
	Curtosis	1,67	0,76	
	Mediana	114,55	114,64	mm
	MADN	0,031	0,038	mm
		0,027	0,033	%
	Posiciones con comportamiento normal	500, 1000, 4000, 5000, 5500, 6000	500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 5000, 6500	mm
	Posiciones sin comportamiento normal	1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4500	4500, 5500, 6000	mm
	Levene ¿Varianza independientes de los billets?	NO	NO	
	Kruskall-Wallis Medianas iguales en los distintos días de trabajo en posición	1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500,5000, 5500, 6000, 6500	500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 4500,5000, 5500, 6000, 6500	mm
	% normales	98	93	%

Tabla 1 - Laminado – Resumen de Diámetro Máximo

2.3 Diámetro mínimo

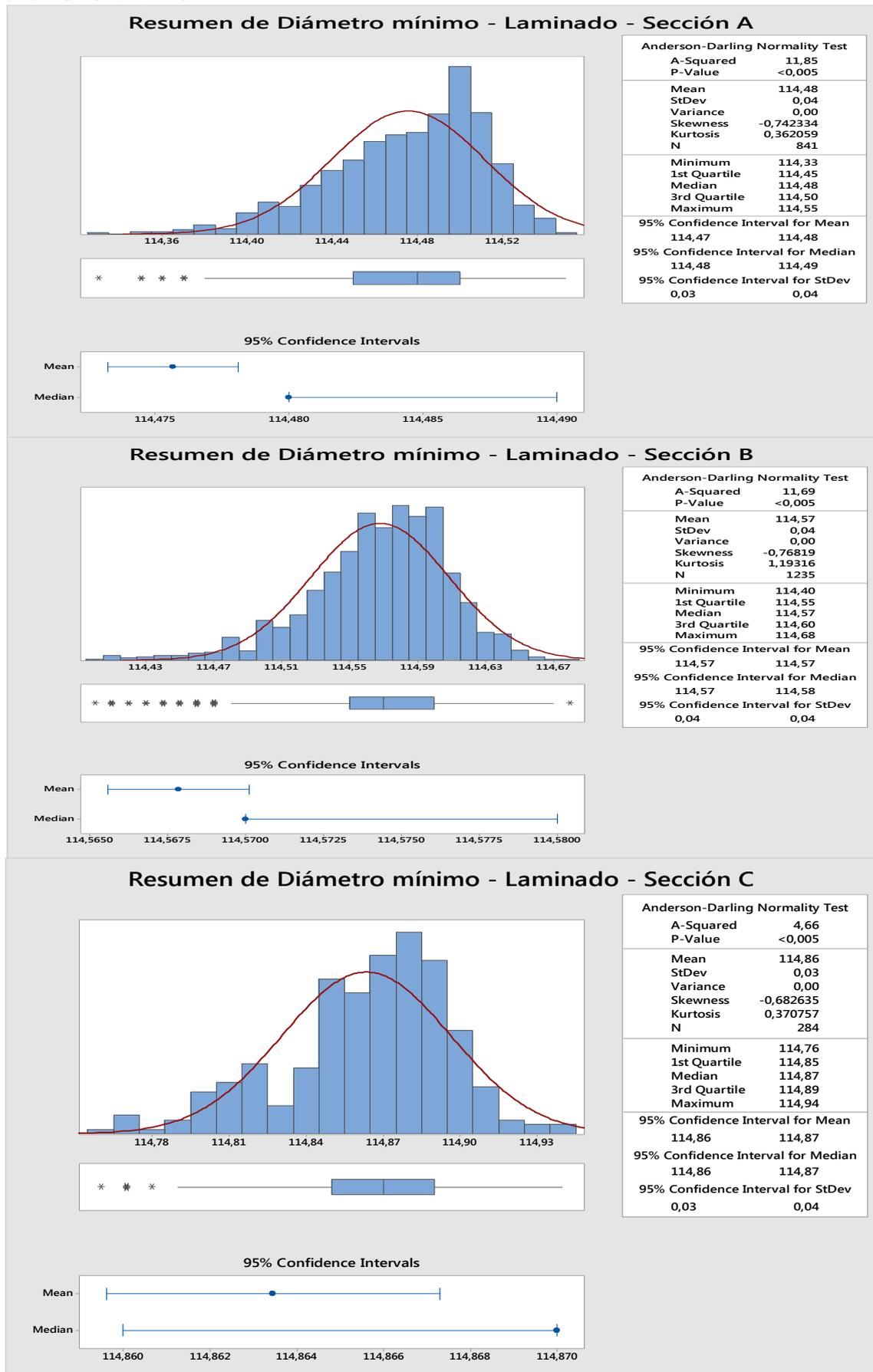


Figura 36 – Laminado – Diámetro mínimo - Resumen Gráfico

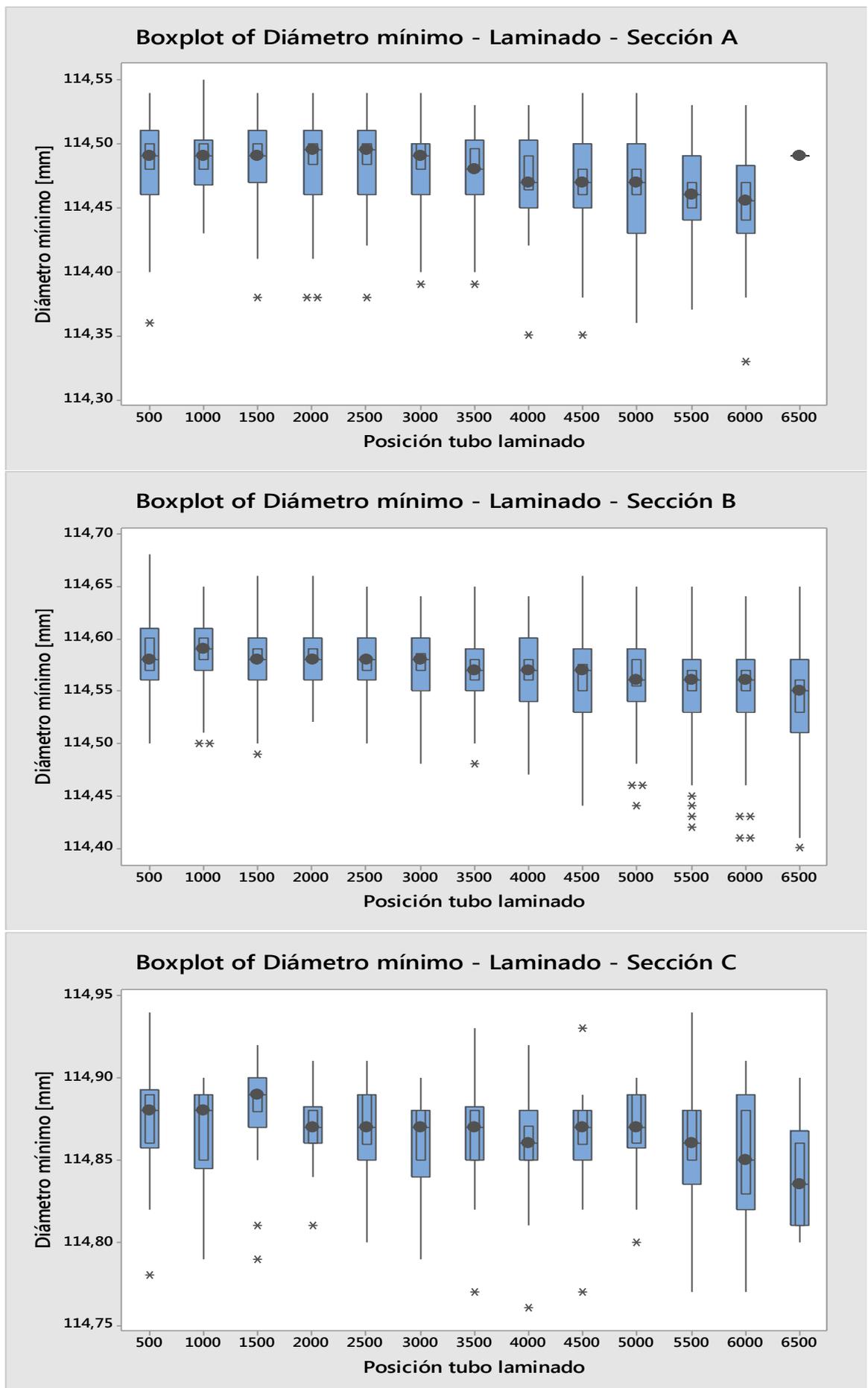


Figura 37 – Laminado –Diámetro mínimo - Diagrama Caja y Bigotes

2.3.1 Resumen cuantitativo

Características		Sección A	Sección B	Sección C	Unidades
Diámetro mínimo	Asimetría	-0,74	-0,77	-0,68	
	Curtosis	0,36	1,19	0,37	
	Mediana	114,48	114,57	114,87	mm
	MADN	0,043	0,047	0,038	mm
		0,038	0,041	0,033	%
	Posiciones con comportamiento normal	1000, 5500, 6000	500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500	500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 5000, 5500, 6000, 6500	mm
	Posiciones sin comportamiento normal	500, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000	5000, 5500, 6000, 6500	1000, 1500, 4500	mm
	Levene ¿Varianza independiente de los billets?	NO	NO	SI	
	Kruskall-Wallis Medianas iguales en los distintos días de trabajo en posición	500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000, 5500, 6000, 6500	3000, 3500, 4500, 5000, 5500, 6000, 6500	1000, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000, 5500, 6000, 6500	mm
	% normales	90	88	100	%

Tabla 2 - Laminado - Resumen de Diámetro mínimo

2.4 Espesor Máximo

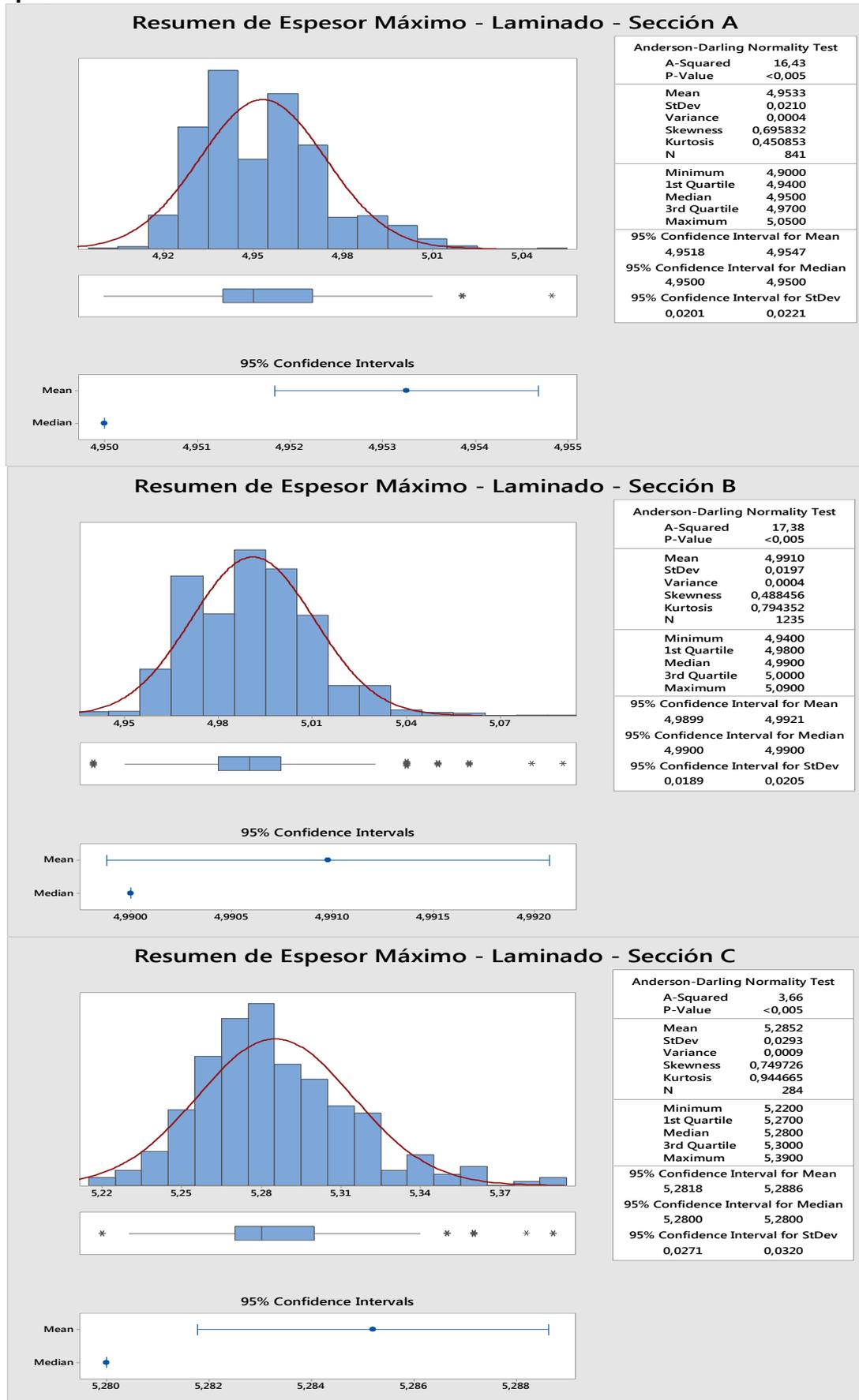


Figura 38 – Laminado – Espesor Máximo - Resumen Gráfico

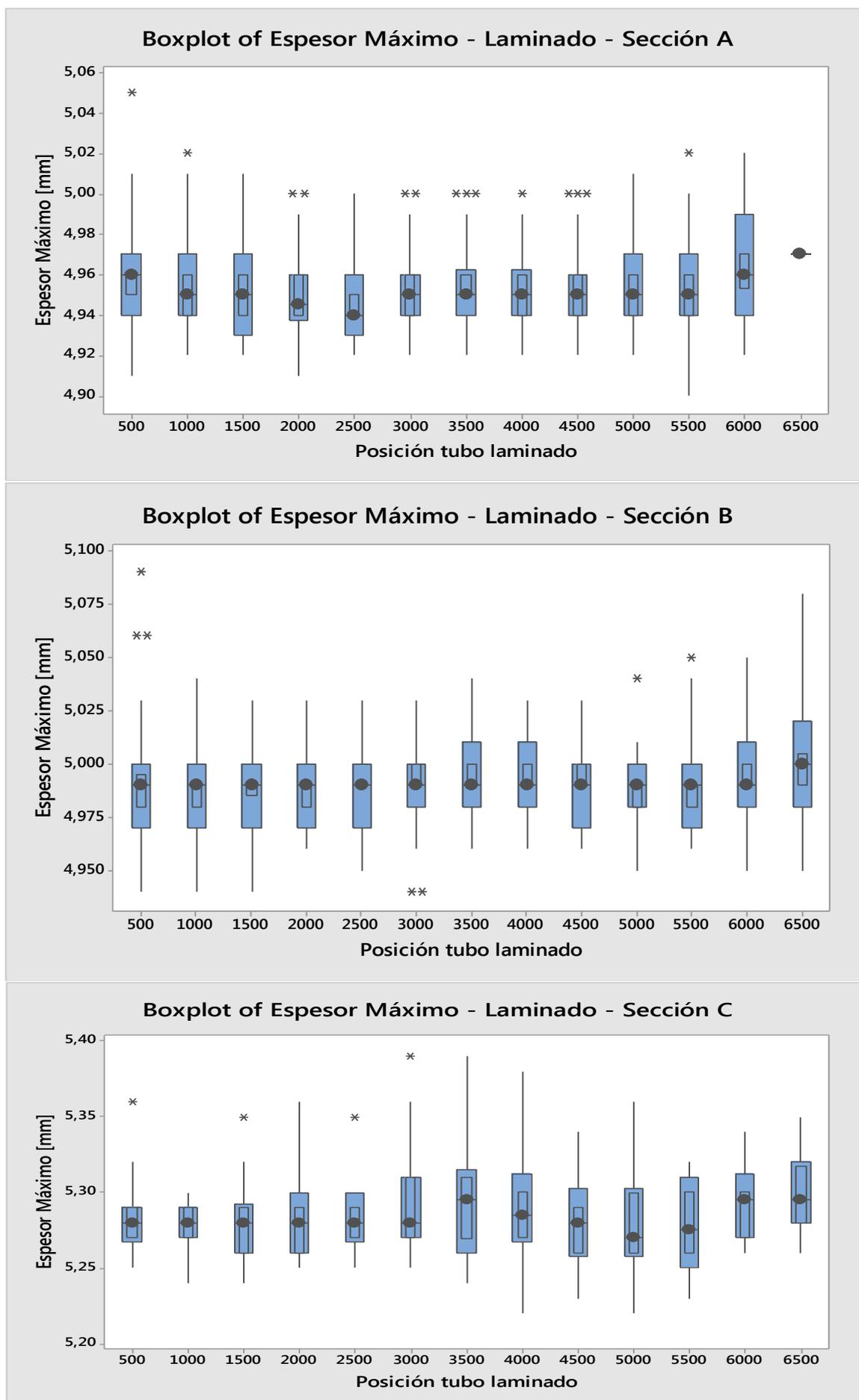


Figura 39 – Laminado – Sección A – Espesor Máximo - Diagrama Caja y Bigotes

Dado que la forma del histograma de la sección A difiere del resto, se graficaron en la Figura 40 los espesores en función del tiempo, no encontrándose causa asignable a una pérdida de estabilidad en el proceso.

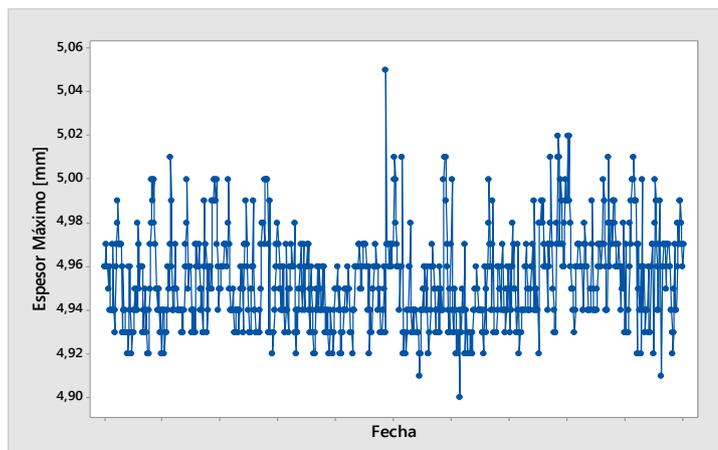


Figura 40 – Laminado – Sección A – Espesor Máximo – Secuencia temporal

2.4.1 Resumen cuantitativo

Características		Sección A	Sección B	Sección C	Unidades
Espesor Máximo	Asimetría	0,70	0,488	0,75	
	Curtosis	0,45	0,794	0,945	
	Mediana	4,95	4,99	5,28	mm
	MADN	0,025	0,023	0,034	mm
		0,51	0,46	0,64	%
	Posiciones con comportamiento normal	1000, 1500, 2000, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000, 5500, 6000	1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000, 5500, 6000	1000, 1500, 2500, 3500, 4000, 4500, 5000, 5500, 6000, 6500	mm
	Posiciones sin comportamiento normal	500, 2500,	500	500, 2000, 3000	mm
	Levene ¿Varianza independiente de los billets?	NO	NO	NO	
	Kruskall-Wallis Medianas iguales en los distintos días de trabajo en posición	2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000, 5500	500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000, 5500,	todos	mm
	% normales	95	95	95	%

Tabla 3 - Laminado - Resumen de Espesor Máximo

2.5 Espesor mínimo

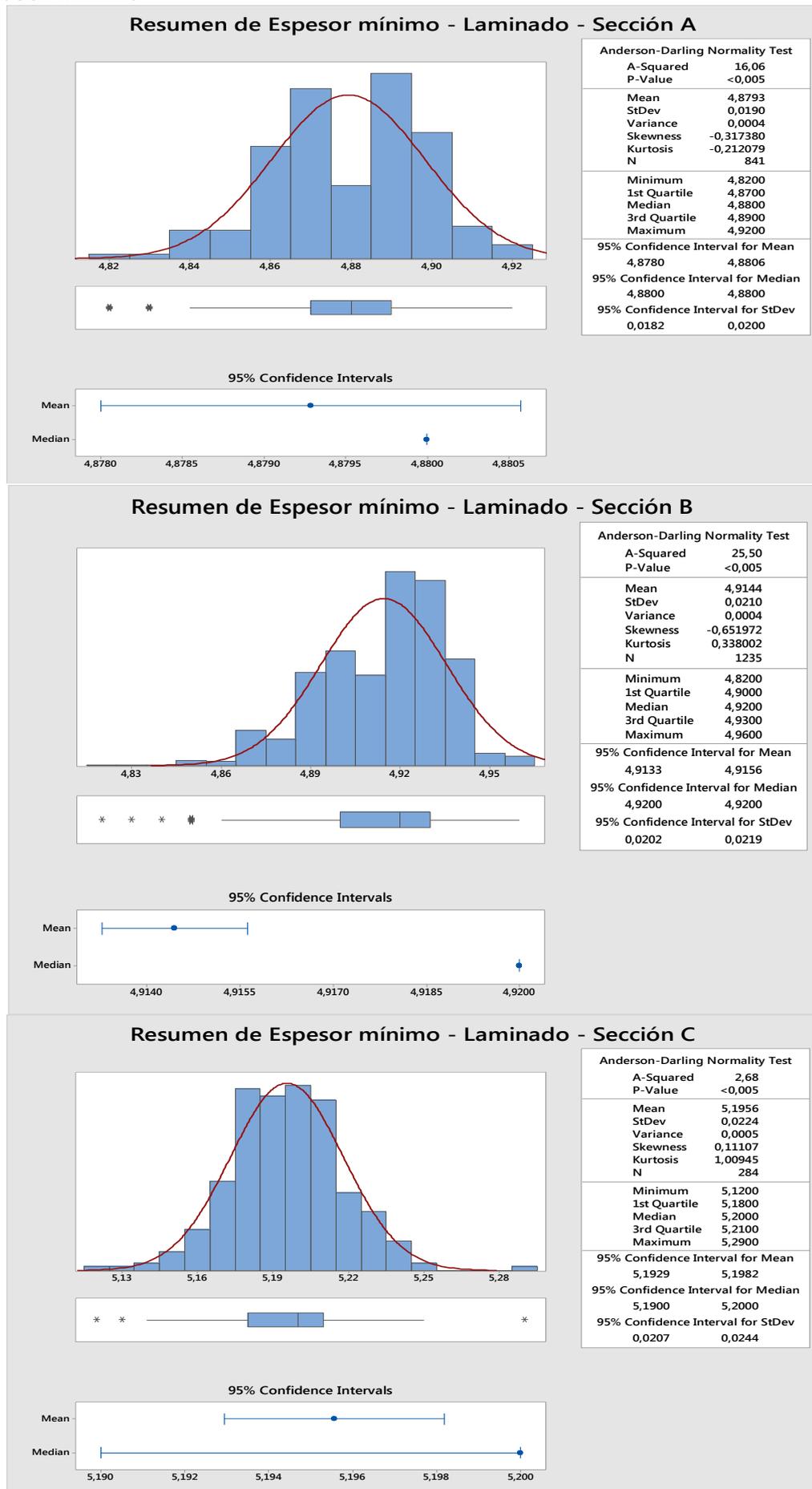


Figura 41 – Laminado –Espesor mínimo - Resumen Gráfico

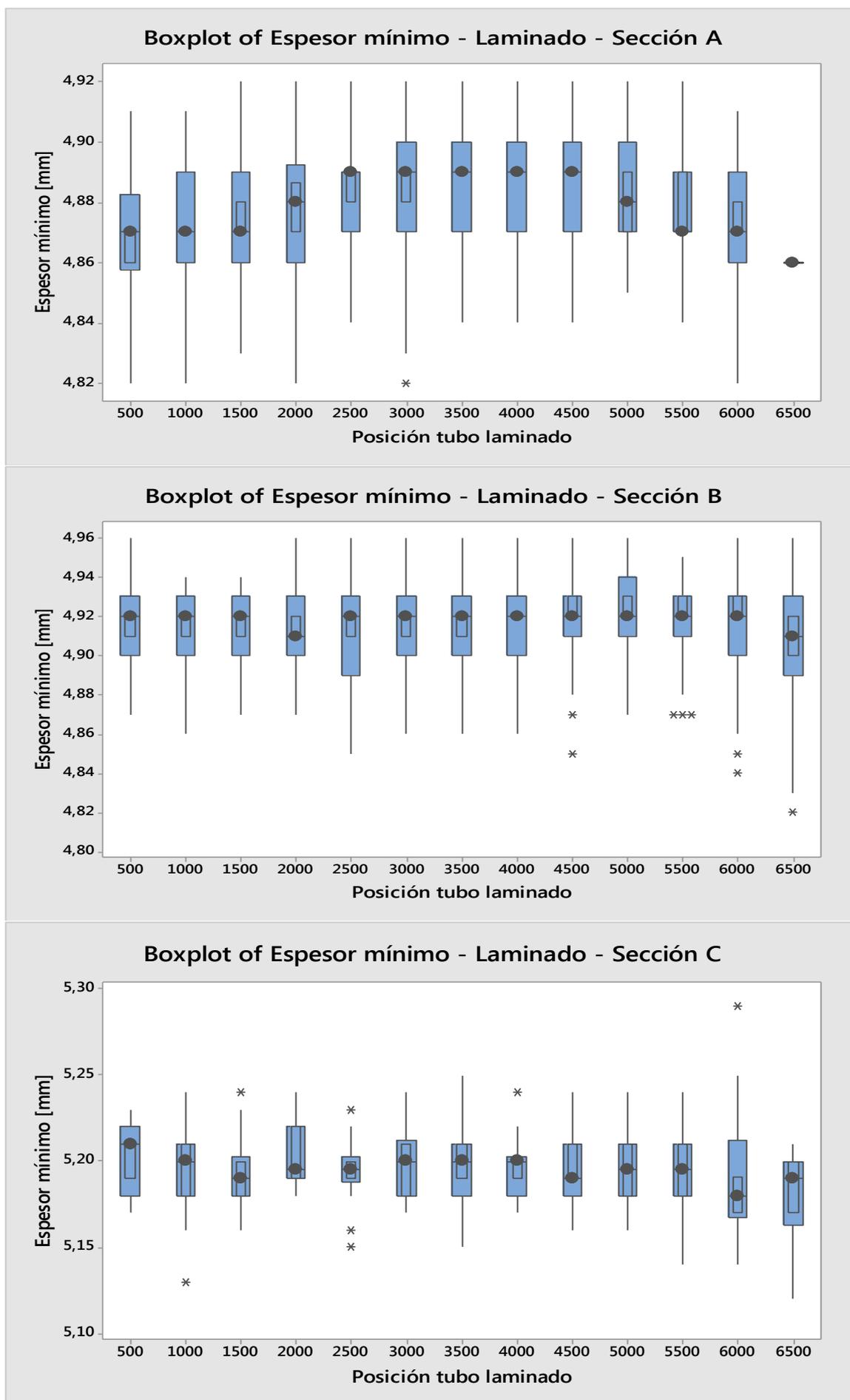


Figura 42 – Laminado – Espesor mínimo - Diagrama Caja y Bigotes

La imagen de la Figura 41 podría sugerir una pérdida de estabilidad en el proceso para esta variable en la sección A, a fin de verificar este supuesto se graficaron en la Figura 43 los espesores en función del tiempo, no encontrándose causa asignable a tal supuesto.

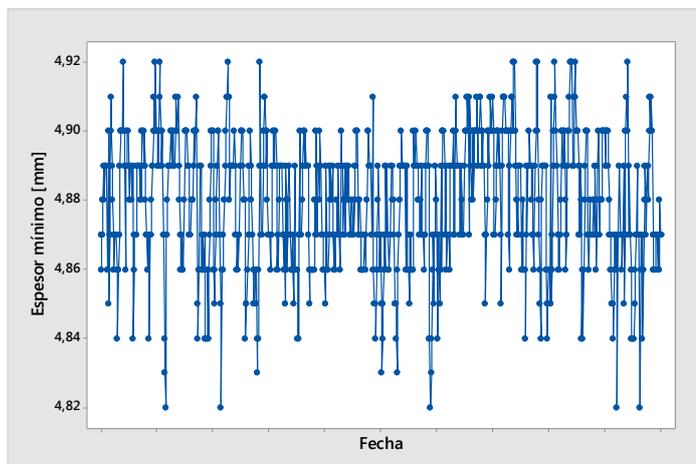


Figura 43 – Laminado – Sección A – Espesor mínimo – Secuencia temporal

2.5.1 Resumen cuantitativo

Características		Sección A	Sección B	Sección C	Unidades
Espesor mínimo	Asimetría	-0,31	-0,65	0,11	
	Curtosis	-0,21	0,34	1,01	
	Mediana	4,88	4,92	5,20	mm
	MADN	0,024	0,026	0,026	mm
		0,48	0,52	0,5	%
	Posiciones con comportamiento normal	500,1000, 1500, 2000, 2500, 4000, 4500, 5000, 5500, 6000	500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000	500,1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000, 5500, 6500	mm
	Posiciones sin comportamiento normal	3000, 3500	1000, 1500, 4500, 5000, 5500, 6000	6000	mm
	Levene ¿Varianza independiente de los billets?	NO	NO	SI	
	Kruskall-Wallis Medianas iguales en los distintos días de trabajo en posición	500, 1500, 2000, 4000, 4500, 5000, 5500, 6000	2000, 2500, 3000, 5500, 6000	todos	
% normales	97	93	100	%	

Tabla 4 - Laminado - Resumen de Espesor mínimo

2.6 Diámetro Promedio

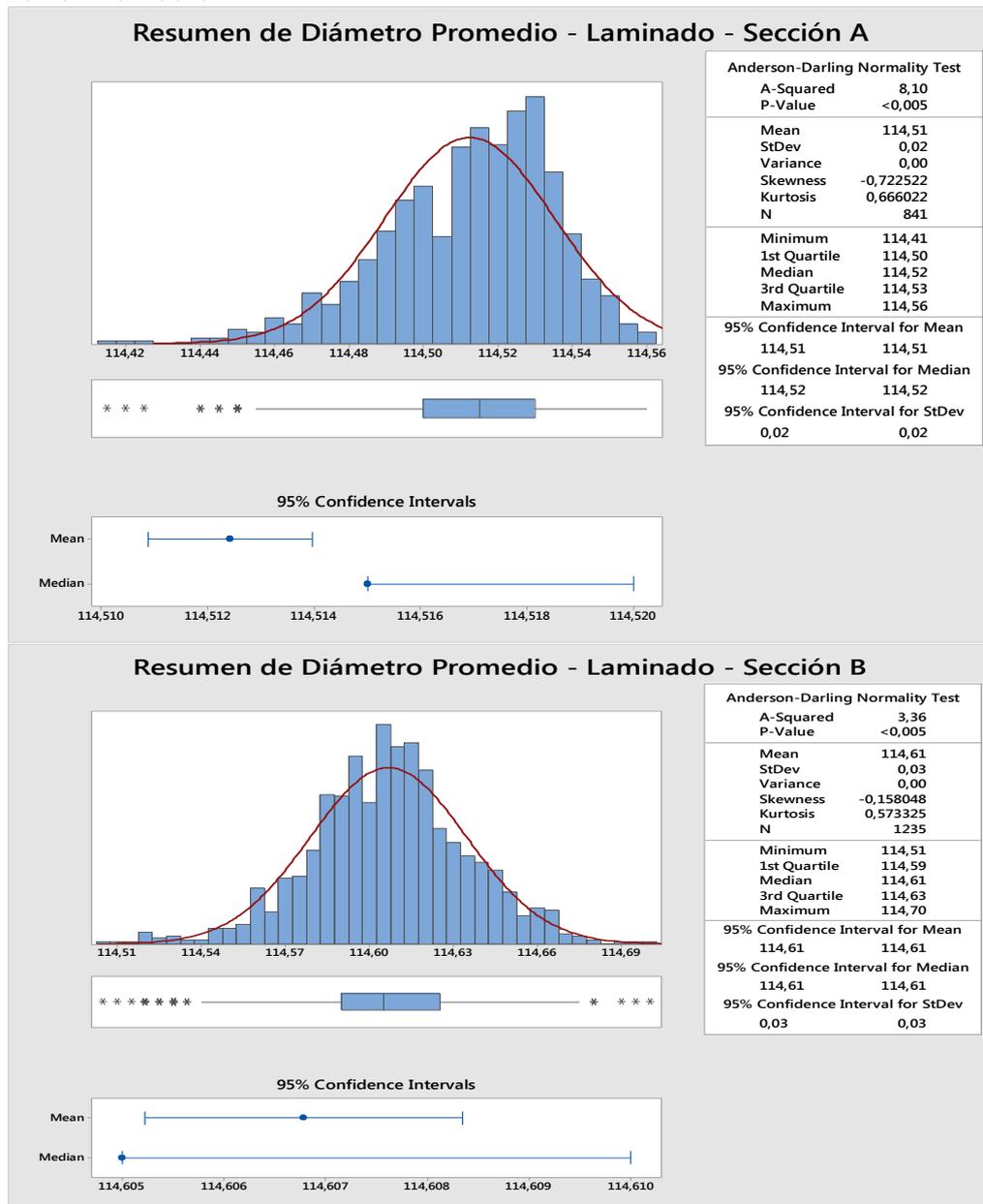


Figura 44 – Laminado – Diámetro Promedio - Resumen Gráfico

Para la Sección C no se presenta el estudio de esta variable, por los motivos indicados en el apartado 2.2.

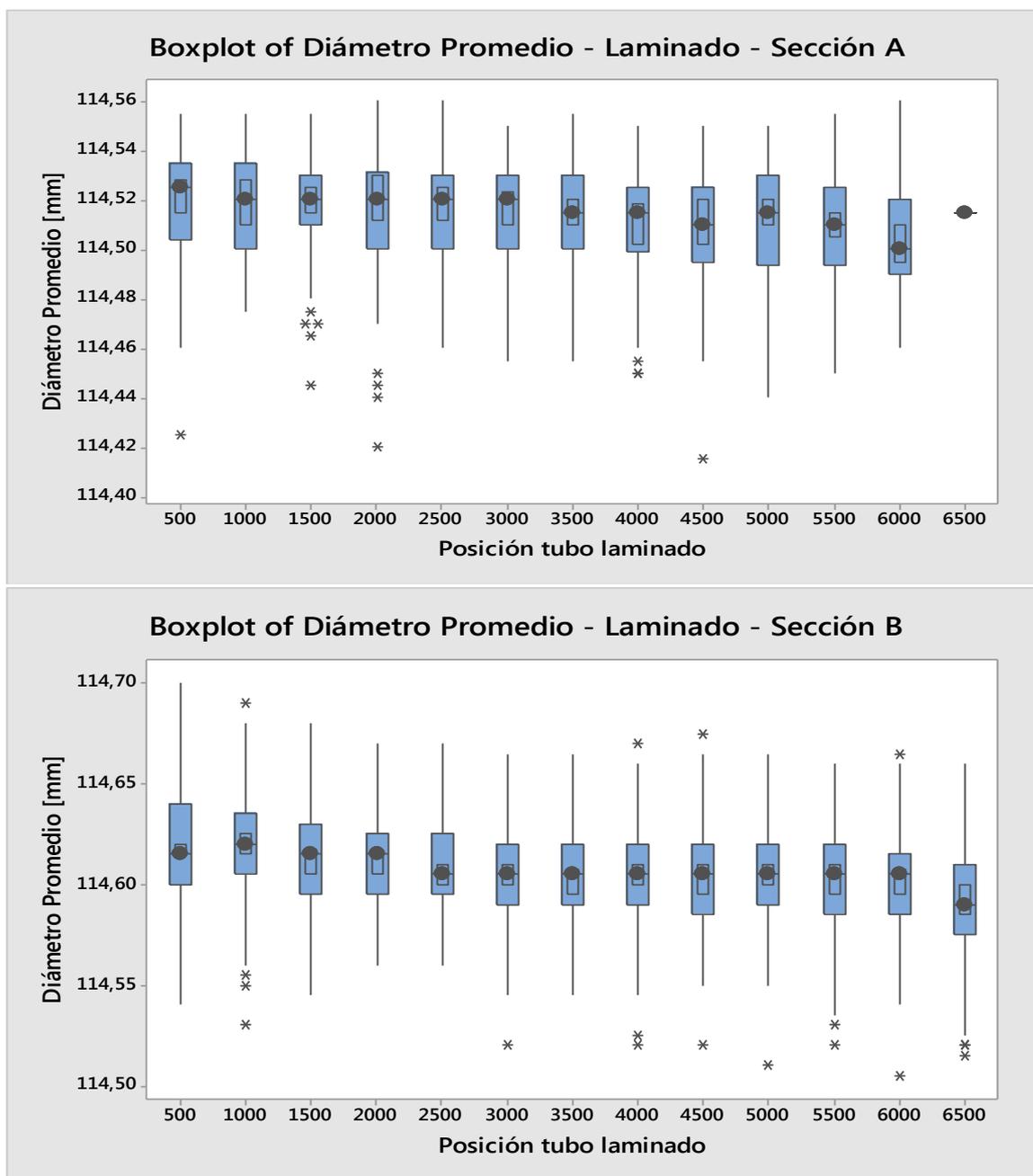


Figura 45 – Laminado - Diámetro Promedio - Diagrama Caja y Bigotes

2.6.1 Resumen cuantitativo

Características		Sección A	Sección B	Unidades
Diámetro Promedio	Asimetría	-0,72	-0,16	
	Curtosis	0,67	0,57	
	Mediana	114,52	114,61	mm
	MADN	0,027	0,032	mm
		0,024	0,028	%
	Posiciones con comportamiento normal	1000, 2500, 5500, 6000	todas	mm
	Posiciones sin comportamiento normal	500, 1500, 2000, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000	-	mm
	Levene ¿Varianza independiente de los billets?	NO	NO	
	Kruskall-Wallis ¿Medianas iguales en los distintos días de trabajo en posición?	500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000, 5500, 6000	3000, 4500, 5000, 6000, 6500	mm
	% normales	92	89	%

Tabla 5 - Laminado - Resumen de Diámetro Promedio

2.7 Espesor Promedio

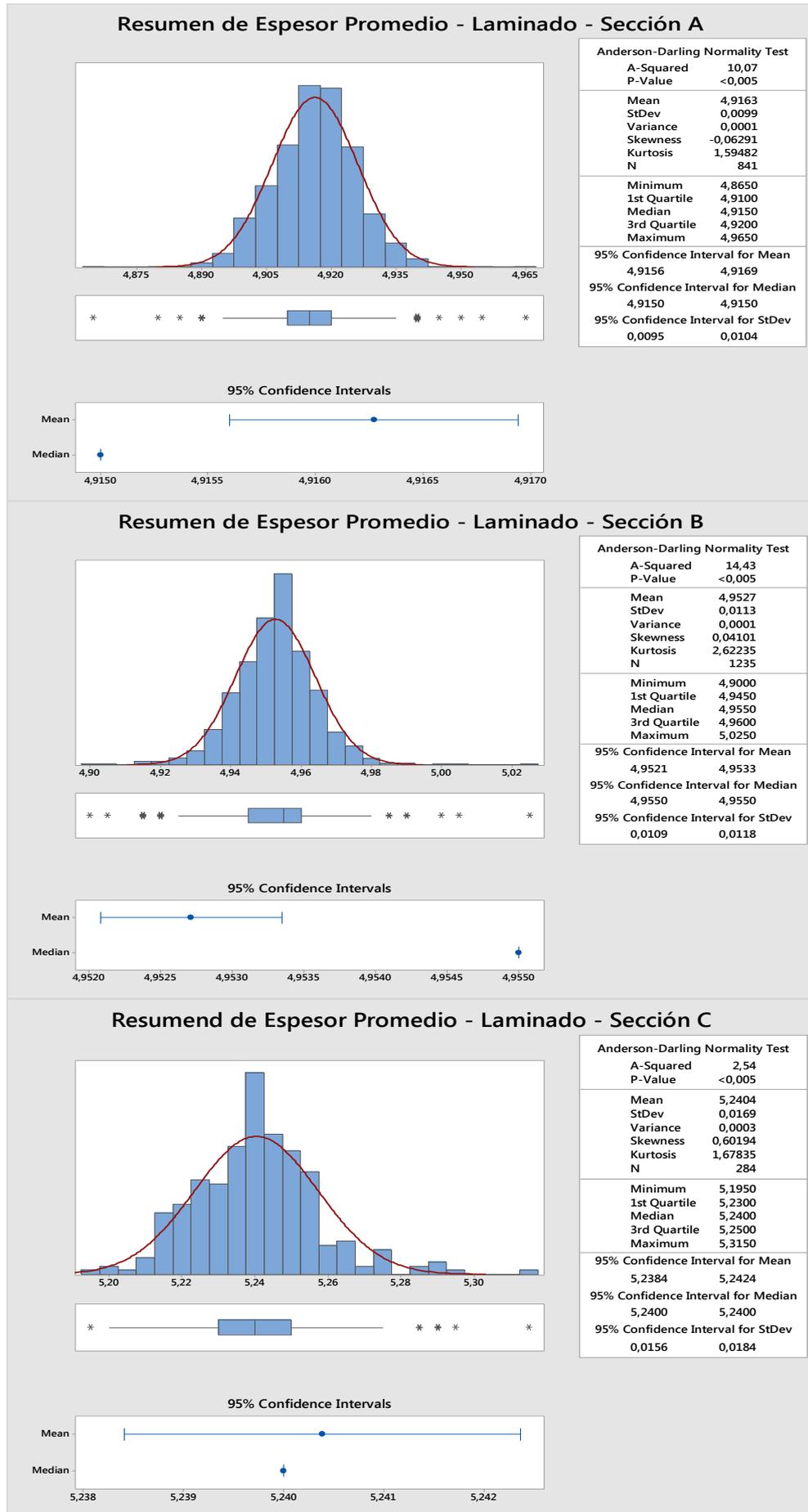


Figura 46 – Laminado - Espesor Promedio - Resumen Gráfico

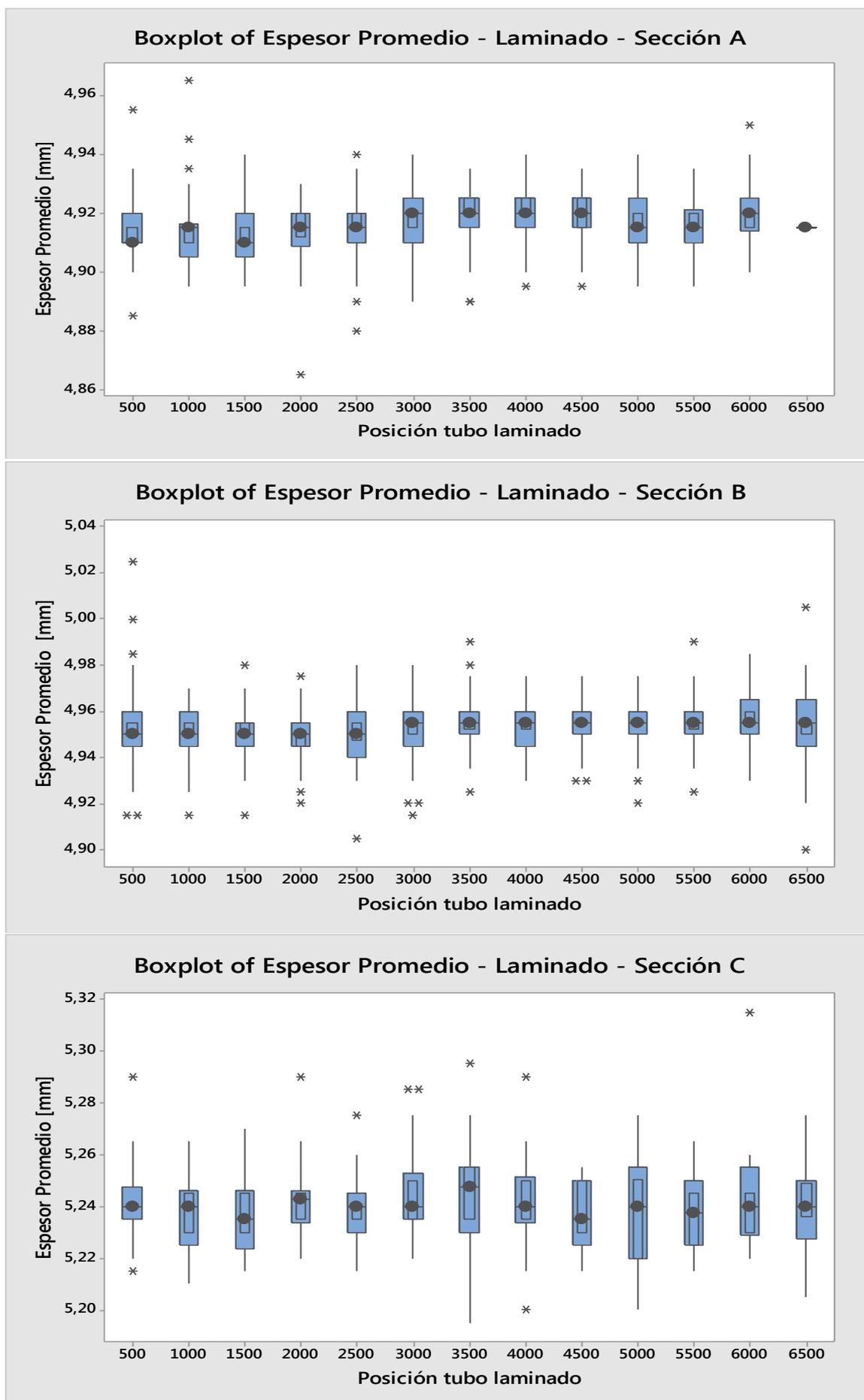


Figura 47 – Laminado – Espesor Promedio - Diagrama Caja y Bigotes

2.7.1 Resumen cuantitativo

Características		Sección A	Sección B	Sección C	Unidades
Espesor Promedio	Asimetría	-0,063	0,041	0,60	
	Curtosis	1,59	2,62	1,68	
	Mediana	4,91	4,95	5,24	mm
	MADN	0,011	0,013	0,018	mm
		0,22	0,26	0,35	%
	Posiciones con comportamiento normal	1500, 3000, 4000, 4500, 5000, 5500, 6000	2000, 4000, 6000	1000, 1500, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000, 5500, 6500	mm
	Posiciones sin comportamiento normal	500, 1000, 2000, 2500, 3500	500, 1000, 1500, 2500, 3000, 3500, 4500, 5000, 5500, 6500	500, 2000, 6000	mm
	Levene ¿Varianza independiente de los billets?	NO	NO	SI	
	Kruskall-Wallis ¿Medianas iguales en los distintos días de trabajo en posición?	500, 5000, 5500,	1000, 2500, 3000, 4500, 5000, 5500, 6000, 6500	todos	mm
	% normales	88	88	86	%

Tabla 6 - Laminado - Resumen de Espesor Promedio

2.8 Ovalidad

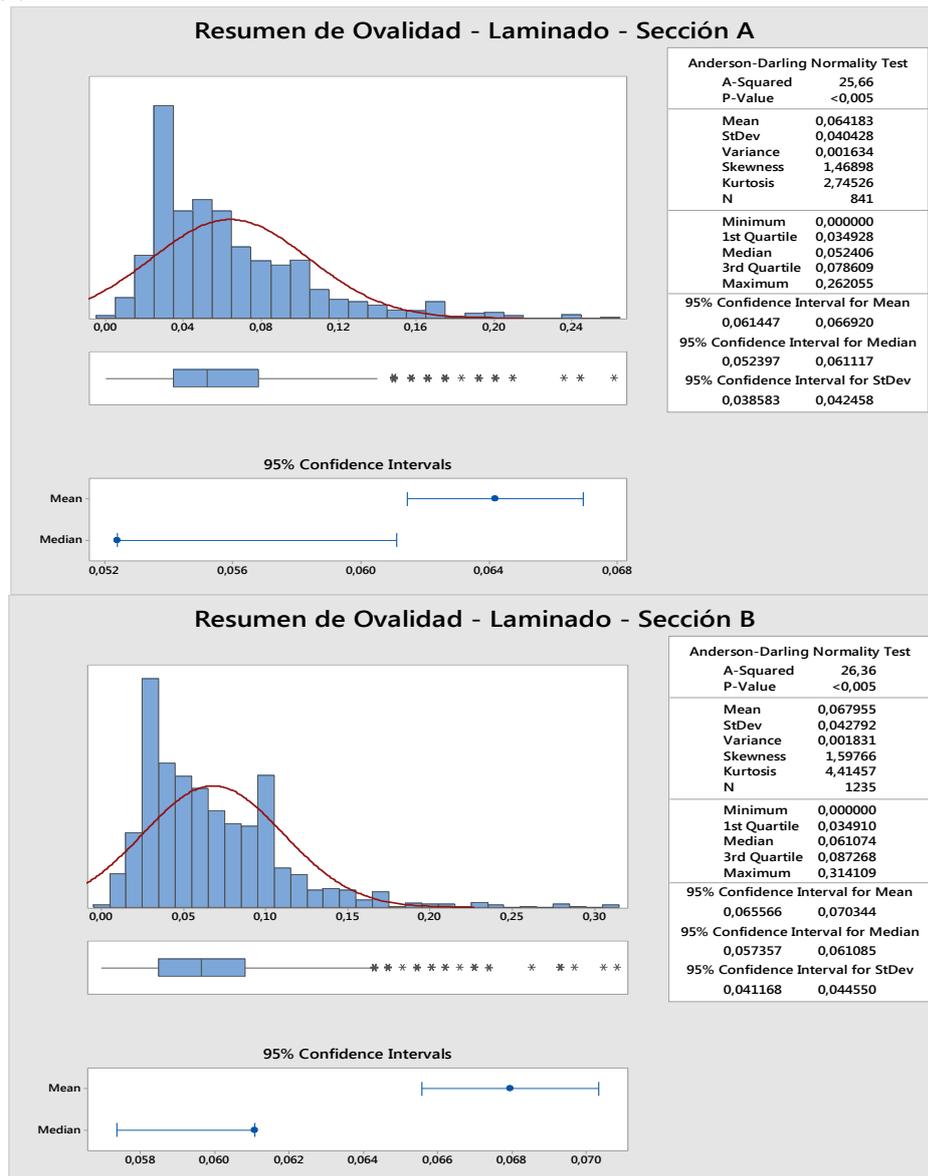


Figura 48 – Laminado – Ovalidad - Resumen Gráfico

Para la Sección C no se presenta el estudio de esta variable, por los motivos indicados en el apartado 2.2.

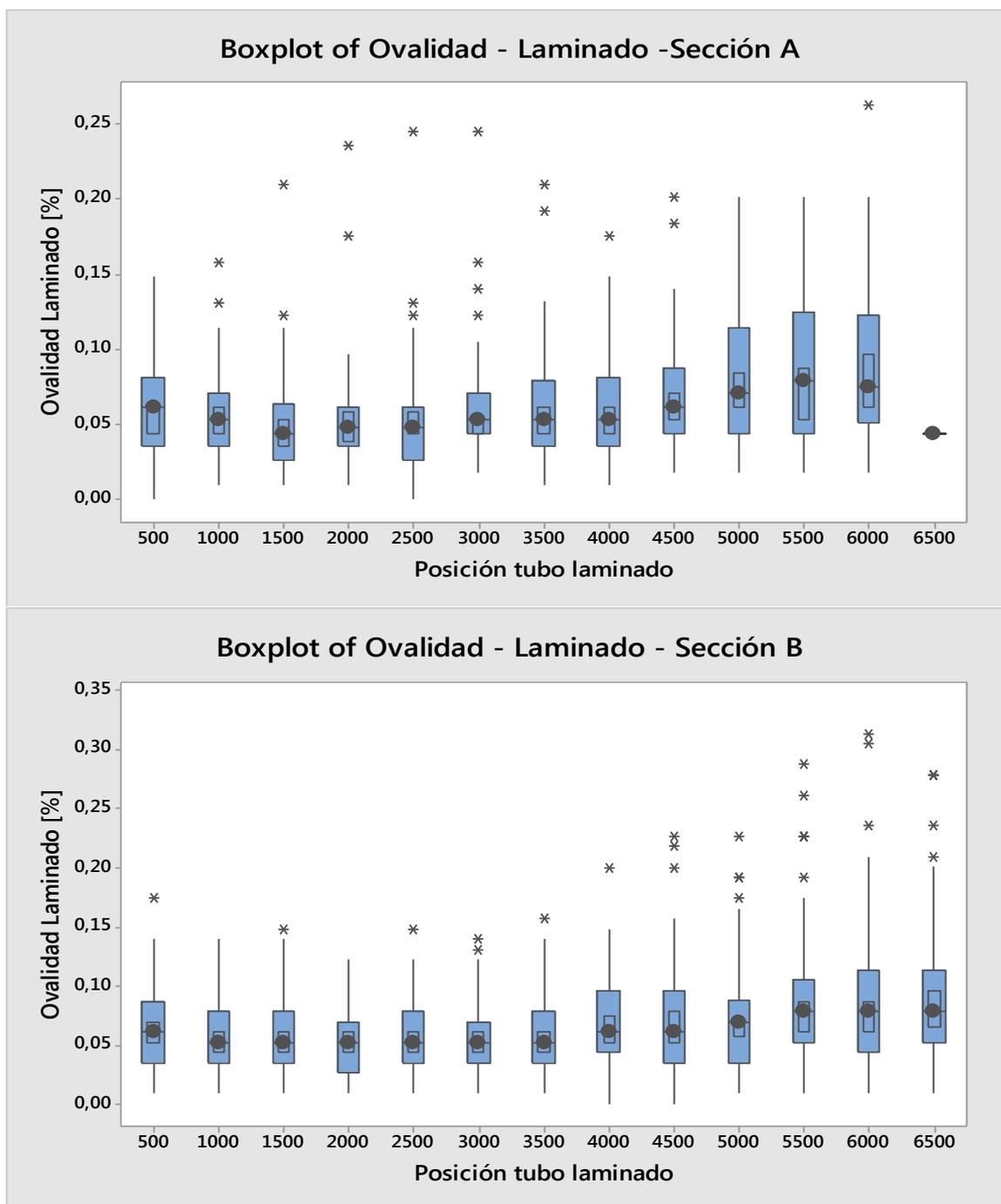


Figura 49 – Laminado – Ovalidad - Diagrama Caja y Bigotes

2.8.1 Resumen cuantitativo

Características		Sección A	Sección B	Unidades
Ovalidad	Asimetría	1,47	1,60	
	Curtosis	2,74	4,41	
	Mediana	0,052	0,061	%
	MADN	0,045	0,013	%
		85,42	20,90	%%
	Posiciones con comportamiento normal	ninguna	ninguna	mm
	Posiciones sin comportamiento normal	todas	todas	mm
	Levene ¿Varianza independiente de los billets?	NO	NO	
	Kruskall-Wallis Medianas iguales en los distintos días de trabajo en posición	500,1000, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000, 5500, 6000	500, 1500, 2000, 3500, 4000, 4500, 5000, 5500, 6000, 6500	
	% normales	90	85	%

Tabla 7 - Laminado - Resumen de Ovalidad

2.9 Excentricidad

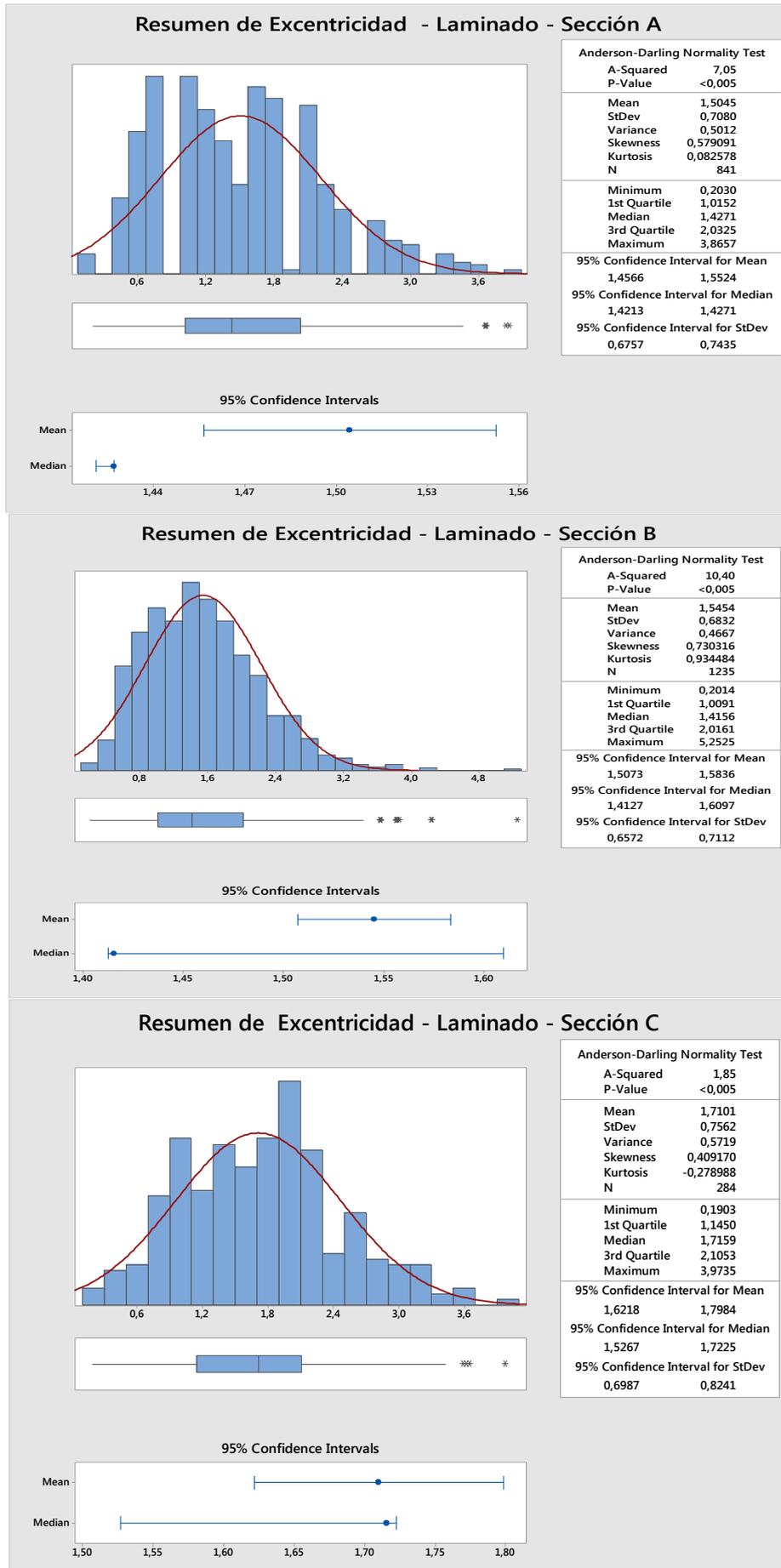


Figura 50 – Laminado –Excentricidad - Resumen Gráfico

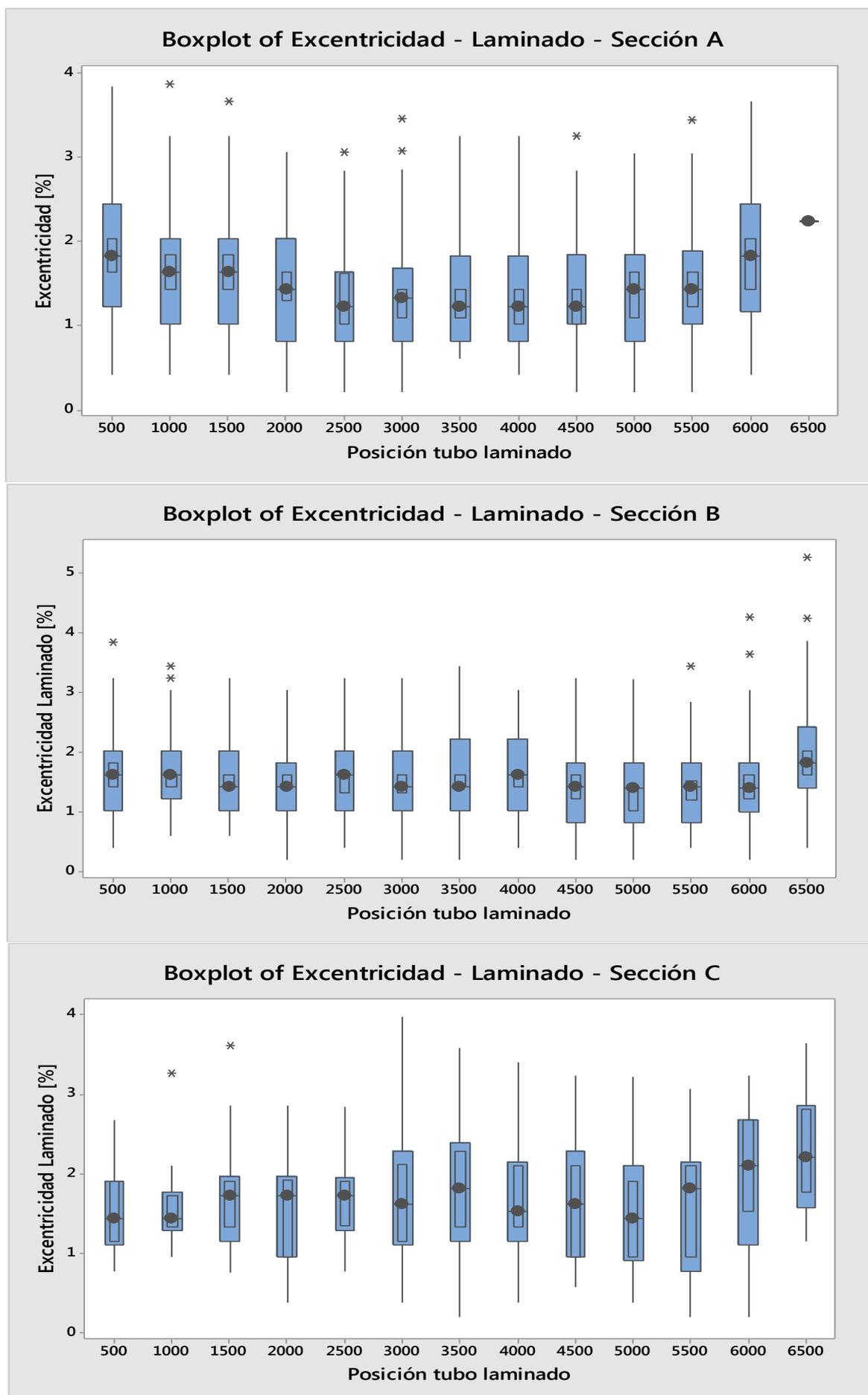


Figura 51 – Laminado – Excentricidad - Diagrama Caja y Bigotes

2.9.1 Resumen cuantitativo

Características		Sección A	Sección B	Sección C	Unidades
Excentricidad	Asimetría	0,58	0,73	0,41	
	Curtosis	0,082	0,93	-0,28	
	Mediana	1,42	1,42	1,72	%
	MADN	0,85	0,80	0,90	%
		59,75	56,8	52,62	%%
	Posiciones con comportamiento normal	500, 1000,1500, 2000, 2500, 5000, 5500, 6000	2000, 2500, 3000, 3500,	500, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 4000, 4500, 5000, 5500, 6000, 6500	mm
	Posiciones sin comportamiento normal	3000, 3500, 4000, 4500	500, 1000,1500, 4000, 4500, 5000, 5500, 6000	1000	mm
	Levene ¿Varianza independiente de los billets?	NO	NO	NO (NC:93.40%)	
	Kruskall-Wallis ¿Medianas iguales en los distintos días de trabajo en posición?	todas	Todas excepto 6500	todas	
	% normales	85	89	95	%

Tabla 8 - Laminado - Resumen de Excentricidad

2.10 Conclusiones

2.10.1 Generalidades

A partir de los valores medidos, para cada variable, para cada sección, se realizó el estudio de ajuste a las siguientes distribuciones estadísticas:

- Normal
- Transformación Box-Cox
- Lognormal
- Lognormal de 3 parámetros
- Exponencial
- Exponencial de 2 parámetros
- Weibull
- Weibull de 3 parámetros
- Valor del extremo más pequeño (Smallest Extreme Value)
- Valor del extremo mayor (Largest Extreme Value)
- Gamma
- Gamma de 3 parámetros
- Logistic
- Log-logística
- Log logística de tres parámetros

tomando como premisa trabajar con un nivel de confianza del 95 % no se encontró ninguna variable en ninguna sección que cumpliera con este criterio.

Del estudio de outliers mediante el indicador t robusto, se detectaron 6 tubos que podrían considerarse outliers en la sección A (8.57%), 8 en la sección B (8.51%), y 3 en la sección C (13.63%). Cabe aclarar que a fin de obtener un control detallado del proceso productivo se consideró outlier al tubo que obtenga más de un indicador t robusto con valor absoluto mayor a 2.95 ($|t| > 2.95$), habiéndose empleado el criterio de más de cuatro para el tubo extrudado (tal como se expresa en el apartado 1.10.1).

Recordando el criterio asumido en este trabajo de considerar valores de correlación mayores a 0.75 como indicador de correlación fuerte, sin distinguir secciones, las correlaciones de las variables medidas en las distintas posiciones espaciales (método de Spearman), según los valores presentados en el apartado 2.1, indican que **las variables medidas se encuentran fuertemente correlacionadas**. Este fenómeno se verifica con la variables medidas entre sí, tanto **de modo individual** a lo largo del tubo (por ejemplo los diámetros máximos en la posición de medición 500 están fuertemente correlacionados con los diámetros máximos en la posición 6000, valor 0.923), como **de modo colectivo** entre variables (por ejemplo los diámetros máximos en la posición de medición 500 están fuertemente correlacionados con los espesores mínimos en la posición 6000, valor 0.887).

Para cada sección se estudió la igualdad de varianzas en relación con los distintos días de trabajo y, empleando el test de Levene, se concluye que en casi la totalidad de los casos (ver Tabla 9) **la varianza, por posición es independiente del día de laminación**, o dicho de otro modo, manteniendo las condiciones de la máquina sin alteración, en la misma posición de medición de los tubos laminados, en los distintos días se obtienen varianzas similares.

	Variables medidas			
	Diámetro Máximo	Diámetro mínimo	Espesor Máximo	Espesor mínimo
Sección A	Todas	Posición 6000 no cumple	Todas	Todas
Sección B	Posición 2000 no cumple	Posición 2000 dudosa	Todas	Todas
Sección C	Todas	Posición 1500 no cumple	Todas	Todas

Tabla 9 – Posiciones con varianzas independientes del día de laminación

Se estudió para cada variable, en cada sección, la independencia de las variables de estudio con los billets de la materia prima empleando el test de Levene, ya que las variables no presentan un comportamiento gaussiano. Cabe aclarar que para la materia prima se realizó el estudio con respecto a las coladas y en esta sección se realizó con respecto a los billets (cada colada da origen a tres billets) a fin de disponer de información más detallada del comportamiento respecto a la materia prima.

En todos los casos se obtuvo como resultado que, con un nivel de confianza del 95%, no se puede asumir que las varianzas de las variables medidas sean independientes de las entradas, o dicho de otro modo, hay elementos estadísticos para considerar que **las varianzas de las variables medidas dependen de los billets de la materia prima** (es decir, por ejemplo, si en la sección A se toman todas las mediciones de diámetro máximo y se analizan en función de los billets de la materia prima, para distintos billets se obtiene distinta varianza).

Esta conclusión no es válida en la sección C para las variables *Diámetro mínimo*, *Espesor mínimo*, *Espesor Promedio* y *Excentricidad*. Una causa posible es que el resto de las secciones está integrado por más de cinco billets diferentes, en tanto que la sección C está formada solo por tres billets, correspondientes a una única colada.

A fin de relacionar independencia de varianza respecto a los días de laminación y la dependencia con respecto a los billets, caben las siguientes consideraciones:

- Las conclusión en relación a la independencia de la varianza respecto del día de laminación debe ser tomada con precaución dado que hubo días en los cuales se han laminado solamente tres tubos, por lo tanto, en cada posición para ese día, la variación fue calculada con $n=3$.
- Es mucho mayor la cantidad de días en los que se laminan tubos pertenecientes al mismo billet, que los días en que se laminan tubos de billets distintos.
- Cada billet genera doce tubos y en cada tubo se miden 12 posiciones, por lo tanto la dependencia respecto a cada billet se analizó con $n>120$ (n : número de mediciones).

En las distintas tablas se presentan los resultados provenientes de realizar el test de Kruskal-Wallis (dado que no todas las variables se comportan de manera gaussiana) para analizar la independencia de la mediana de la variable bajo estudio con respecto al día de laminación. Dado que las mediciones pueden diferir en las distintas posiciones espaciales (como lo indican los diagramas de caja y bigotes), este estudio se realizó para cada posición. Nuevamente cabe destacar que estos resultados deben ser tomados con suma prudencia dado que en varios días no se han laminado más de tres tubos.

Para todas las variables, para todas las secciones, empleando tanto el test de Ryan Joiner, como el de Anderson Darling, en cada tubo laminado, de acuerdo a la proporción indicada en las distintas tablas (Tablas 1 a 8) en todos los tubos no es posible descartar un comportamiento gaussiano, muchas veces incluyendo aquellos tubos considerados outlier (mediante *t* robusta) dentro de la población de tubos de la sección bajo estudio. Excepción a ello resultan la variable *Espesor Máximo*, donde en las secciones A y B aquellos tubos considerados outliers dentro de la población de tubos de la sección bajo estudio no cumplen con el citado test y la variable *Espesor mínimo*, donde la mayoría de los tubos considerados como outliers dentro de la población de tubos de la sección bajo estudio no cumplen con el test; lo mismo ocurre en dos secciones para la variable *Ovalidad*.

La conclusión del párrafo anterior se puede relacionar con la falta de normalidad de la sección del siguiente modo: si se toma cada tubo de forma individual, sus valores medidos generalmente (según las proporciones de las tablas) pueden ser modelados con una distribución gaussiana. Cuando se incorporan las mediciones de otros tubos, el nuevo conjunto de valores no puede ser representado, con el mismo nivel de confianza, por la distribución gaussiana.

Analizando los distintos gráficos presentados para las variables de estudio, la sección C es la que presenta un comportamiento menos estable respecto de las otras dos secciones, sin perjuicio de las particularidades respecto a la varianza ya indicadas y lo indicado en el apartado respecto a los espesores. Las causas de este comportamiento pueden tener origen en los siguientes factores:

- El herramental (mandril y guías) empleado en la sección C es distinto al resto de las secciones.
- La menor cantidad de tubos laminados correspondientes a la sección C (22 tubos) influye en la dispersión de la sección respecto al resto de las secciones (Sección A, 70 tubos y Sección B, 95 tubos)

A continuación se presentan las particularidades de cada variable de estudio:

2.10.2 Diámetros

2.10.2.1 Diámetro máximo

En la Figura 35 se presenta una mayor estabilidad en posición central del tubo respecto del resto de las posiciones.

2.10.2.2 Diámetro mínimo

La Sección A y la B presentan histogramas similares, diferentes al de la Sección C (Figura 36). Analizando las mediciones en diferentes días se verificó la estabilidad del proceso.

En todas las secciones se visualiza que la variable *Diámetro mínimo* tiende a disminuir hacia el final del tubo (Figura 37).

2.10.2.3 Diámetro Promedio

En todas las secciones ocurre una tendencia a menores valores hacia el final del tubo, como lo indica la Figura 45.

2.10.2.4 Ovalidad

En la Figura 49 se visualiza que en las Secciones A y B, los valores en las distintas posiciones espaciales podrían dar origen a un patrón en forma de U, con mayor valor y dispersión hacia el final y menor valor y dispersión en torno a la posición 2000.

Resulta distintivo que para esta variable no hay posición alguna donde suponer normalidad (con un nivel de confianza de 95%).

2.10.3 Espesores

Para las variables *Espesor Máximo* y *Espesor Promedio* se puede concluir, a partir de los valores indicados en la Tabla 3 y en la Tabla 6, que la **Sección C posee un valor de MADN relativo mayor** que en el resto de las secciones. La causa de este fenómeno puede obedecer a los factores ya expuestos para la sección C al analizar su estabilidad.

2.10.3.1 *Espesor Máximo*

En la Figura 39 se aprecia que en las secciones A y B se produce menor dispersión en la zona central del tubo y en todas las secciones la mayor mediana se presenta hacia el final del tubo. La Sección B presenta una alta dispersión en la posición 6500.

2.10.3.2 *Espesor mínimo*

Hacia el final del tubo se produce siempre una tendencia decreciente en los valores, como indica la Figura 42.

2.10.3.3 *Espesor Promedio*

Se verifica una tendencia a la estabilidad hacia el final del tubo. Cabe destacar que en la parte central del tubo se produce un crecimiento en la dispersión, verificable en el tamaño de la caja y los bigotes de la Figura 47 (Sección A en la posición 3000, Sección B en la posición 2500 y en la Sección C, en la posición 3500).

2.10.3.4 *Excentricidad*

En todas las secciones se produce un crecimiento de la mediana de los valores hacia el final del tubo, como indica la Figura 51.

3 Relación Entrada-Salida (Materia Prima -Tubo Laminado)

3.1 Análisis Cualitativo

Los dendogramas (el del tubo extrudado, Figura 5 y el del tubo laminado, Figura 30) indican que las variables luego del proceso de laminación estudiado son más afines entre sí (uniones entre sí con mayor nivel de afinidad). Se visualiza que los dos grupos más grandes se unen para los tubos laminados en un 91.89%, ocurriendo esto para los tubos extrudados en 23.84%.

También se puede verificar el mismo efecto en los valores de correlación y en los gráficos de loadings al analizar por componentes principales: en el gráfico de la Figura 6 se diferencian claramente las variables de diámetros máximos, de las de diámetros mínimos y estas dos de las de espesores. En el gráfico de loadings de los tubos laminados, Figura 31, se diferencian claramente las variables correspondientes a los diámetros de las correspondientes a espesores.

Por una parte, es destacable que en el tubo extrudado las correlaciones fuertes de las variables medidas ocurren entre posiciones próximas de una misma variable, mientras que en el tubo laminado todas las variables en todas las posiciones espaciales se encuentran fuertemente correlacionadas. Por otra parte, en el tubo extrudado el 90% de la varianza de las variables es explicada por sus primeros 13 autovectores, mientras que en el tubo laminado, el 97% de la varianza es explicado por sus primeros 4 autovectores. Luego del proceso de laminación, con respecto al tubo extrudado, mediante el análisis por componentes principales se observa una menor discriminación en las variables correspondientes a los diámetros y mayor discriminación en las variables correspondientes a los espesores. Asimismo se observa que luego del proceso las variables correspondientes a los diámetros máximos y mínimos son más afines entre sí.

Para una misma variable de estudio, al comparar los diagramas de caja y bigotes de los tubos extrudados y los tubos laminados, se observa que siempre se opera una modificación en las distribuciones espaciales de los valores. Asimismo, en muchas posiciones espaciales, luego del proceso de laminación, las variables pueden ser explicadas por una distribución gaussiana, hecho que no ocurre con las variables en los tubos extrudados.

El proceso de laminación solamente generó un tubo outlier, habiendo sido el tubo extrudado también considerado outlier, por lo tanto podría considerarse que se reduce la cantidad de outliers. Cabe aclarar que si bien la proporción de tubos outliers de extrudado resultó 3% y de tubos laminados en 3.95%, para los tubos laminados se utilizó un criterio de selección más estricto, por lo que las proporciones no son comparables entre sí.

Tanto en los tubos extrudados como en los laminados, las variables de estudio presentan varianzas no uniformes (respecto de las coladas en el primer caso, respecto de los billets en el segundo).

Si se consideran los tubos individualmente, los valores de las variables medidas pueden ser representados por una distribución gaussiana en mayor proporción en el tubo laminado que en el tubo extrudado. En las variables derivadas, no se produce un comportamiento uniforme en las proporciones de normalidad.

Por último, como es esperable, la dispersión de los valores es menor luego del proceso de laminación en todas las variables, excepto para la ovalidad en la sección C (en el apartado 2 se cuantifica para cada sección).

3.1.1 Análisis Gráfico

Observando las imágenes de la Figura 52 y de la Figura 53 se puede constatar que los diámetros máximos y mínimos laminados no dependen directamente de los diámetros máximos de extrudado (los picos, es decir las zonas rojas en los gráficos, se ubican en el centro de todos los

diámetros máximos de extrudado) ni tampoco directamente de los diámetros mínimos de extrudado (picos ubicados principalmente en los mayores diámetros mínimos, aunque también aparecen picos en zonas más distantes).

Nota: en todas las imágenes presentadas en este apartado, en la mitad izquierda se presenta el gráfico en tres dimensiones y en la mitad derecha se presenta las curvas de nivel, *i.e.* la vista superior del gráfico de tres dimensiones.

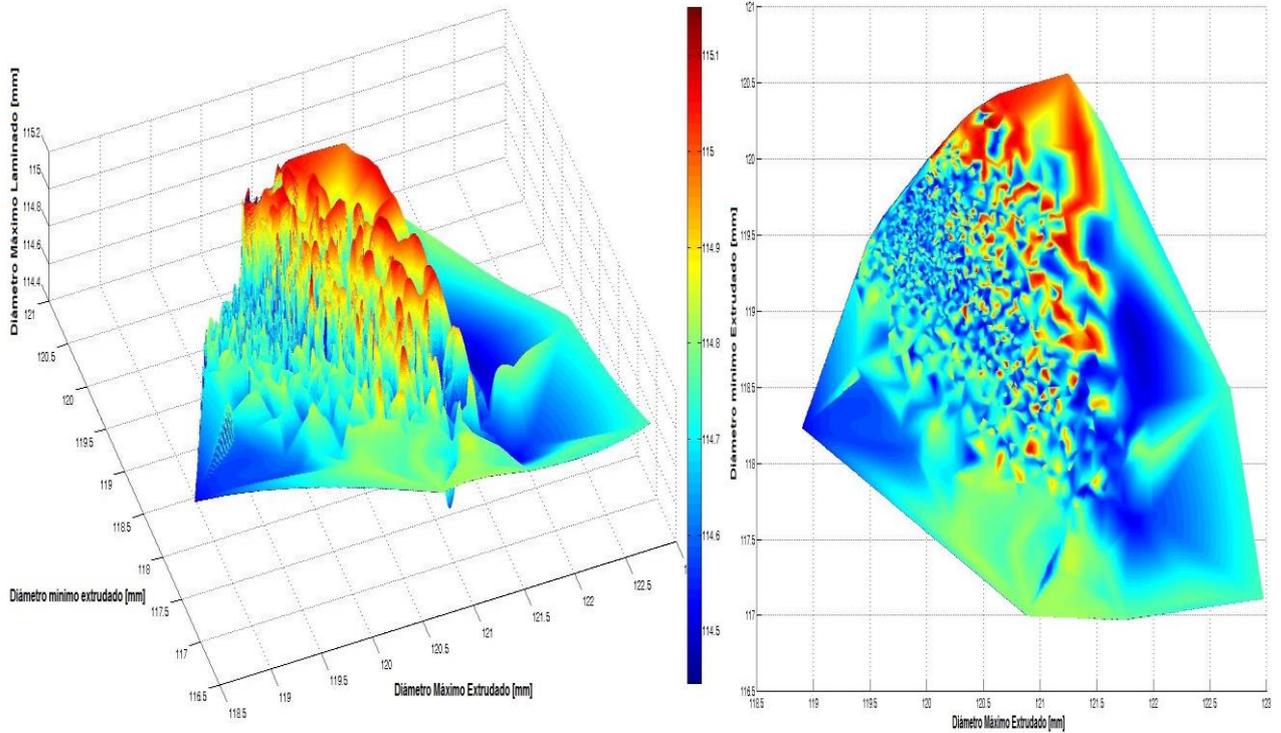


Figura 52 - Diámetro Máximo Laminado en función de los diámetros de extrudado

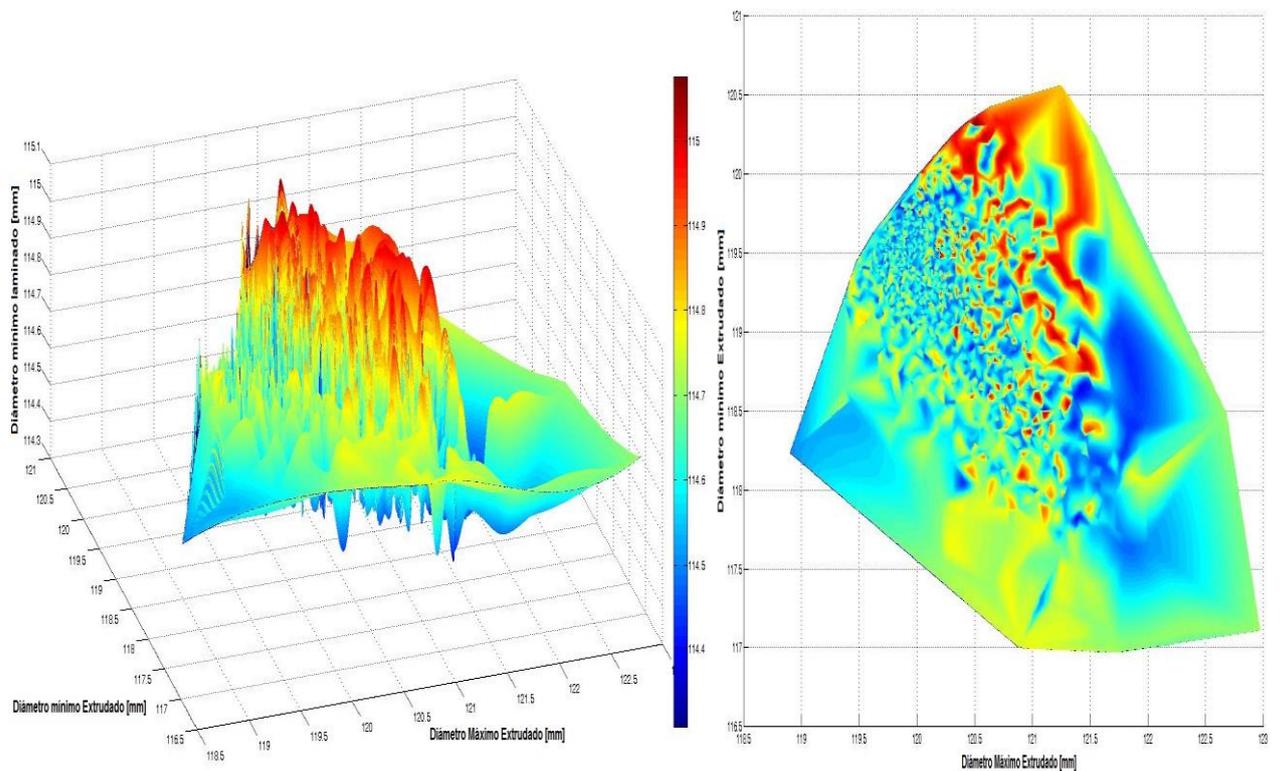


Figura 53 - Diámetro mínimo Laminado en función de los diámetros de extrudado

La ovalidad en los tubos extrudados se distribuye del modo indicado en la Figura 54.

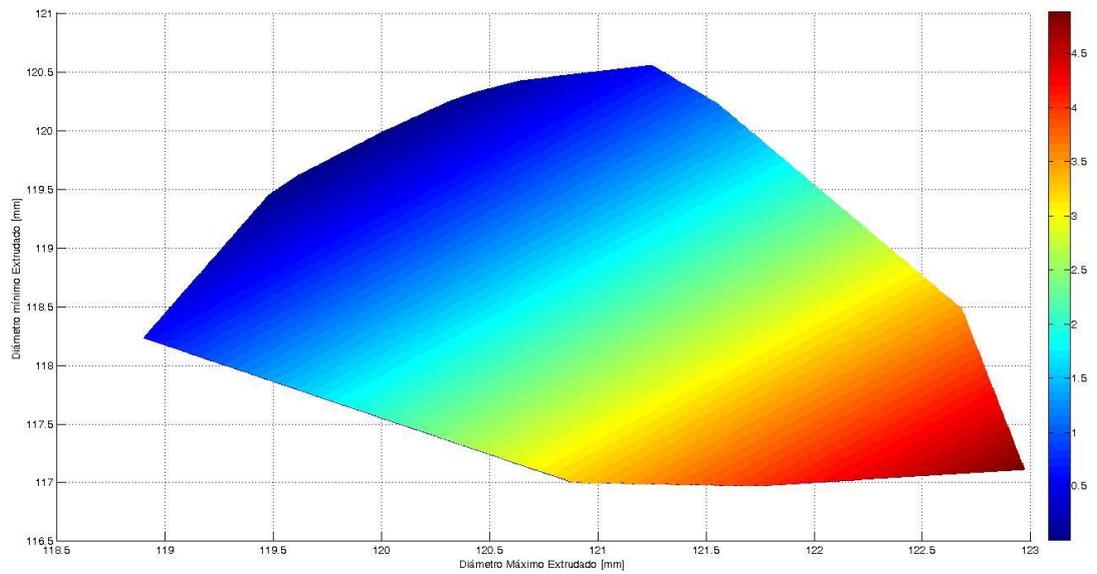


Figura 54 - Ovalidad Extrudado en función de diámetros de extrudado

De la Figura 54 y la Figura 55 se puede concluir que la máxima ovalidad del extrudado no se correlaciona con la máxima ovalidad del tubo laminado. En el tubo laminado la zona de mayor ovalidad se ubica alrededor de la zona de mayores diámetros mínimos.

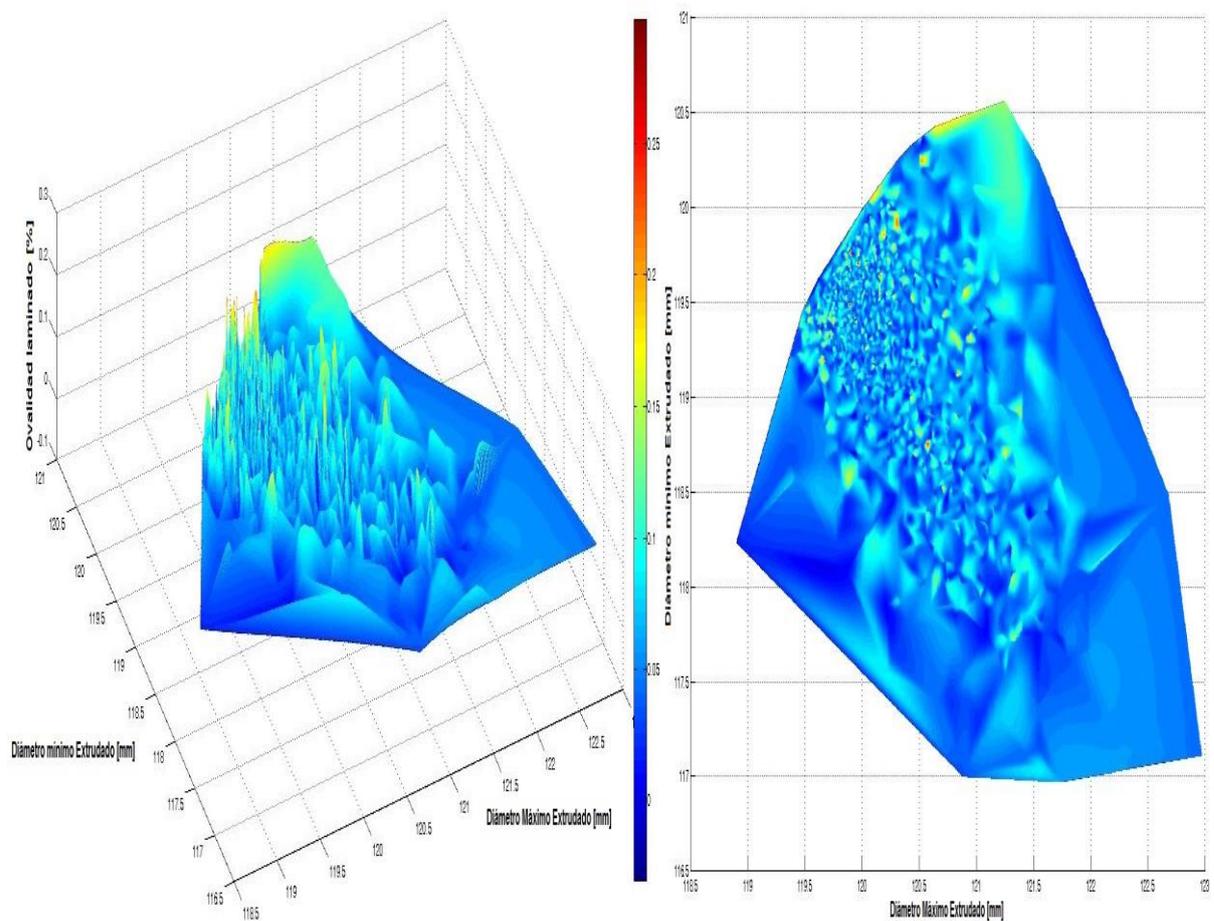


Figura 55 - Ovalidad Laminado en función de diámetros de extrudado

Observando la Figura 56 y la Figura 57 se puede constatar que los espesores máximos y mínimos laminados no dependen directamente de los espesores máximos de extrudado (los picos, es decir las zonas rojas en los gráficos, se ubican en el centro de todos los espesores máximos de extrudado) ni tampoco directamente de los espesores mínimos (picos ubicados principalmente en los mayores espesores mínimos).

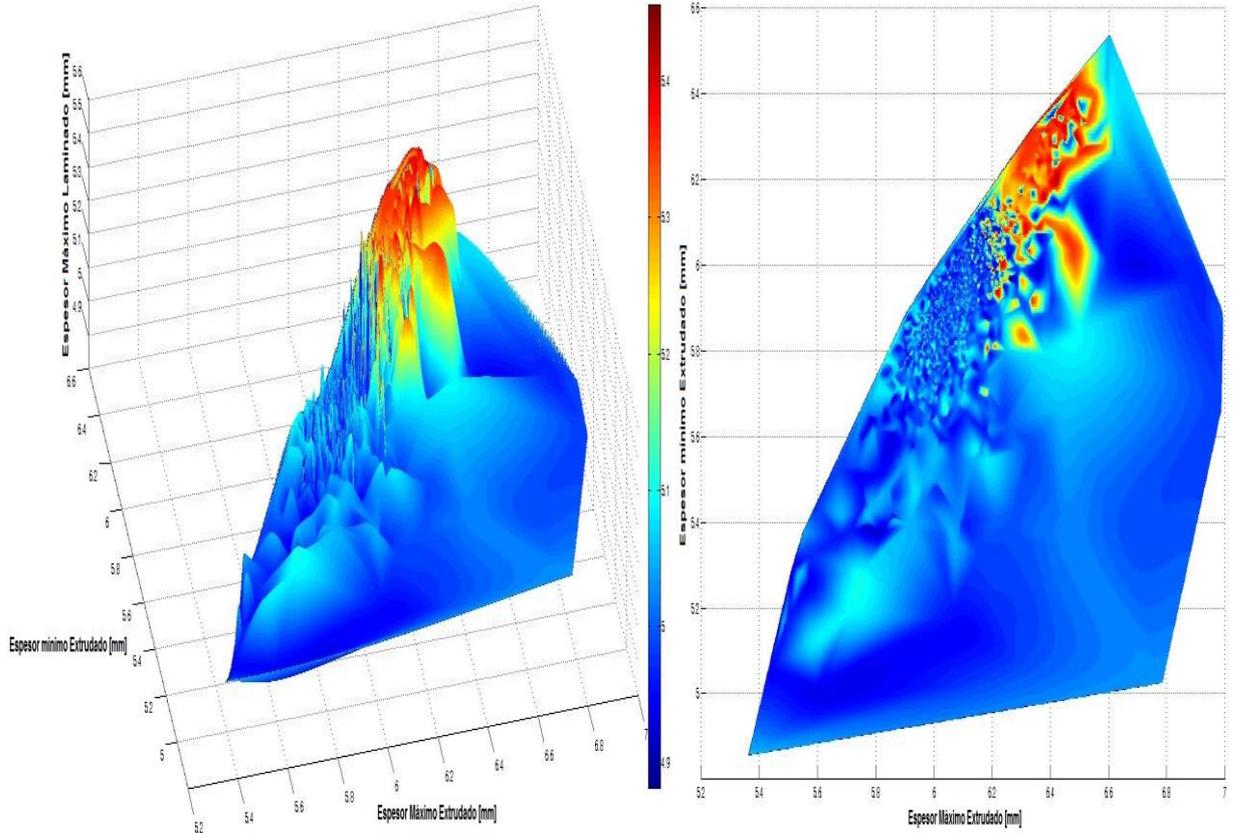


Figura 56 - Espesor Máximo laminado en función de espesores de extrudado

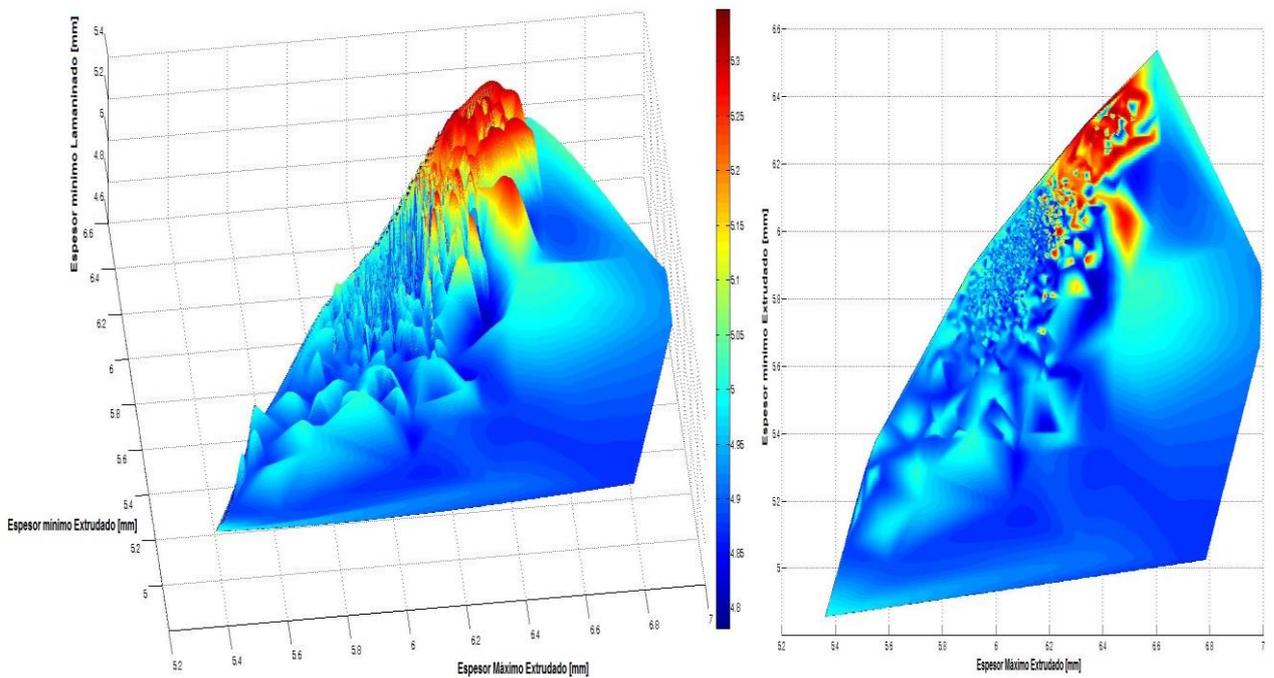


Figura 57 - Espesor mínimo laminado en función de los espesores de extrudado

Tal como lo indica la Figura 58 y la Figura 59, la máxima excentricidad de los tubos laminados no se correlaciona con la máxima excentricidad de los tubos extrudados. En los tubos laminados la zona de mayor excentricidad se ubica alrededor de la zona media de los espesores máximos y mínimos.

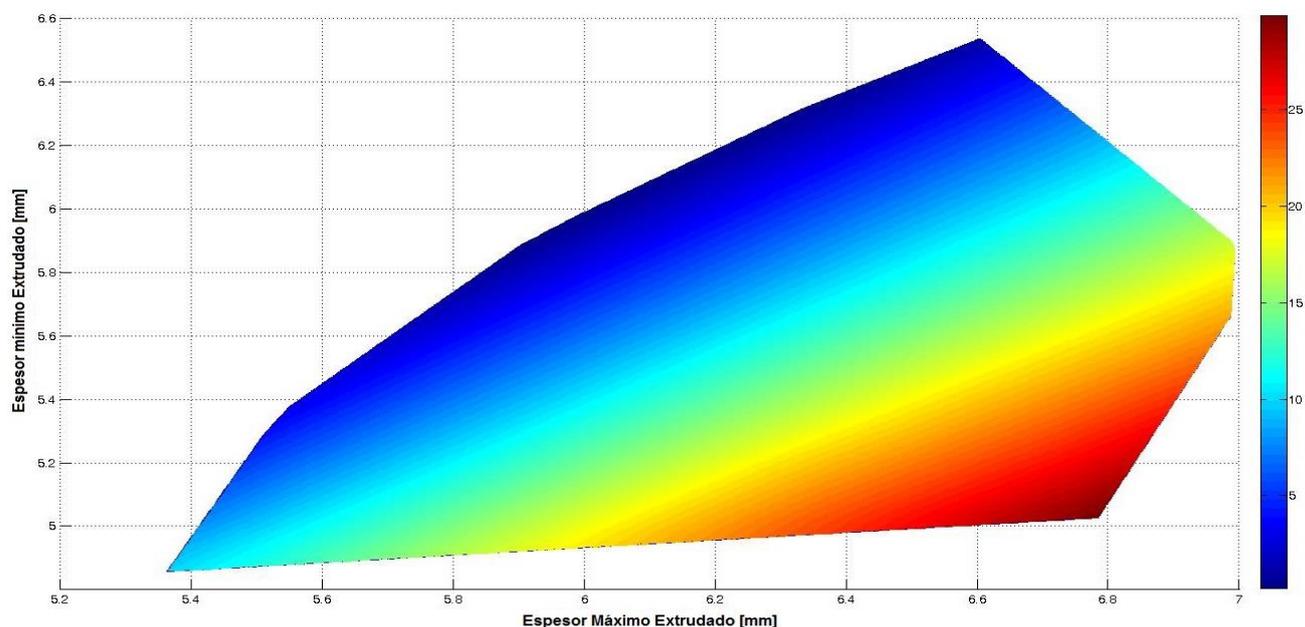


Figura 58 - Excentricidad Extrudado en función de espesores de extrudado

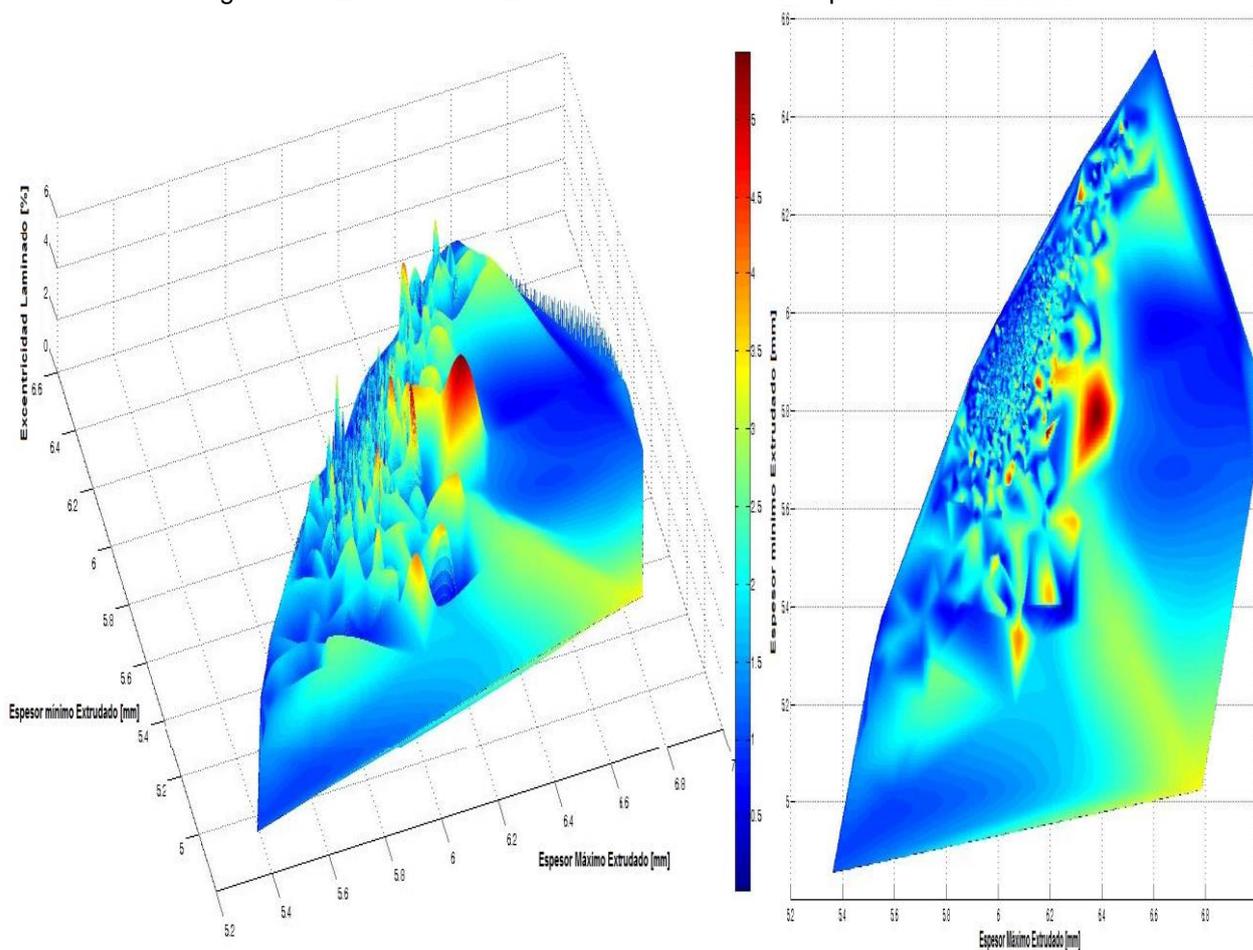


Figura 59 - Excentricidad Laminado en función de espesores de extrudado

Dado que las variaciones en el proceso de producción (que originó la distinción de las 3 secciones estudiadas) no influyen directamente en las variables *Ovalidad* y *Excentricidad*, las cuales dependen fundamentalmente de las diferencias de diámetros y espesores respectivamente, en la Figura 60 y en la Figura 61, tanto para los tubos laminados como para los extrudados, se presentan las ovalidades y excentricidades, discriminadas por posición. Las tendencias observadas en los tubos laminados analizados de manera conjunta son similares a las que se observaron oportunamente para cada sección (apartados 2.8 y 2.9). Notar también la reducción de las magnitudes como consecuencia del proceso estudiado.

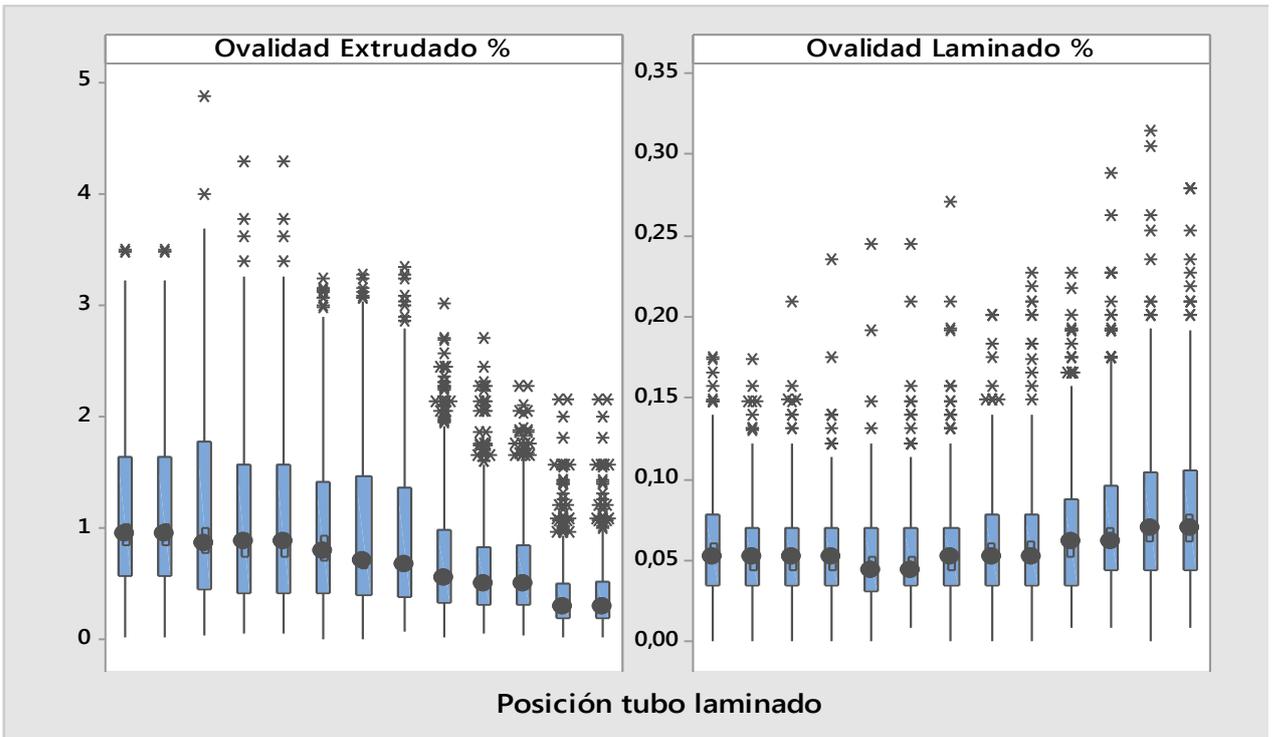


Figura 60 - Ovalidad extrudado y laminado, discriminado por posición

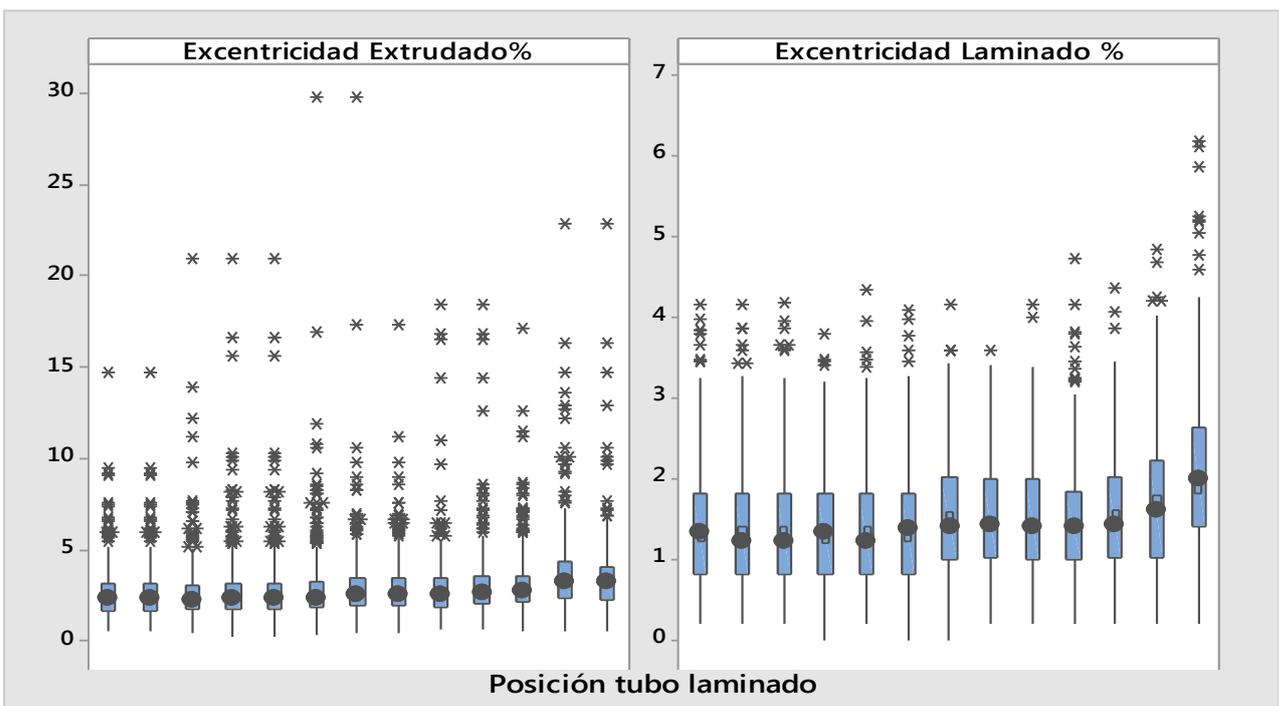


Figura 61 - Excentricidad extrudado y laminado, discriminado por posición

3.2 Análisis Cuantitativo

3.2.1 Cuadro Comparativo de los resultados

	Características		Sección A	Sección B	Sección C	Unidades
Diámetro Máximo	Extrudado	Asimetría	1,25	1,08	0,40	
		Curtosis	1,32	0,72	-0,43	
		Mediana	120,15	199,99	120,55	mm
		MADN	0,521	0,438	0,419	mm
			0,43	0,36	0,35	%
	Laminado	Asimetría	0,33	0,35		
		Curtosis	1,67	0,76		
		Mediana	114,55	114,64		mm
		MADN	0,031	0,038		mm
				0,027	0,033	

Tabla 10 – Diámetro Máximo – Valores de extrudado y laminado

	Características		Sección A	Sección B	Sección C	Unidades
Diámetro mínimo	Extrudado	Asimetría	-0,99	-1,05	-0,49	
		Curtosis	0,63	0,66	-0,29	
		Mediana	119,38	119,33	119,36	mm
		MADN	0,586	0,455	0,627	mm
			0,49	0,38	0,52	%
	Laminado	Asimetría	-0,74	-0,78	-0,68	
		Curtosis	0,36	1,19	0,37	
		Mediana	114,48	114,57	114,87	mm
		MADN	0,043	0,047	0,038	mm
				0,038	0,041	0,033

Tabla 11 – Diámetro mínimo – Valores de extrudado y laminado

	Características		Sección A	Sección B	Sección C	Unidades
Espesor Máximo	Extrudado	Asimetría	-1,20	3,01	-0,024	
		Curtosis	5,95	18,82	-0,53	
		Mediana	6,08	6,04	6,24	mm
		MADN	0,118	0,129	0,076	mm
			1,95	2,13	1,22	%
	Laminado	Asimetría	0,70	0,49	0,75	
		Curtosis	0,45	0,79	0,94	
		Mediana	4,95	4,99	5,28	mm
		MADN	0,025	0,023	0,034	mm
				0,51	0,46	0,64

Tabla 12 – Espesor Máximo – Valores de extrudado y laminado

	Características		Sección A	Sección B	Sección C	Unidades
	Espesor mínimo	Extrudado	Asimetría	-2,32	-1,2	-0,17
Curtosis			8,54	4,17	0,01	
Mediana			5,92	5,86	6,07	mm
MADN			0,142	0,150	0,091	mm
			2,4	2,57	1,49	%
Laminado		Asimetría	-0,31	-0,65	0,11	
		Curtosis	-0,21	0,34	1,01	
		Mediana	4,88	4,92	5,20	mm
		MADN	0,024	0,026	0,026	mm
				0,48	0,52	0,5

Tabla 13 – Espesor mínimo – Valores de extrudado y laminado

	Características		Sección A	Sección B	Sección C	Unidades
	Diámetro Promedio	Extrudado	Asimetría	-0,19	0,04	0,35
Curtosis			3,30	1,62	3,66	
Mediana			119,76	119,66	119,93	mm
MADN			0,211	0,197	0,215	mm
			0,18	0,16	0,18	%
Laminado		Asimetría	-0,72	-0,16		
		Curtosis	0,67	0,57		
		Mediana	114,52	114,61		mm
		MADN	0,027	0,032		mm
				0,024	0,028	

Tabla 14 – Diámetro Promedio – Valores de extrudado y laminado

	Características		Sección A	Sección B	Sección C	Unidades
	Espesor Promedio	Extrudado	Asimetría	-2,19	0,40	0,26
Curtosis			9,41	2,47	-0,46	
Mediana			6,00	5,95	6,16	mm
MADN			0,118	0,125	0,075	mm
			1,97	2,10	1,22	%
Laminado		Asimetría	-0,06	0,04	0,60	
		Curtosis	1,59	2,62	1,68	
		Mediana	4,91	4,95	5,24	mm
		MADN	0,011	0,013	0,018	mm
				0,22	0,26	0,35

Tabla 15 – Espesor Promedio – Valores de extrudado y laminado

	Características		Sección A	Sección B	Sección C	Unidades
	Ovalidad	Extrudado	Asimetría	1,39	1,356	0,47
Curtosis			1,21	1,256	-0,53	
Mediana			0,56	0,52	0,97	%
MADN			0,854	0,665	0,805	%
			151,87	129,17	82,83	%%
Laminado		Asimetría	1,47	1,60		
		Curtosis	2,74	4,41		
		Mediana	0,052	0,061		%
		MADN	0,0448	0,0127		%
			85,42	20,90		%%

Tabla 16 – Ovalidad – Valores de extrudado y laminado

	Características		Sección A	Sección B	Sección C	Unidades
	Excentricidad	Extrudado	Asimetría	2,13	4,55	1,30
Curtosis			6,96	27,95	3,09	
Mediana			2,52	2,63	2,51	%
MADN			1,83	2,14	1,18	%
			72,39	81,34	47,23	%%
Laminado		Asimetría	0,58	0,73	0,41	
		Curtosis	0,08	0,93	-0,28	
		Mediana	1,43	1,42	1,72	%
		MADN	0,847	0,804	0,903	%
			59,75	56,80	52,62	%%

Tabla 17 – Excentricidad – Valores de extrudado y laminado

A partir de los cuadros comparativos presentados se puede concluir que el proceso de laminación, teniendo en cuenta los valores de la MADN porcentual, calculada como $MADN_{\%} = 100 \left(\frac{MADN}{Mediana} \right)$, mejora el desvío de los diámetros en aproximadamente un orden de magnitud (por ejemplo de 0.36% a 0.033%) y los espesores como mínimo un 50% (siendo 70% un valor esperable en la reducción de dispersión).

3.2.2 Consideraciones sobre la capacidad del proceso

Para procesos con comportamiento gaussiano, a fin de relacionar la especificación del cliente con los resultados obtenidos, es una práctica habitual estudiar la denominada Capacidad del Proceso [9][24], definida como:

$$cp = \frac{\text{Tolerancia de especificación}}{6\sigma_{\text{proceso}}}$$

En el proceso estudiado, como se demostró en el apartado 2, las variables medidas no presentan un comportamiento gaussiano, por lo cual la fórmula anterior no sería aplicable. A fin de realizar una aproximación se realizó el cálculo reemplazando los valores de desvío estándar por la MADN (aproximación robusta). Resultando la fórmula:

$$cp_{\text{robusta}} = \frac{\text{Tolerancia de especificación}}{6MADN_{\text{proceso}}}$$

En la Tabla 18 se presentan los resultados de la aproximación propuesta para el estudio de la Capacidad de Proceso.

	Sección A	Sección B	Sección C
Diámetro Máximo	2,651	2,170	2,083
Diámetro mínimo	1,925	1,784	2,182
Espesor Máximo	2,630	2,920	1,972
Espesor mínimo	2,825	2,584	2,541

Tabla 18 – Valores de Capacidad del Proceso (con aproximación robusta)

La bibliografía [24] establece que si $cp > 2$ se considera que el proceso puede ser clasificado como un proceso 6σ , siendo ésta la situación para la mayoría de los casos.

Existe otro índice, el denominado cpk que considera no solo la dispersión respecto de las especificaciones, sino también el hecho que el proceso esté centrado respecto del valor medio de las mismas. Dado que el proceso estudiado ha sido modificado, a lo largo del tiempo, lo que generó las distintas secciones de estudio, Figura 28, no se calcula éste índice: para mejorar el macroproceso de la Figura 1 se determinó la conveniencia que el proceso (primer paso de laminación) no esté centrado respecto de la especificación, sino próximo a su nivel superior.

3.2.3 Análisis Predictivo

Partiendo de la premisa de obtener una función que cumpliera

$$\text{Variable de salida} = f(\text{variables de entrada})$$

Para cada variable de salida, para cada sección, se comprobó que existe una función lineal multivariada del tipo:

$$\text{Variable de Salida} = K_1 + K_2 * \text{Diámetro Máximo Extrudado} + K_3 * \text{Diámetro mínimo Extrudado} + K_4 * \text{Espesor Máximo Extrudado} + K_5 * \text{Espesor mínimo Extrudado} + K_6 * \text{Posición de medición en el tubo laminado}$$

Los valores de las distintas K_i deben ser calculados para cada variable, para cada sección.

Analizando los casos de estudio de este trabajo, se comprobó que la mejor aproximación se obtiene mediante una regresión robusta iterativa de cuadrados mínimos re-pesados (reweighted least squares) con la función de pesos bicuadrada (bisquare weighting function). El algoritmo de Matlab® empleado para obtener las constantes K_i es *robustfit*. Se estudió también una aproximación multivariada ordinaria, empleando la función *mvregress* sin obtener resultados mejores a los logrados con la aproximación robusta.

A medida que se emplean mayor cantidad de datos de entrada para calcular las K_i (es decir mayor cantidad de mediciones en tubos) la aproximación mejora, existiendo siempre una tendencia asintótica.

A fin de obtener una mejor aproximación, en particular para una pequeña cantidad de tubos se verificó que los datos de entrada deberán estar libres de outliers (es decir los tubos outlier de extrudado, estudiados en el apartado 1). En todos los casos, para grandes cantidades de tubos las aproximaciones multivariadas robustas y convencionales son similares, siendo preferible la aproximación robusta para pequeña cantidad de tubos de entrada.

A modo de ejemplo, para la variable *Diámetro Máximo* de la sección A, para distintas cantidades de tubos (3, 6, 9, etc.) se calcularon las distintas K_i , luego con estas constantes se calculó el valor de la variable de salida para la totalidad de la sección. Al valor calculado de la variable de salida se le restó el valor real medido, obteniendo así los residuos de la aproximación. Para $n=15$ tubos (solo a fines de presentar un caso) utilizados para calcular las constantes K_i , los residuos de la totalidad de la sección presentan una distribución como la indicada en la Figura 62.

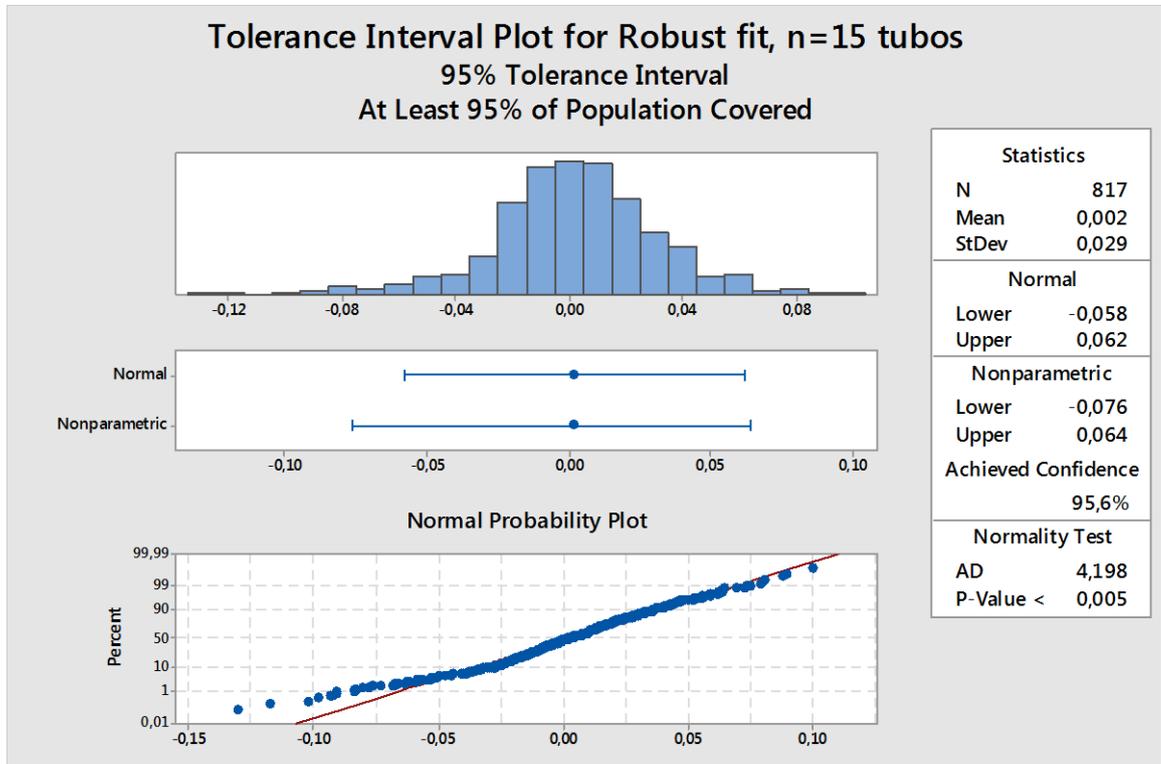


Figura 62 – Sección A – Diámetro Máximo - Residuos Ajuste robusto multivariante $n=15$ tubos

Si bien no se puede asumir una distribución normal de estos residuos (con un nivel de confianza del 95%), la forma de la distribución (tanto en el histograma como en el gráfico de probabilidad) podría sugerir un comportamiento similar de los mismos, en particular en la zona central (media cero).

A fin de comparar las distintas aproximaciones, se toma el desvío estándar de la aproximación (0.029 mm en el ejemplo anterior) y se realizan los gráficos con los distintos cálculos.

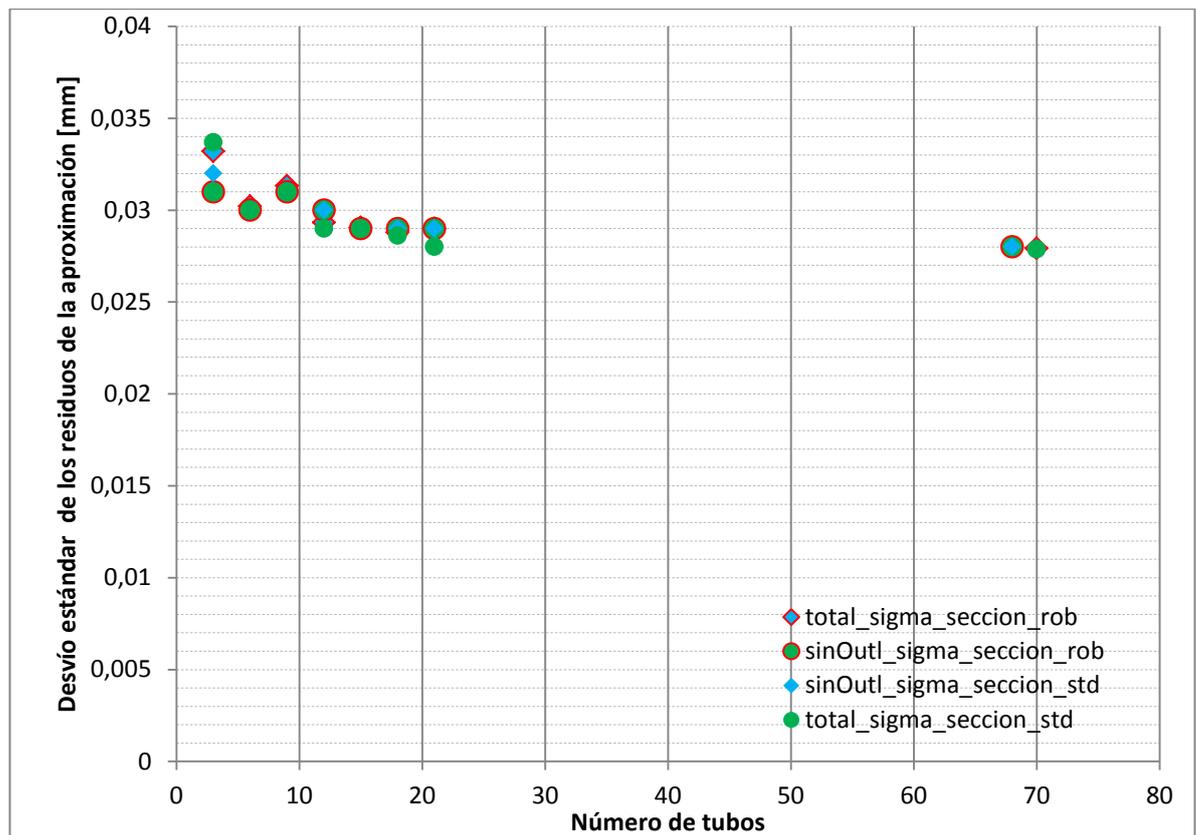


Figura 63 – Diámetro Máximo – Sección A - Residuos de la variable *Diámetro Máximo*

En el gráfico de la Figura 63 se observa que para grandes cantidades de tubos la aproximación es similar (mismos residuos), ya sea empleando aproximación robusta o convencional, utilizando o no los tubos extrudados outliers. Para pequeñas cantidades de tubos, la mejor aproximación resulta ser la aproximación robusta sin outliers en los extrudados (indicada como “sinOutl_sigma_seccion_rob”).

Se realizó el estudio mediante otras aproximaciones robustas, utilizando distintas funciones para los pesos, específicamente la de Welsch, la de Andrews con una constante de sintonización de 5 y la de cuadrados mínimos ordinarios (que no posee función para los pesos), obteniéndose resultados similares.

También se estudió la posibilidad de incorporar términos adiciones en la ecuación propuesta que contemplen la interacción de las variables sin obtener resultados significativamente mejores para todas las secciones.

Para todas las variables medidas, para todas las secciones, las tendencias de los gráficos son similares a la presentada en la Figura 63.

A fin de evaluar otra aproximación, partiendo de la premisa de la independencia de las variables de salida respecto de las entradas, se aproximó con la siguiente función

$$\text{Variable de Salida} = K$$

El resultado óptimo de la constante resultó ser el valor de la mediana de los valores de la variable de salida. En todos los casos la mediana obtenida de las mediciones de más de 15 tubos permite obtener residuos similares a los de la Figura 64.

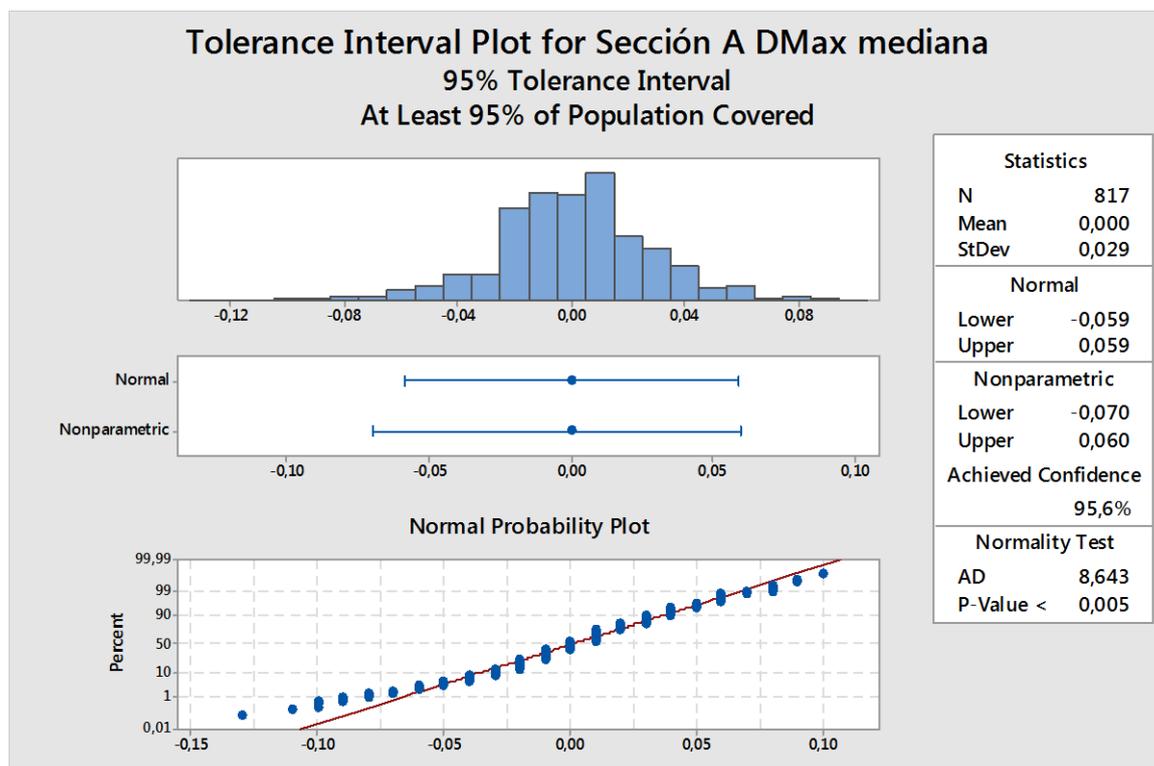


Figura 64 – Sección A - Diámetro Máximo - Residuos de aproximación constante

En todos los casos se obtuvieron desvíos estándar similares a los de la aproximación multivariada en relación con la aproximación constante. Las formas de los residuos y el gráfico de normalidad también presentaron formas similares en todos los casos.

Dado que una regresión lineal robusta multivariable genera residuos similares a los generados por una función constante, cuyo valor se obtiene a partir de la mediana de los datos de la variable bajo estudio, surge la duda de si la ecuación multivariada solo considera como ruido a las variables de entrada. Para analizar esta situación, para todos los casos, se reemplazaron los valores de las entradas reales por valores aleatorios (en el rango de los valores reales de entrada), se calculó el valor predicho con las entradas aleatorias, se calcularon los residuos respecto de los valores reales de salida y se analizó el desvío de los mismos.

En la Tabla 19 se presenta el resumen de los valores de los residuos obtenidos para los distintos casos: aproximación multivariable (utilizando la fórmula propuesta al principio de este apartado), aproximación constante con la mediana de los datos de salida y aproximación multivariable con datos de entrada aleatorios.

		Sección A		Sección B		Sección C	
		Desvío Std	Media	Desvío Std	Media	Desvío Std	Media
$\varnothing_{Máx}$	Multivariada	0,029	0,002	0,036	-0,014		
	Mediana	0,029	0,000	0,034	-0,006		
	Entradas aleatorias	0,034	0,013	0,047	-0,015		
\varnothing_{min}	Multivariada	0,037	0,006	0,039	-0,009	0,031	0,007
	Mediana	0,036	0,005	0,041	-0,008	0,033	0,007
	Entradas aleatorias	0,043	0,005	0,059	-0,016	0,037	0,004
$\tau_{Máx}$	Multivariada	0,02	-0,002	0,02	-0,003	0,028	-0,003
	Mediana	0,021	-0,003	0,02	-0,001	0,029	-0,005
	Entradas aleatorias	0,043	0,018	0,039	-0,002	0,042	0,001
τ_{min}	Multivariada	0,018	0,004	0,021	-0,011	0,022	0,004
	Mediana	0,019	0,011	0,021	-0,05	0,022	0,004
	Entradas aleatorias	0,041	-0,011	0,04	-0,002	0,026	0,001
Valores en mm							

Tabla 19 – Desvíos de los residuos de las distintas aproximaciones

Teniendo en cuenta la aproximación multivariada, a fin de comparar si las desviaciones estándar difieren significativamente con y sin entradas aleatorias, se empleó el contraste F de dos colas, obteniendo siempre diferencias significativas [22]. Se realizó también el contraste t para datos emparejados, obteniendo que las medias son similares únicamente para las variables *Diámetro Máximo* en la Sección B, *Diámetro mínimo* en la Sección A y *Espesor Máximo* en la sección B. De estos resultados se concluye que en el modelo multivariado las variables de entrada sí influyen en las salidas.

También es de notar que las diferencias entre las aproximaciones se encuentran dentro del mismo orden de magnitud, por lo tanto podría concluirse que las variables de salida son prácticamente independientes de las entradas; el empleo de una aproximación multivariada produce residuos con una distribución más próxima a una gaussiana que la aproximación a partir de la mediana de los valores de salida (se aprecia en la forma de los histogramas de la Figura 62 y la Figura 64).

Si bien la dependencia de los valores de salida respecto a los valores de entrada es mínima, puede apreciarse en las tendencias en los gráficos de caja y bigotes por posiciones de los tubos laminados, recordando que la materia prima posee sus propias tendencias espaciales. También pudo observarse en el apartado 2 de este trabajo, en donde se determinó que la varianza de las variables de salida mayoritariamente depende de los billets de la materia prima.

A modo de resumen conviene destacar la siguiente particularidad: si bien las ecuaciones multivariadas y las constantes producen resultados similares, ambas no son equivalentes entre sí. La ecuación multivariada depende de los datos de las entradas y la salida para calcular las distintas K_i , mientras que la ecuación constante solo requiere los datos de la salida (con los cuales se calcula el valor de la mediana).

Dado el nivel de precisión de los datos empleados, se estudió la posibilidad de realizar un preprocesamiento de los datos empleando la transformada de Box-Cox [6], no habiéndose obtenido resultados de mejor calidad.

3.2.3.1 Relación con la Incertidumbre de la medición

La incertidumbre de las aproximaciones puede calcularse como [21]

$$u_{\text{aproximación}} = \sqrt{\frac{\sum(\text{residuos})^2}{n}}$$

Siendo n el número de muestras. Esta aproximación es válida si los residuos presentan una distribución gaussiana. En los casos estudiados las distribuciones no son estrictamente gaussianas, pero sí presentan una distribución similar, como se presenta a modo de ejemplo en la Figura 68.

En la Tabla 20 se presentan las distintas incertidumbres calculadas, habiendo utilizado los valores de la totalidad de los tubos en cada sección para determinar las ecuaciones de aproximación.

Variable	Aproximación	Sección A		Sección B		Sección C	
		Desvío Std	n	Desvío Std	n	Desvío Std	n
$\varnothing_{M\acute{a}x}$	Multivariada	0,0281	817	0,0333	1170		
	Mediana	0,0288		0,0341			
\varnothing_{min}	Multivariada	0,0343		0,0375		0,0314	284
	Mediana	0,0364		0,0413		0,0335	
$\tau_{M\acute{a}x}$	Multivariada	0,0181		0,0183		0,0277	
	Mediana	0,0214		0,0197		0,0297	
τ_{min}	Multivariada	0,0169		0,0192		0,0219	
	Mediana	0,0192		0,0215		0,0228	
Incertidumbres en mm							

Tabla 20 – Incertidumbres de las aproximaciones

Teniendo en cuenta la aproximación constante

$$\text{Variable predicha} = K = \text{Mediana (n mediciones)}$$

$$u_{\text{aproximación}}^2 = u_K^2 + u_{\text{modelo}}^2 = u_{\text{Mediana (n mediciones)}}^2 + u_{\text{modelo}}^2$$

Considerando que

$$u_{\text{Mediana (n mediciones)}}^2 = u_{\text{Mediana}}^2 + u_{\text{Medición}}^2$$

De la bibliografía [16] se obtiene que

$$\text{Varianza}(\text{mediana}) = \frac{\pi \sigma^2}{2 n}$$

Recordando que para comparar σ debe usarse el valor de la MADN

$$s^2(\text{mediana}) = u_{\text{Mediana}}^2 = \frac{\pi \text{MADN}^2}{2 n}$$

$$u_{\text{aproximación}}^2 = u_{\text{Mediana}}^2 + u_{\text{Medición}}^2 + u_{\text{modelo}}^2 = \frac{\pi \text{MADN}^2}{2 n} + u_{\text{Medición}}^2 + u_{\text{modelo}}^2$$

$$u_{\text{aproximación}} = \sqrt{\frac{\sum(\text{residuos})^2}{n}} = \sqrt{\frac{\pi \text{MADN}^2}{2n} + u_{\text{Medición}}^2 + u_{\text{modelo}}^2}$$

Para la predicción de **diámetros**, de la bibliografía [8], la incertidumbre de la medición es

$$u_{\phi_{\text{Máx}}} = 0,024 \text{ mm} \text{ y } u_{\phi_{\text{mín}}} = 0,013 \text{ mm}$$

Sin considerar la incertidumbre del modelo, para la mejor aproximación de predicción de diámetros (diámetro máximo, sección A)

$$\sqrt{\frac{\sum(\text{residuos})^2}{n}} \cong \sqrt{\frac{\pi \text{MADN}^2}{2n} + u_{\text{Medición}}^2}$$

Utilizando los valores de la MADN resumidos en la Tabla 10 a Tabla 13

$$0.0288 \text{ mm} \cong \sqrt{\frac{\pi 0.03158^2}{2 \cdot 817} + 0.024 \text{ mm}^2} \cong 0.0240 \text{ mm}$$

La incertidumbre del modelo resulta por lo tanto 0,016 mm

Para la peor aproximación (diámetro mínimo, sección B)

$$0.0413 \text{ mm} \cong \sqrt{\frac{\pi 0.04759^2}{2 \cdot 1170} + 0.013 \text{ mm}^2} \cong 0.0131 \text{ mm}$$

La incertidumbre del modelo resulta por lo tanto 0,039 mm

Para el caso de los **espesores**, de la bibliografía citada, la incertidumbre de la medición resulta

$$u_{\tau_{\text{Máx}}} = 0,0055 \text{ mm} \text{ y } u_{\tau_{\text{mín}}} = 0,0078 \text{ mm}$$

Por lo tanto, para la mejor aproximación de predicción de espesores (espesor mínimo, sección A)

$$0.0192 \text{ mm} \cong \sqrt{\frac{\pi 0.0236^2}{2 \cdot 817} + 0.0078 \text{ mm}^2} \cong 0.0079 \text{ mm}$$

La incertidumbre del modelo resulta 0,017 mm

Para la peor aproximación (espesor máximo, sección C)

$$0.0297 \text{ mm} \cong \sqrt{\frac{\pi 0.03380^2}{2 \cdot 284} + 0.0055 \text{ mm}^2} \cong 0.006 \text{ mm}$$

Por lo que la incertidumbre del modelo resulta 0,029 mm

Observando los resultados, como es esperable, siempre la incertidumbre de la aproximación es mayor que la incertidumbre de la medición de los valores que generaron esa aproximación.

En el caso de los diámetros, la incertidumbre de la aproximación se encuentra siempre en el mismo orden de magnitud de la incertidumbre de la medición; en la mejor aproximación, la

incertidumbre del modelo es menor a la incertidumbre de la medición. En el caso de los espesores, la incertidumbre de la medición siempre es menor al resto de las incertidumbres.

Dado que, como se indicó, los residuos de las aproximaciones no presentan distribuciones estrictamente gaussianas, tanto las incertidumbres de las aproximaciones, como las incertidumbres de los modelos son levemente diferentes (mayores) a los valores calculados.

Puede concluirse que la incertidumbre de la aproximación puede estar influida por la incertidumbre de la medición, por lo tanto es recomendable que ésta última sea adecuada a los valores deseados para la aproximación. Siempre resultó la incertidumbre de la aproximación multivariada menor que la incertidumbre de la aproximación constante (aunque muy próxima), por lo que la conclusión anterior resulta válida también para el caso multivariado.

3.2.3.2 Aproximación por Redes Neuronales Artificiales

Teniendo en cuenta que las variables de entrada no se comportan de manera gaussiana, también se realizaron estudios con redes neuronales artificiales (ANN – Artificial Neural Networks) tipo backpropagation (Feed-forward Backpropagation, Cascade-forward Backpropagation, Elman Backpropagation) con distintas configuraciones de capas (entre 2 y 6 capas ocultas), distintas cantidad de neuronas y distintos algoritmos de entrenamiento [25].

Los datos de entrada se organizaron del mismo modo que para el cálculo de la función multivariable, es decir matrices de 5 columnas (correspondientes a las mediciones de diámetro máximo de extrudado, diámetro mínimo extrudado, espesor máximo de extrudado, espesor mínimo de extrudado, posición del tubo laminado a predecir) cuyas filas corresponden a cada medición de los datos de entrada.

Tal como es habitual en redes neuronales, los datos fueron preprocesados, autoescalando los datos de entrada y escalando las salidas entre los valores 0 y 1.

Para el entrenamiento de estas redes, a fin de seleccionar cuáles datos de entrada se utilizarían para entrenamiento y cuáles para validación, se utilizaron los algoritmos propuestos por Kennard and Stone y por Magallanes [17].

En todos los casos, los resultados obtenidos mediante las configuraciones de redes neuronales estudiadas son menos precisos que por regresión robusta.

A modo de ejemplo, prediciendo el Diámetro Máximo laminado de la sección A, empleando una red feed-forward del tipo indicado en la Figura 65, cuya salida se indica en la Figura 66, se obtienen los residuos que se muestran en la Figura 67. Para los mismos datos, la distribución de los residuos obtenidos mediante una aproximación multivariable robusta empleando la totalidad de los tubos de la sección para calcular los K_i es la indicada en la Figura 68.

Comparando los resultados se concluye que la aproximación multivariable robusta resulta más precisa que la realizada por redes neuronales artificiales (desvíos estándar más pequeños y media próxima a 0).

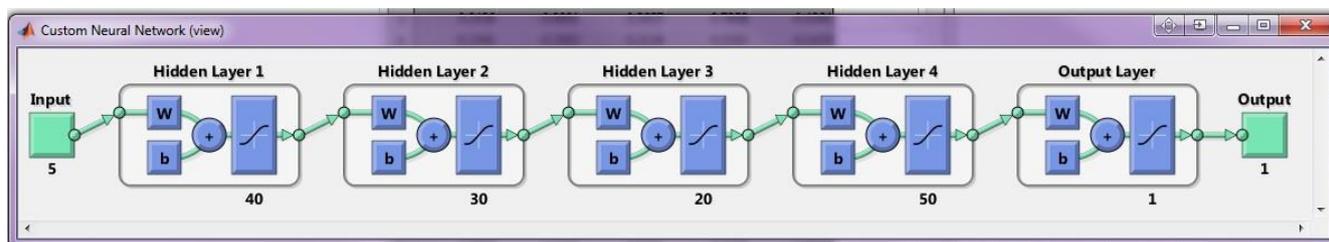


Figura 65 – Modelo de una red neuronal artificial utilizado

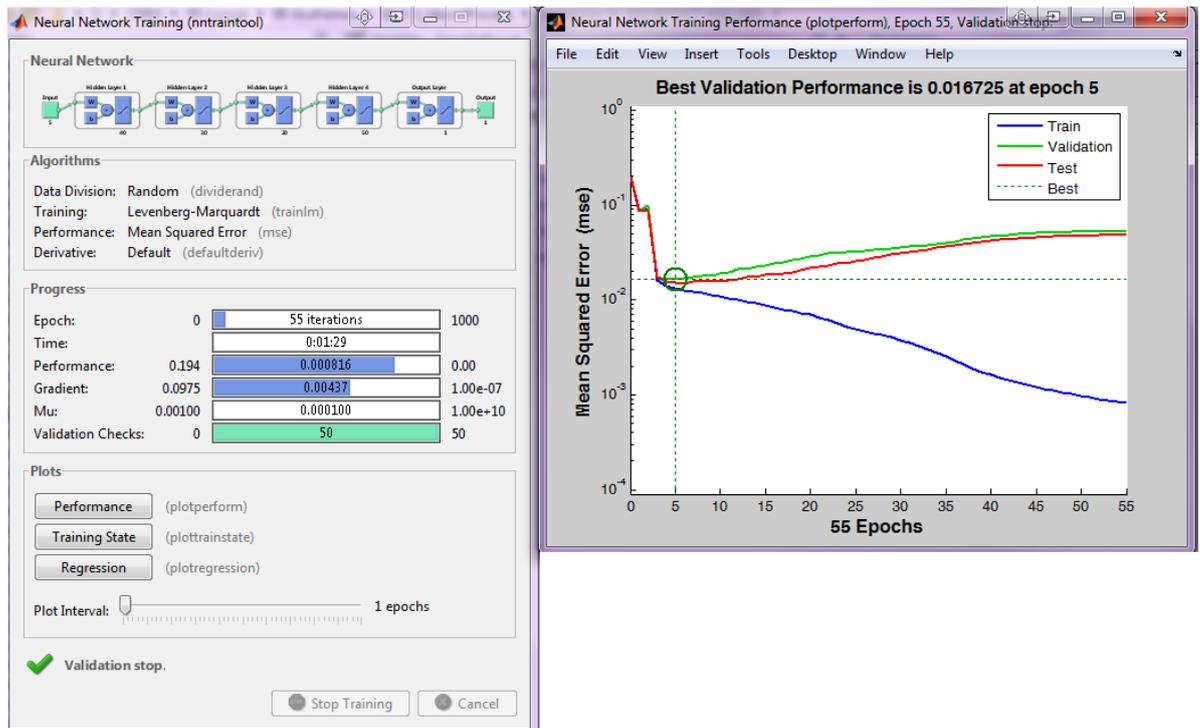


Figura 66 – Resultado de la red neurona feed forward

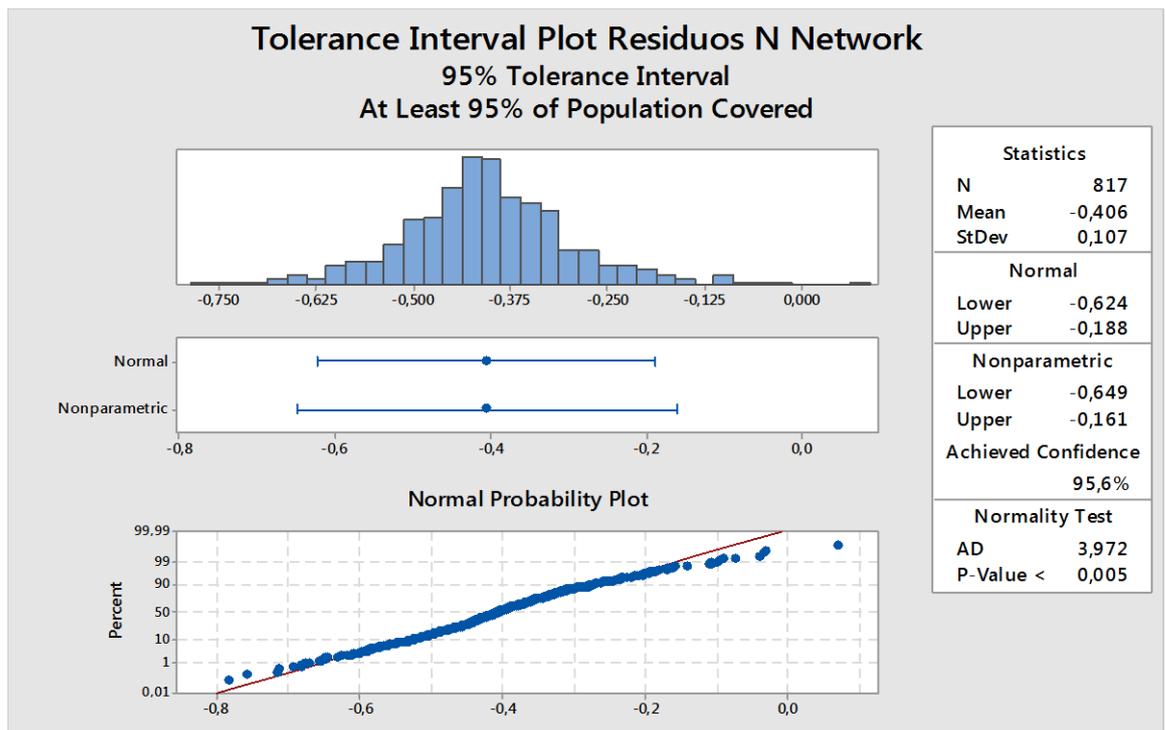


Figura 67 – Residuos de una aproximación con ANN

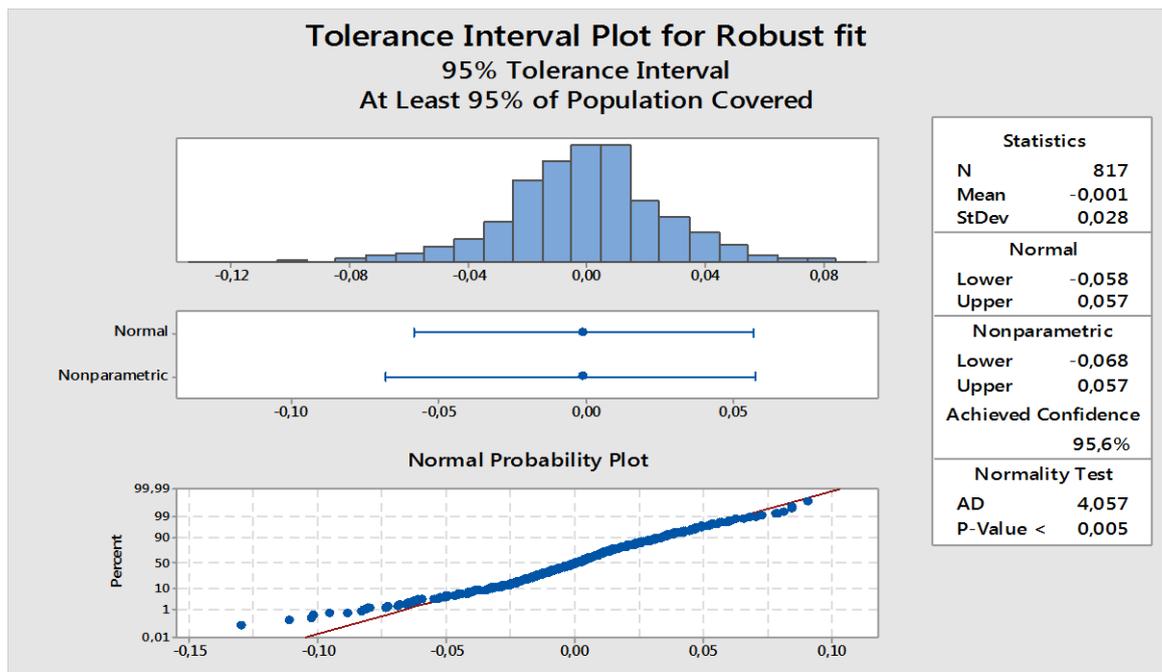


Figura 68 – Residuos con aproximación multivariable robusta

3.2.4 Análisis Predictivo – Carta de Control

Dado que, como se indica en el apartado 3.2.3, es posible realizar una aproximación matemática para cada variable, se estudió la construcción de cartas de control a partir de los valores de una cantidad reducida de tubos. Cabe aclarar que para que las siguientes conclusiones sean válidas, es necesario mantener el proceso estable (es decir que no puedan diferenciarse secciones), de lo contrario, los valores a la salida del proceso serían indicados como outliers.

Para la construcción de la carta de control la condición preliminar es no utilizar valores de medias y desvíos estándar, ya que como se demostró, las variables de estudio no pueden ser representadas por una distribución gaussiana.

El método propuesto consiste en analizar los valores de la materia prima, separar los tubos outliers, laminar un número n de tubos libres de outliers de extrudado (n preferentemente mayor a 15; no menor), luego con los valores de las variables de entrada y los valores de la variable de salida de interés (diámetro máximo, diámetro mínimo laminado, espesor máximo laminado, espesor mínimo laminado) realizar una aproximación robusta obteniendo:

- Las distintas constantes K_i de la ecuación indicada en el apartado 3.2.3
- La mediana de las mediciones de la variable de interés y su MADN

Luego es posible construir dos tipos de cartas de control:

- Con límites globales (aproximación mediante función constante):
 - Calculando los límites de control como la mediana $\pm 3 * MADN$
 - Calculando los límites de advertencia como la mediana $\pm 2 * MADN$
- Con límites puntuales (aproximación por función multivariada):
 - Calculando los límites de control con la variable de salida predicha empleando la fórmula indicada en el apartado 3.2.3 y los K_i calculados $\pm 3 * MADN$
 - Calculando los límites de advertencia con la variable de salida predicha empleando la fórmula indicada en el apartado 3.2.3 y los K_i calculados $\pm 2 * MADN$

Este proceso para calcular los límites de la carta de control se debe realizar para cada variable medida de manera independiente y cada vez que sean modificadas las condiciones de estabilidad del proceso.

A modo de ejemplo, para la sección A, para la variable Diámetro Máximo, a partir de los diámetros máximos de los primeros 15 tubos (181 mediciones, aproximadamente 5 días de laminación) se obtuvo:

- Mediana de los valores Diámetro Máximo Laminado: 114,55 mm
- MADN de los valores Diámetro Máximo Laminado: 0,0267 mm

Función de predicción (obtenida mediante *robustfit*, propuesta en el apartado 3.2.3)

$$\begin{aligned} \text{Diámetro Máximo Laminado [mm]} = & 117,5755 - 0,01268 * \text{Diámetro Máximo Extrudado [mm]} - \\ & 0,01388 * \text{Diámetro mínimo Extrudado [mm]} + 0,04208 \\ & \text{Espesor Máximo Extrudado [mm]} - 0,0167 \text{ Espesor mínimo} \\ & \text{Extrudado [mm]} + 9,54E-09 * \text{Posición de medición en el} \\ & \text{tubo laminado [mm]} \end{aligned}$$

- Para una carta de control con límites globales, éstos serían:
 - Límite superior de control = $114,55 \text{ mm} + 3 * 0,0267 \text{ mm} = 114,630 \text{ mm}$
 - Límite inferior de control = $114,55 \text{ mm} - 3 * 0,0267 \text{ mm} = 114,4700 \text{ mm}$
 - Límite superior de advertencia = $114,55 \text{ mm} + 2 * 0,0267 \text{ mm} = 114,603 \text{ mm}$
 - Límite inferior de advertencia = $114,55 \text{ mm} - 2 * 0,0267 \text{ mm} = 114,497 \text{ mm}$

La carta resultante es la presentada en la Figura 69.

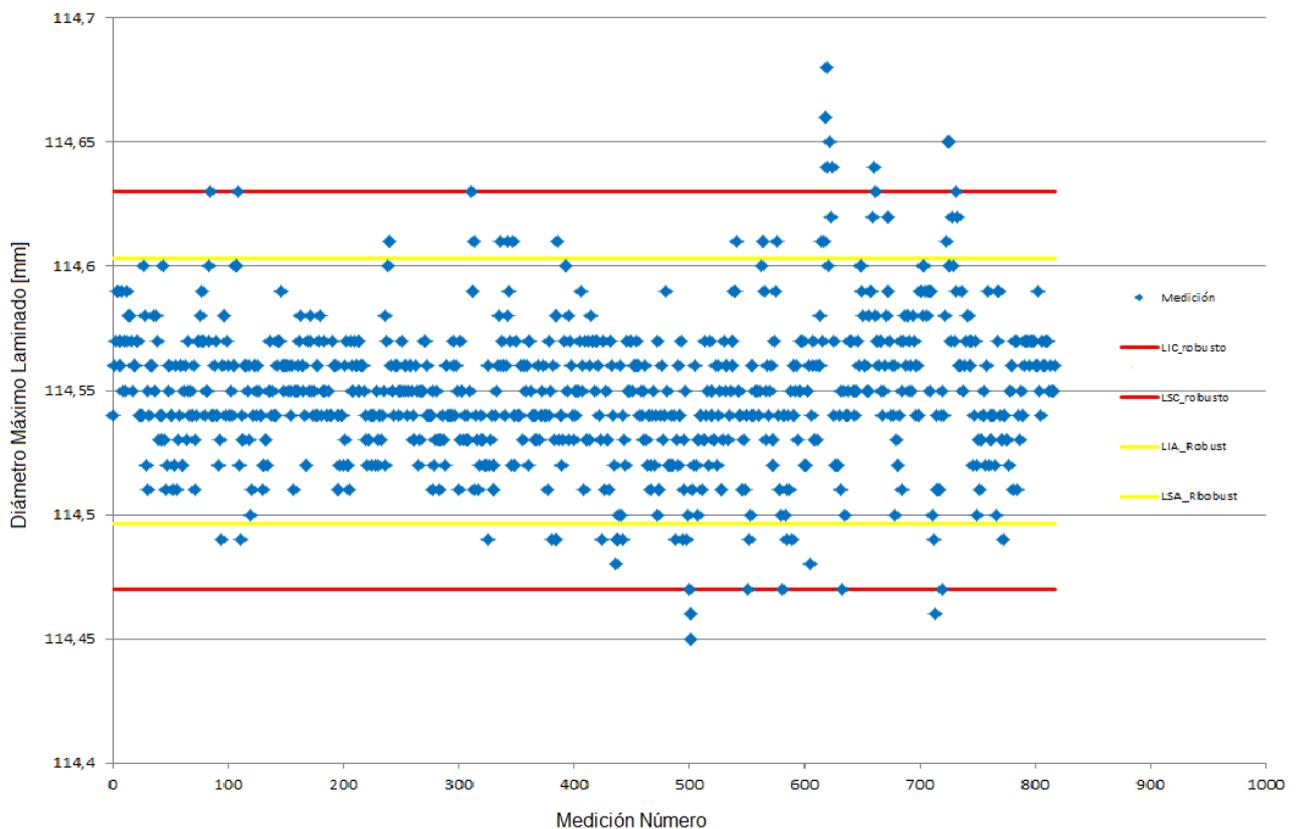


Figura 69 – Sección A – Diámetro Máximo Laminado - Carta de Control – Límites globales

Si se calcularan los límites puntuales, la carta resulta ser la presentada en la Figura 70.

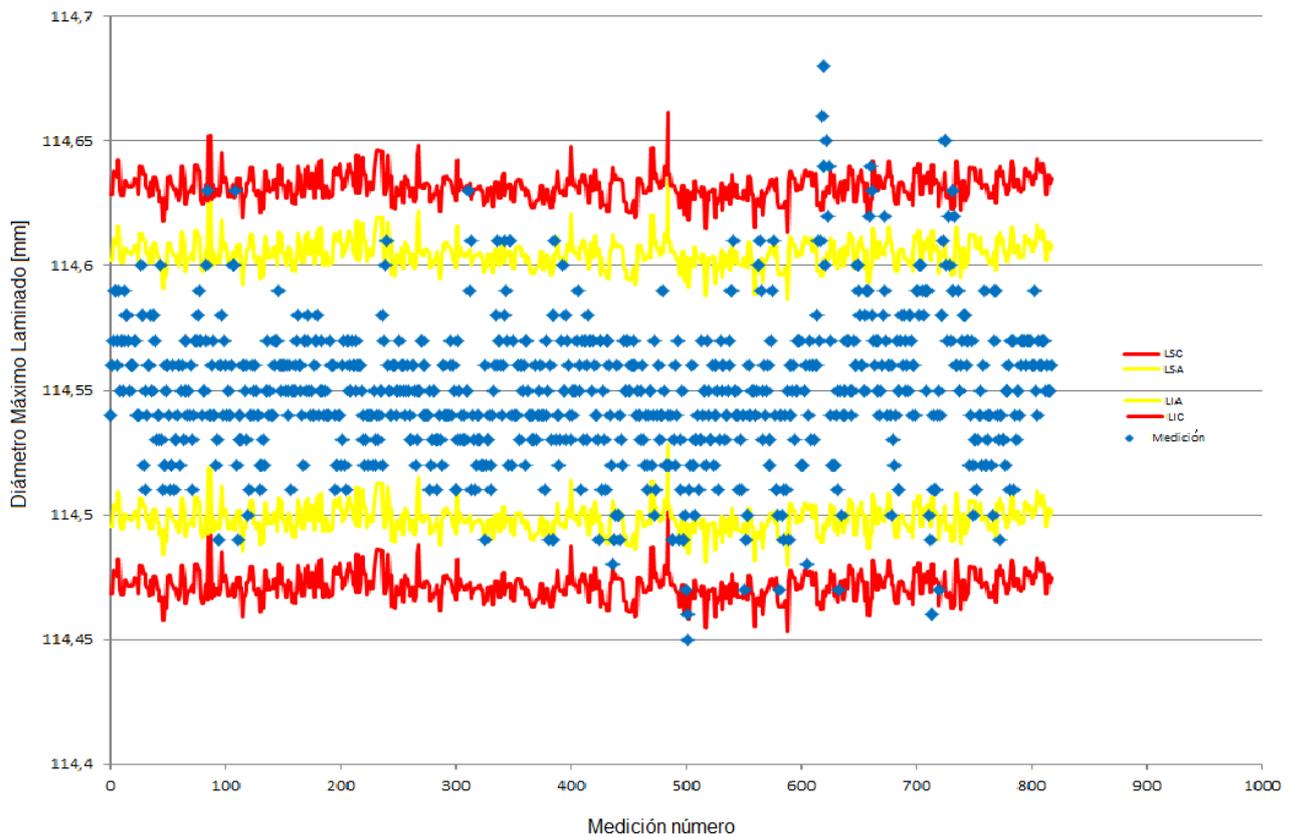


Figura 70 – Sección A – Diámetro Máximo Laminado - Carta de Control – Límites puntuales

En la Figura 71 se presenta la carta de control con los límites calculados mediante los dos procedimientos descritos, con los valores predichos y con la identificación correspondiente a los outliers.

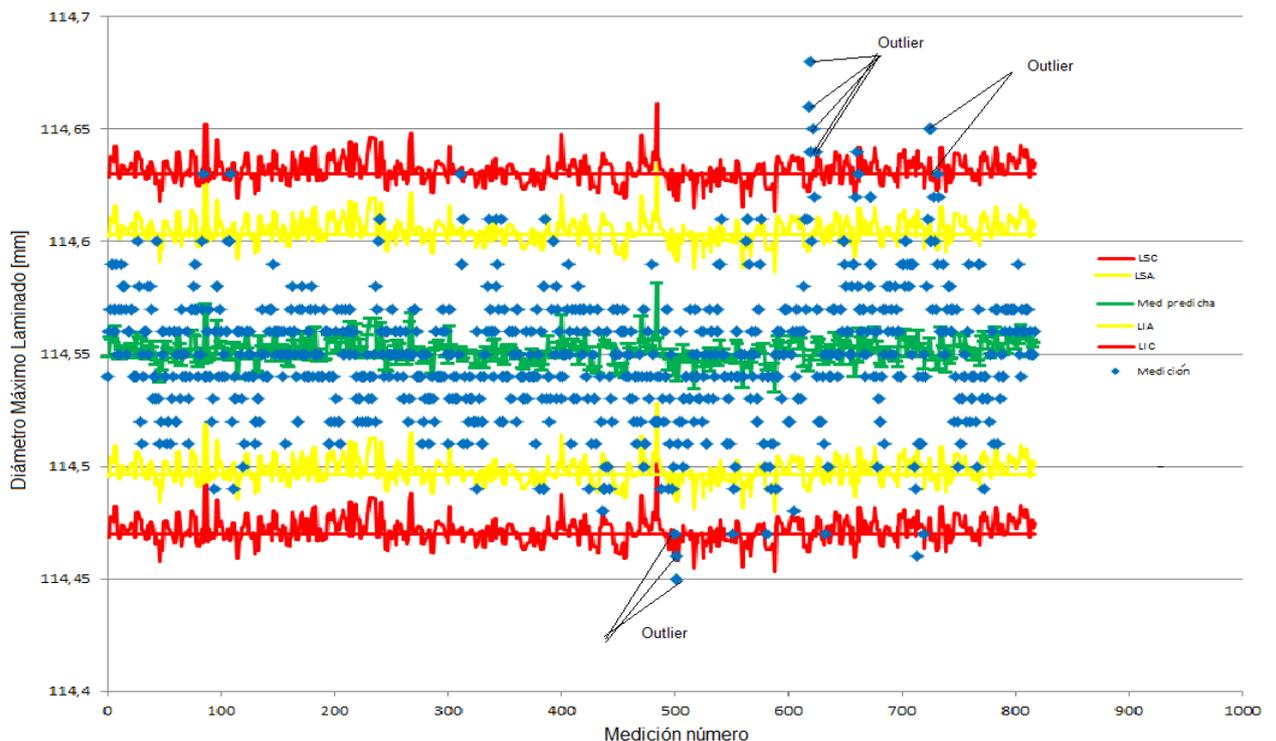


Figura 71 – Sección A – Diámetro Máximo Laminado - Carta de Control - Total

En todas las secciones, para todas las variables, empleando este método fueron identificados en la carta todos los outliers detectados en el apartado 2 de este trabajo, con la diferencia que para el cálculo hecho en el apartado 2 se emplearon los valores de toda la sección y en este caso solo 15 tubos (para la sección B fueron necesarios 18 tubos).

En la Figura 71 también se puede visualizar que un falso positivo, es decir mediciones consideradas outliers cuando no lo son, empleando los límites puntuales no es considerado como tal.

Si luego de establecer los límites se lamina un tubo extrudado considerado outlier, en algunos casos, a partir de los límites puntuales se puede identificar en el gráfico de control el outlier de la materia prima, como se visualiza, a modo de ejemplo, la Figura 72. Esto es posible ya que si el valor de alguna de las variables de entrada difiere significativamente del resto de los valores (lo cual lo convierte en outlier), la función de aproximación al utilizar este valor anómalo reflejará la irregularidad en el valor predicho.

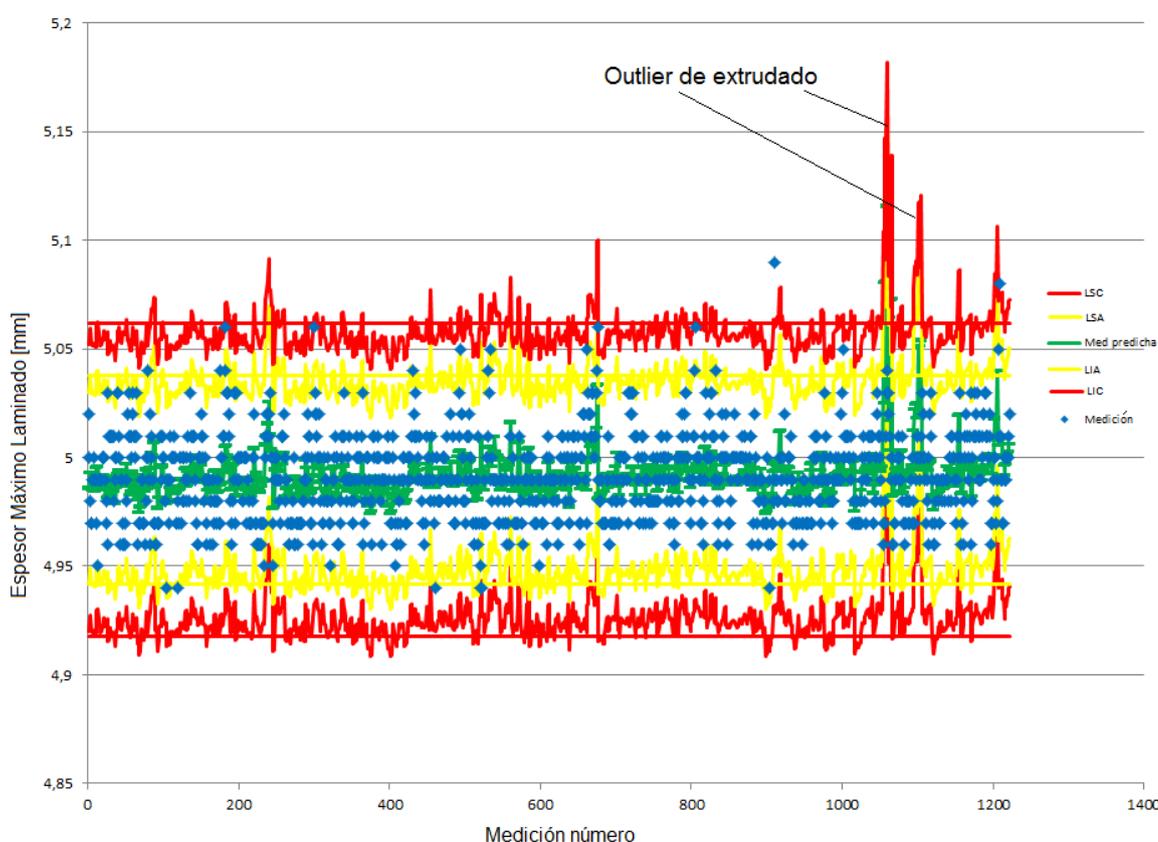


Figura 72 - Sección B – Espesor Máximo Laminado - Carta de Control – Límites puntuales y globales

Cabe destacar que la MADN empleada para calcular los límites, al igual que el desvío de los residuos de la aproximación, presenta un comportamiento asintótico a medida que se incrementa la cantidad de tubos empleados para la predicción.

En la Figura 73, a modo de ejemplo, se presenta lo analizado para la variable Espesor Máximo Laminado de la Sección B. Como puede observarse, si emplean todos los tubos de la sección, la MADN (0,0228 mm) coincide con el valor indicado en la Tabla 12. Cabe aclarar que este valor de MADN fue calculado excluyendo los tubos extrudados considerados outliers y en la tabla referenciada no. Esta coincidencia (o proximidad, en algunos casos) de valores radica en dos hechos:

1. Solamente en un caso, el proceso de laminación produjo un tubo laminado considerado outlier, siendo también outlier el extrudado.
2. La estadística robusta evita la influencia de los valores extremos.

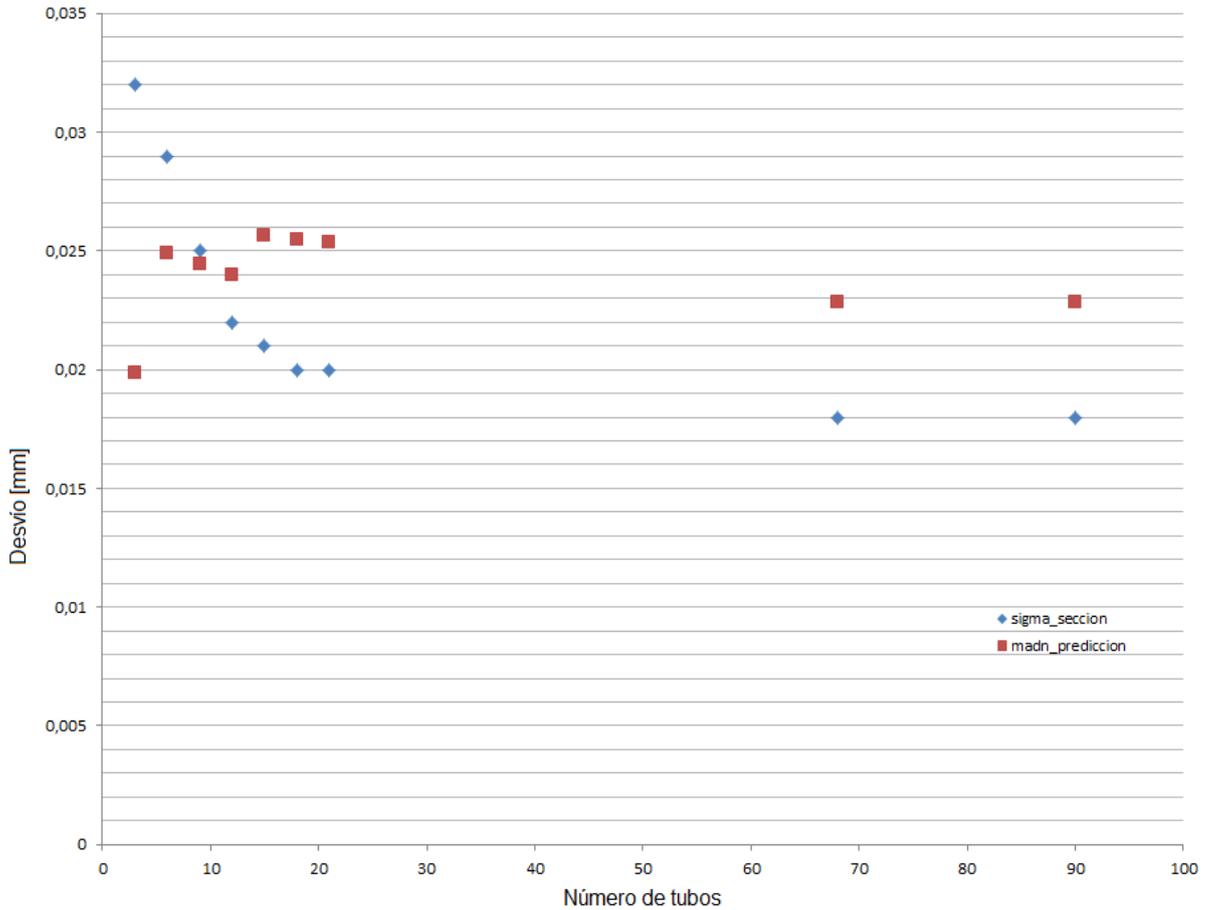


Figura 73 - Sección B - Espesor Máximo – MADN y desvío estándar de aproximación

Partiendo de la misma cantidad de tubos (15), con el software Minitab® se probó emplear cartas de control, siendo la mejor aproximación, entre todas las posibles, la obtenida empleando la carta de control para observaciones individuales, y configurando la estimación de los límites a partir de un rango móvil promedio cuyo largo es de 100 observaciones (máximo posible) como se indica en la Figura 74, siendo el resultado obtenido el presentado en la Figura 75.

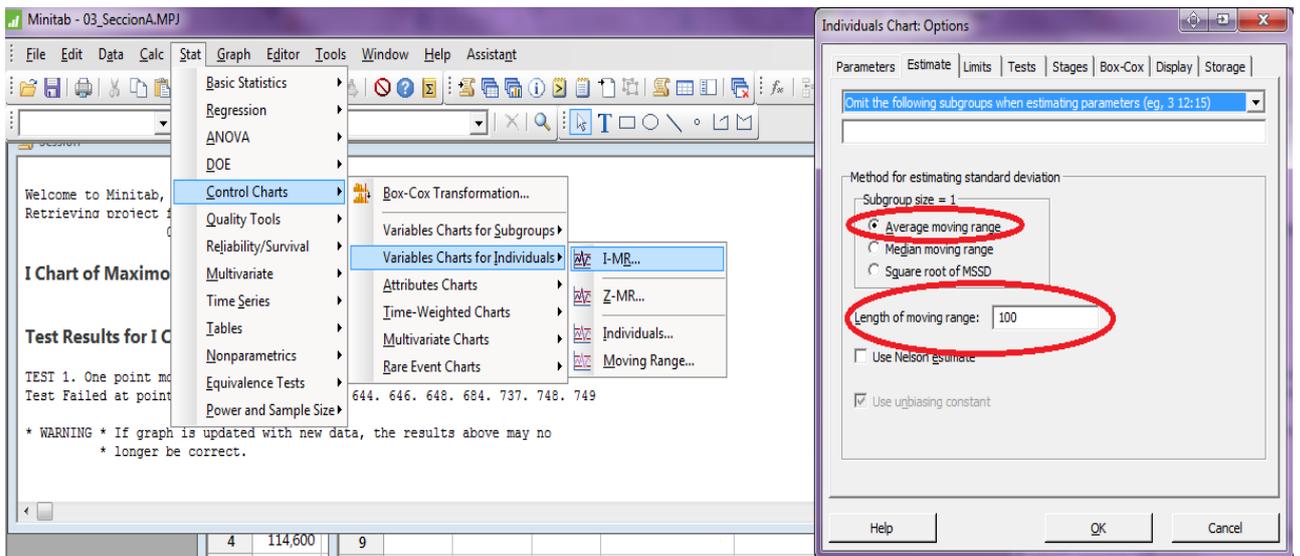


Figura 74 - Carta de control en Minitab®

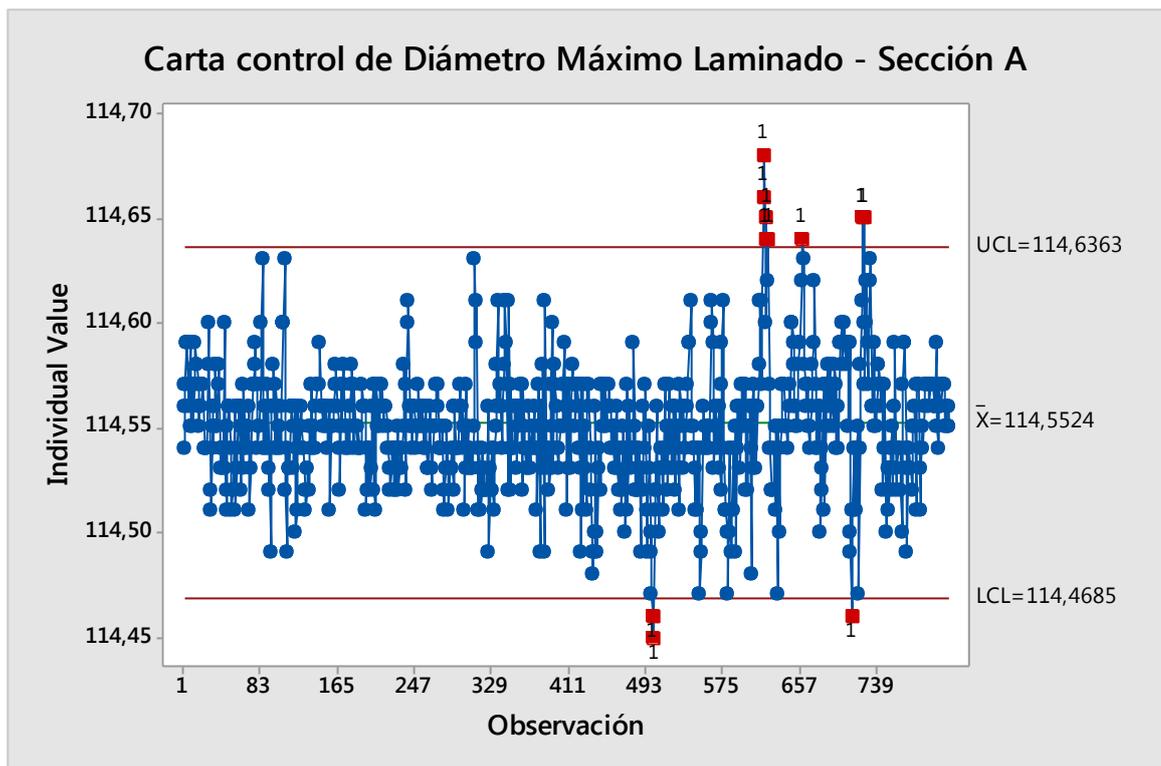


Figura 75 - Sección A – Diámetro Máximo Laminado - Carta de Control – Minitab®

NOTA: A fines comparativos, se configuró el gráfico para que solamente se indiquen aquellos puntos que se encuentran más allá de tres desvíos estándar de la línea central

De los resultados obtenidos, se puede concluir que la aproximación con límites globales es la más sencilla de implementar, dado que solo requiere laminar un cierto número de tubos, medir las variables de interés y calcular la mediana y la MADN de los valores medidos.

La aproximación con límites puntuales al ser más precisa, como se estudió al analizar las incertidumbres en el apartado 3.2.3.1, permite reducir la posibilidad de falsos positivos; la principal desventaja consiste en conocer previamente cuáles entradas son outliers y excluirlas para calcular el modelo de la aproximación.

Por último, los métodos propuestos resultan sencillos de implementar, generan resultados similares a los obtenidos empleando algoritmos más complejos, predicen la totalidad de los outliers y podrían incluso reducir la posibilidad de falsos positivos.

3.2.5 Conclusiones

En esta sección se pudo conocer las relaciones existentes entre entradas y salidas, tanto a nivel cualitativo, como cuantitativo; asimismo se indicaron los modos posibles de emplear cartas de control para controlar el proceso productivo, pese al comportamiento no gaussiano del mismo.

La existencia de funciones que permiten aproximar los valores de salida del proceso en función de las variables de entrada resulta de particular importancia, no solo para obtener un método sencillo para generar las cartas de control, sino además, para considerar realizar, de ser necesario, estudios complementarios para un modelado más preciso del proceso (empleando los elementos de análisis de señales y sistemas, como ser transformadas de Fourier, convoluciones, etc.).

Dado que se demostró que las variables de salida son prácticamente independientes de las variables de entrada, la aproximación mediante estadística robusta resulta un método práctico y eficaz para la realización de las cartas de control del proceso.

4 Relación entrada-salida del macroproceso

Habiéndose realizado la totalidad del proceso descrito la Figura 1 para todo del lote de tubos extrudados, una cantidad de tubos (15%) requirieron un proceso adicional de acondicionamiento superficial, a fin de cumplir con las especificaciones del cliente.

A fin de encontrar algún modelo que, partiendo de los datos de la materia prima pudiera predecir la necesidad o no del proceso de acondicionamiento superficial, se propone emplear una aplicación de las redes neuronales artificiales, concretamente los mapas Kohonen [25]. El proceso consiste en entrenar la red con la información de entrada (valores de las mediciones de los tubos extrudados) y con la información de salida (necesidad o no del proceso adicional). Una vez entrenada la red, se ingresa la información de los tubos incógnita y se predecirá la salida (necesidad o no del proceso de acondicionamiento).

Para entrenar la red se dividió el lote en dos partes, un grupo de entrenamiento, con el 72% del lote, y un grupo de validación, con el 28% restante.

A fin de entrenar la red con la información adecuada, se realizó un pretratamiento de los datos, escalando los valores de las variables entre 0 y 1, luego se seleccionaron los datos destinados a entrenamiento, no de manera aleatoria, sino con un algoritmo que conservara los valores extremos de las entradas, de modo de realizar el entrenamiento con todas las condiciones de frontera establecidas por los valores medidos [17].

Se verificó que dentro del grupo de entrenamiento el 13% de los tubos requirieron el proceso adicional y que dentro del grupo de validación el 16% de los tubos fueron los que requirieron este proceso.

Empleando una rutina para el programa Matlab® desarrollada por el grupo de investigación de quimiometría de la Universidad de Milán [2][1], se obtuvo que la mejor solución fue una red de Kohonen, con topología hexagonal, con 18 neuronas por lado, con 6000 a 8000 épocas de entrenamiento, conexión toroidal y pesos iniciales en relación con los autovalores de los datos de entrada, como se presenta en la Figura 76.

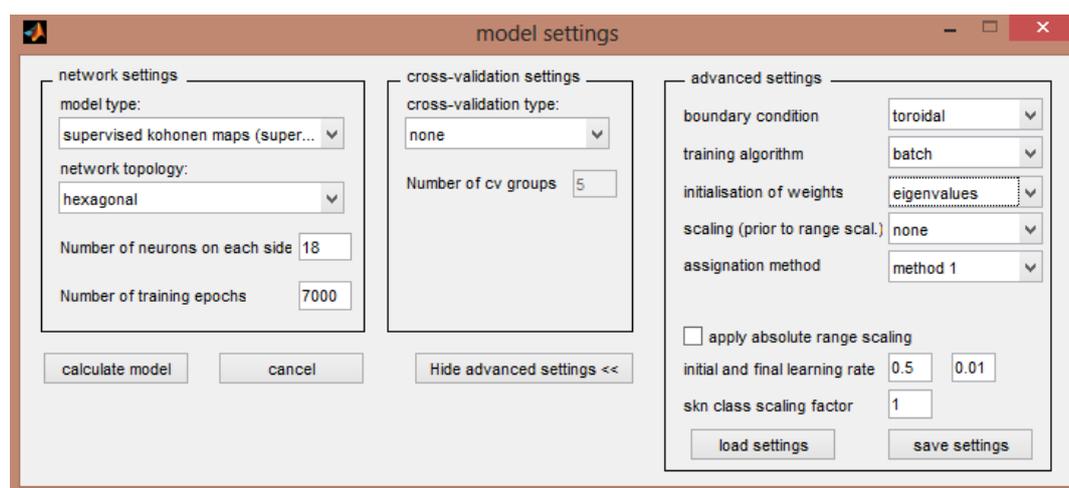


Figura 76 – Mapa de Kohonen – Configuración según Universidad de Milán

Entradas: 32 (escaladas entre 0 y 1) = 8 posiciones de *Diámetro Máximo* + 8 posiciones de *Diámetro mínimo* + 8 posiciones de *Espesor Máximo* + 8 posiciones de *Espesor mínimo*

Salidas: 1, con dos clases (clase 1: tipo de tubo normal, clase 2: tipo de tubo con proceso adicional)

El resultado obtenido con el grupo de entrenamiento fue la red de la Figura 77, en la cual se puede visualizar claramente dos regiones, correspondientes a cada clase. En el interior de la

misma se aprecian en las distintas neuronas los números de las clases de las muestras de entrenamiento. Pueden apreciarse también los errores propios de la red: en algunas neuronas de color azul, correspondientes a la clase 1 se han asignado elementos correspondientes a la clase 2 y viceversa.

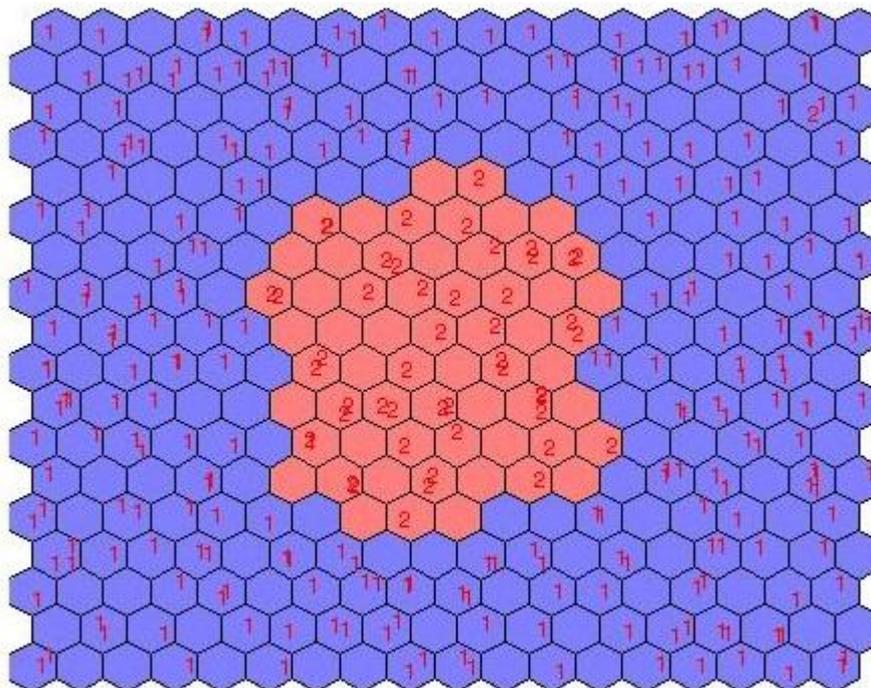


Figura 77 – Mapa de Kohonen - Red calculada

Una vez obtenida la red, se pueden predecir las muestras incógnitas. En este caso prediciendo el lote de validación se obtiene el resultado presentado en la Figura 78

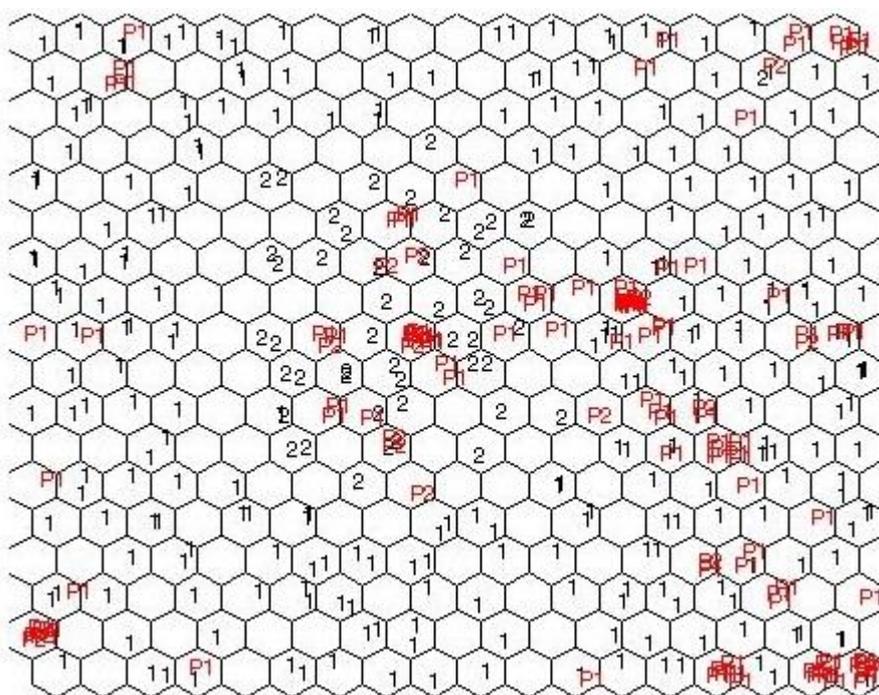


Figura 78 – Mapa de Kohonen - Predicción

La Matriz de Confusión es la presentada en la Tabla 21. En ella se resumen los datos cuantitativos de los procesos de entrenamiento y de validación. Por ejemplo, para el entrenamiento, 251 tubos que pertenecen a la clase 1 fueron asignados por el algoritmo (correctamente) a la clase 1 y un solo tubo que pertenece a la clase 1 fue asignado

(erróneamente) a la clase 2. La misma interpretación corresponde para la etapa de validación: 89 tubos que pertenecen a la clase 1 fueron correctamente asignados; 9 tubos que corresponden a la clase 2 fueron correctamente asignados y otros 9 erróneamente asignados.

		Predicción					
		Entrenamiento			Validación		
		Clase 1	Clase 2	No Asignado	Clase 1	Clase 2	No asignado
Real	Clase 1	251	1	0	89	22	0
	Clase 2	1	47	0	9	9	0

Tabla 21 – Mapa de Kohonen - Matrices de confusión

Como es esperable, los valores de validación contienen más errores que los de entrenamiento, ya que estos últimos fueron empleados de manera recursiva minimizándolos hasta obtener el mapa resultante. En función de los criterios utilizados para calcular los parámetros cuantitativos, cabe destacar la **Especificidad**, definida como la habilidad de una clase para rechazar las muestras de las otras clases. En el modelo hallado, con los datos de validación, éste indicador resulta ser 0,5 para la clase 1, esto significa que de la totalidad de los tubos que requirieron un proceso adicional el modelo, a partir de la materia prima, puede predecir (como mínimo) correctamente el 50%. (Al existir solo dos clases, el valor de la especificidad de la clase 1, de acuerdo a las definiciones del programa, coincide con la sensibilidad de la clase 2). Los resultados cuantitativos se presentan en la Figura 79.

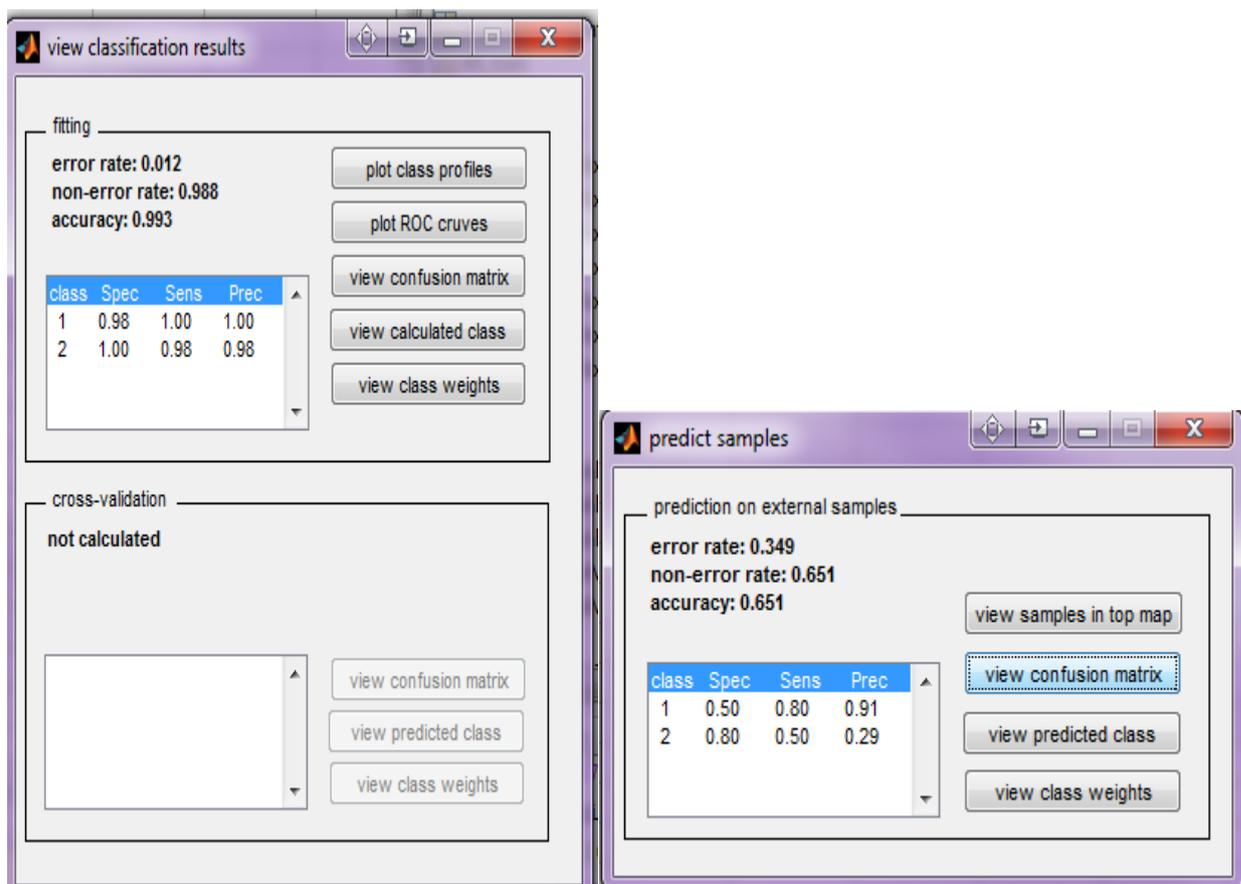


Figura 79 – Parámetros cuantitativos del mapa de Kohonen empleado

Nota: De acuerdo a los algoritmos empleados por el desarrollador [2][1], estos resultados deben ser multiplicados por 100 para obtener el valor porcentual. Ejemplo: La tasa de error de predicción es del 34.9%

Una vez entrenada la red se puede graficar los perfiles de las clases, teniendo en cuenta las variables de entrada. El gráfico obtenido se presenta en la Figura 80.

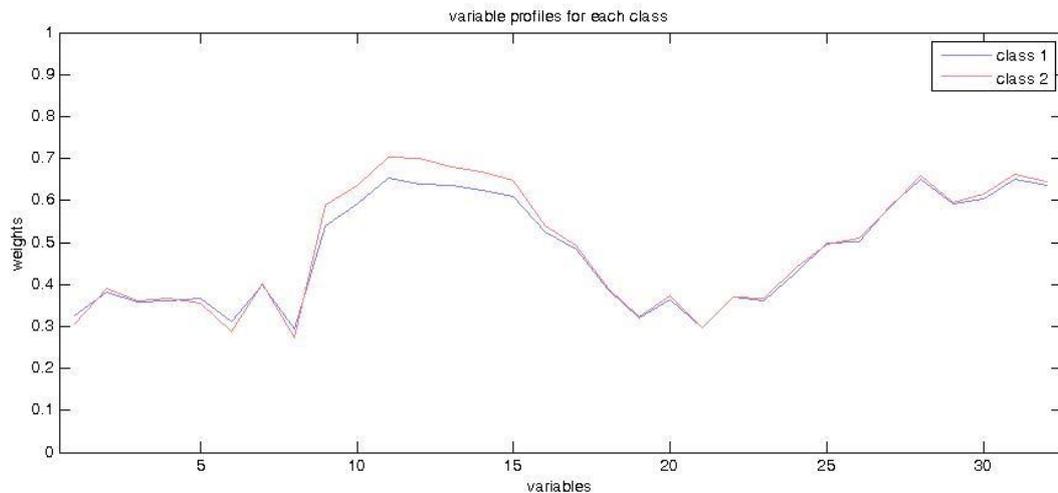


Figura 80 - Mapa de Kohonen - Pesos por clases y variables

El gráfico de pesos citado podría suponer que la característica que establece la necesidad de un tratamiento superficial adicional está relacionada con los valores de diámetro mínimo de los tubos (variables 9 a 16 en la Figura 80). Se verificó que una configuración similar para calcular el mapa, considerando solamente las posiciones de *Diámetro mínimo* como entradas produce una aproximación de menor calidad.

El grupo de quimiometría de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) desarrolló trabajos similares al aquí empleado [18]. Utilizando un mapa de Kohonen con topología cuadrada y similar cantidad de neuronas, configurado con los parámetros indicados en la Figura 81, se obtiene una red convergente y con errores aceptables (cabe aclarar que los dos modelos utilizan definiciones distintas para el cálculo de los errores, por lo tanto no son comparables entre sí).

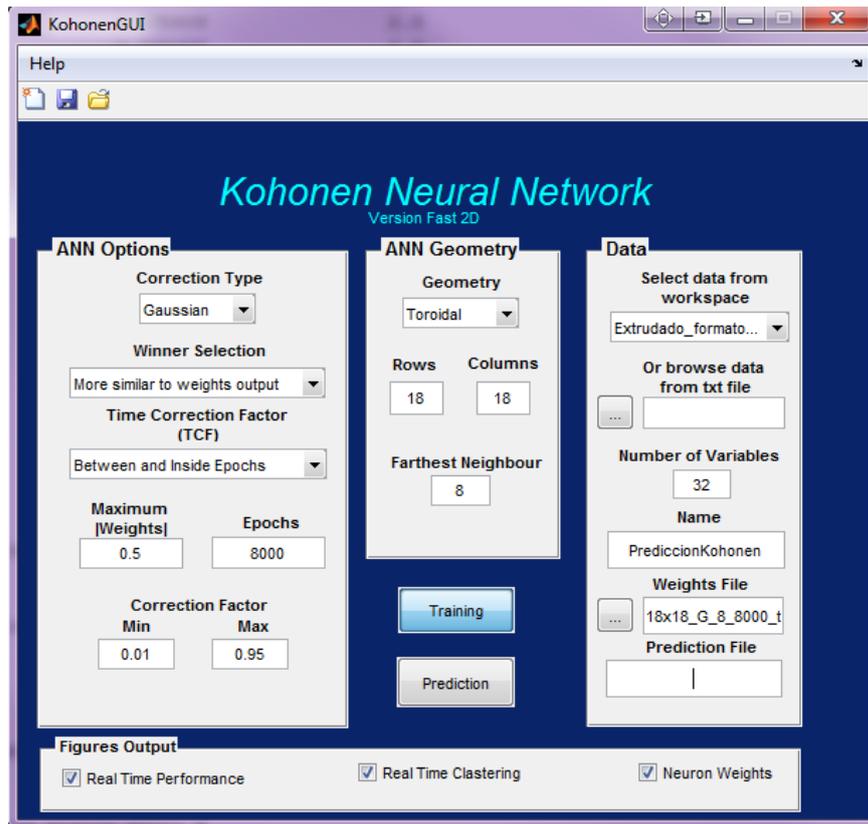


Figura 81 – Mapa de Kohonen – Configuración 2D según CNEA

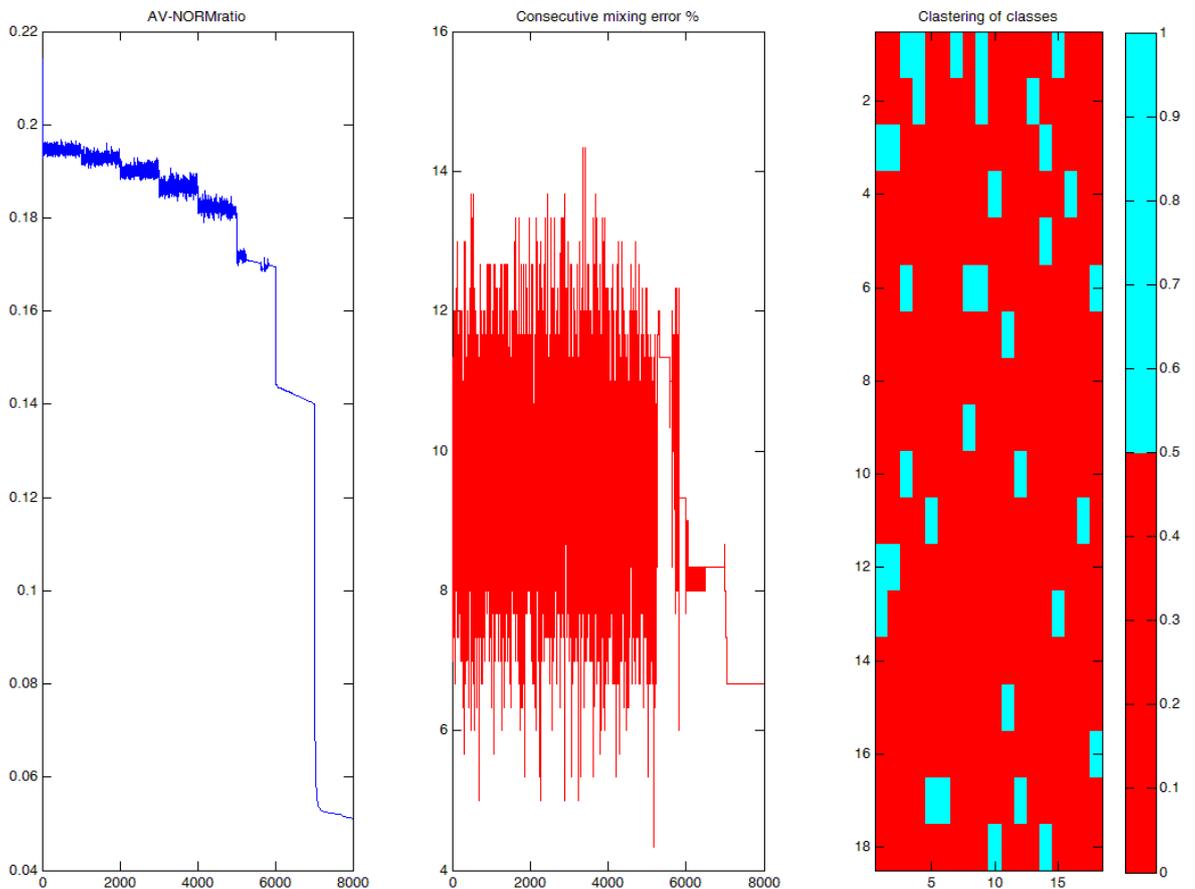


Figura 82 - Mapa de Kohonen – Entrenamiento 2D

Para este modelo el error de mezcla de entrenamiento, que considera aquellos casos en los que en una misma neurona se asignan clases diferentes, resulta del 6.7 % y el error de mezcla de validación resulta del 10,1%.

Se verificó también que con mapas de Kohonen en tres dimensiones [19] se obtienen errores aun menores y con menor cantidad de épocas. En la Figura 83 se presenta la configuración para un mapa de tres dimensiones. En la Figura 84 se presenta el mapa autoorganizado en tres dimensiones, cuyo gráfico de densidades asociado es el presentado en la Figura 85. El gráfico de la Figura 86 presenta las clases obtenidas a partir del mapa autoorganizado.

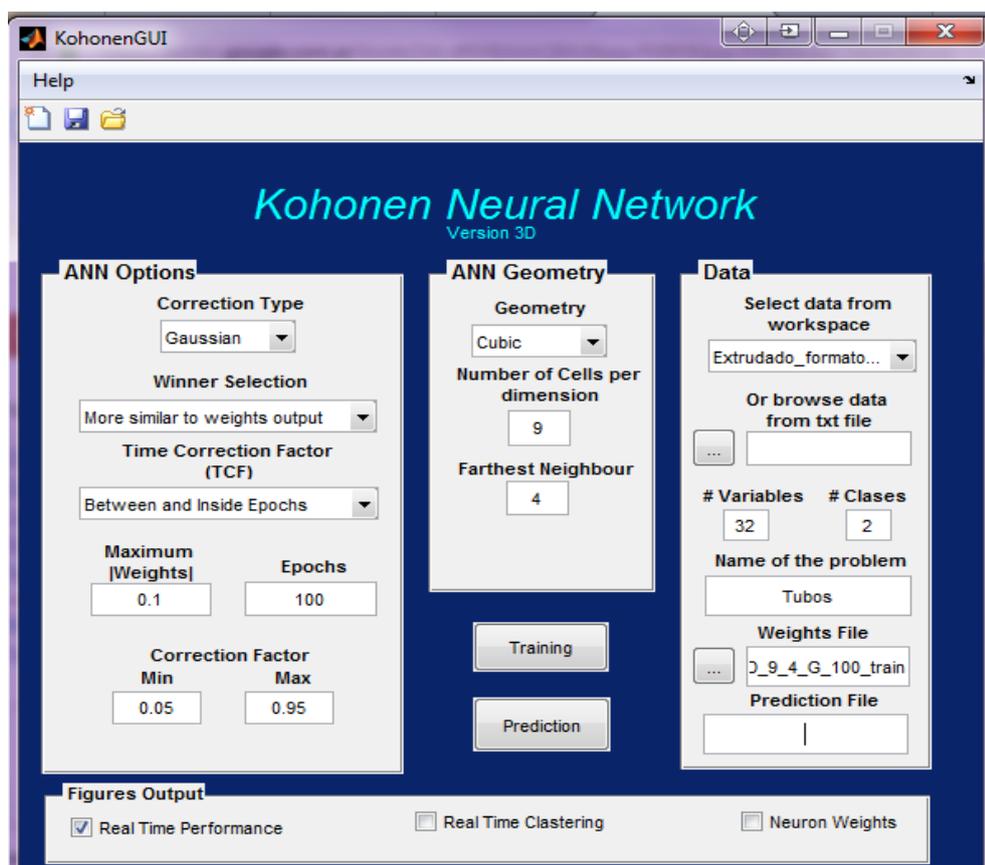


Figura 83 - Mapa de Kohonen – Configuración 3D según CNEA

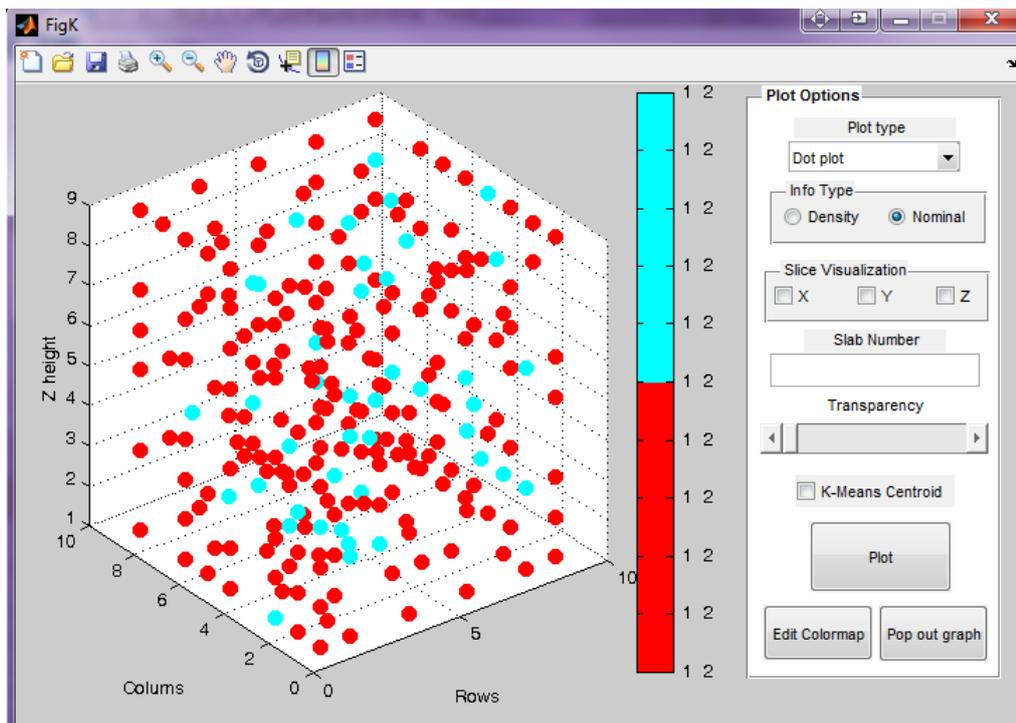


Figura 84 - Mapa de Kohonen – Entrenamiento 3D

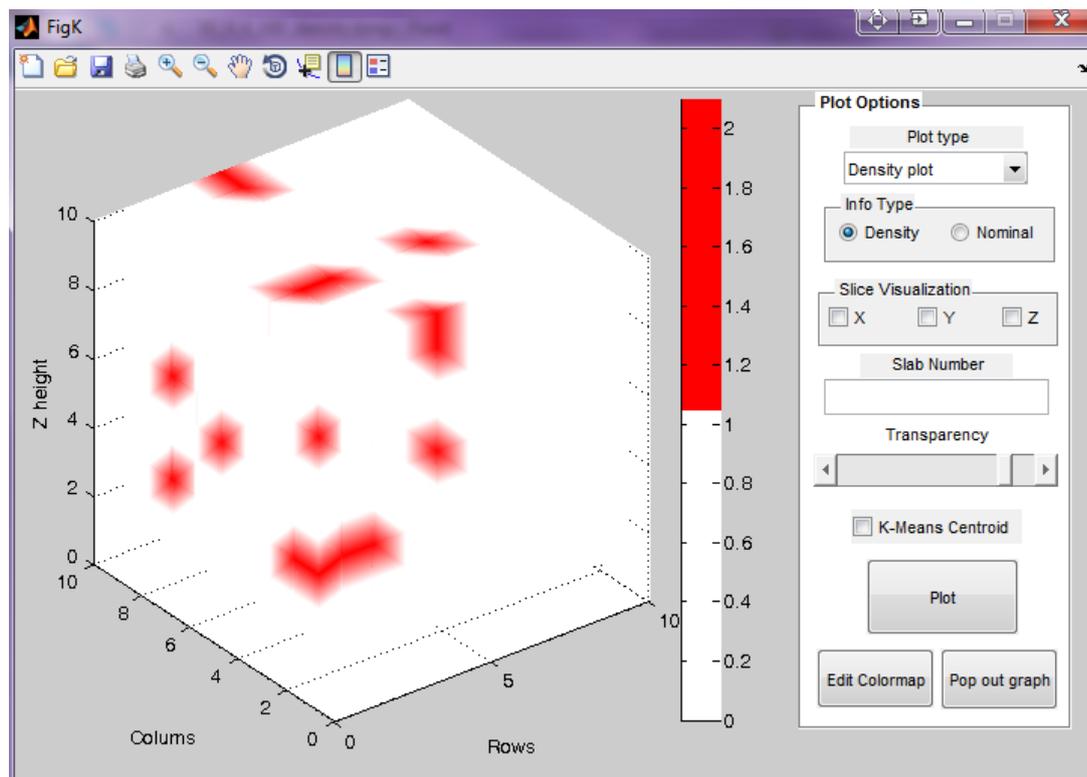


Figura 85 - Mapa de Kohonen – Densidades 3D

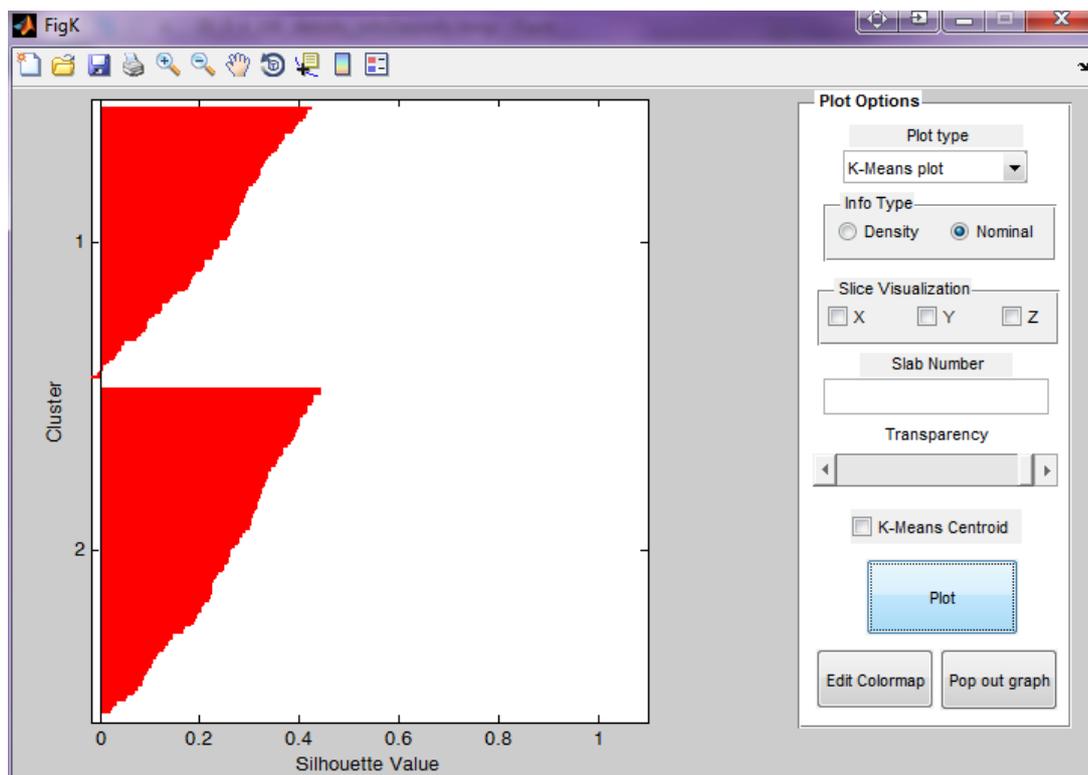


Figura 86 - Mapa de Kohonen – K-Means

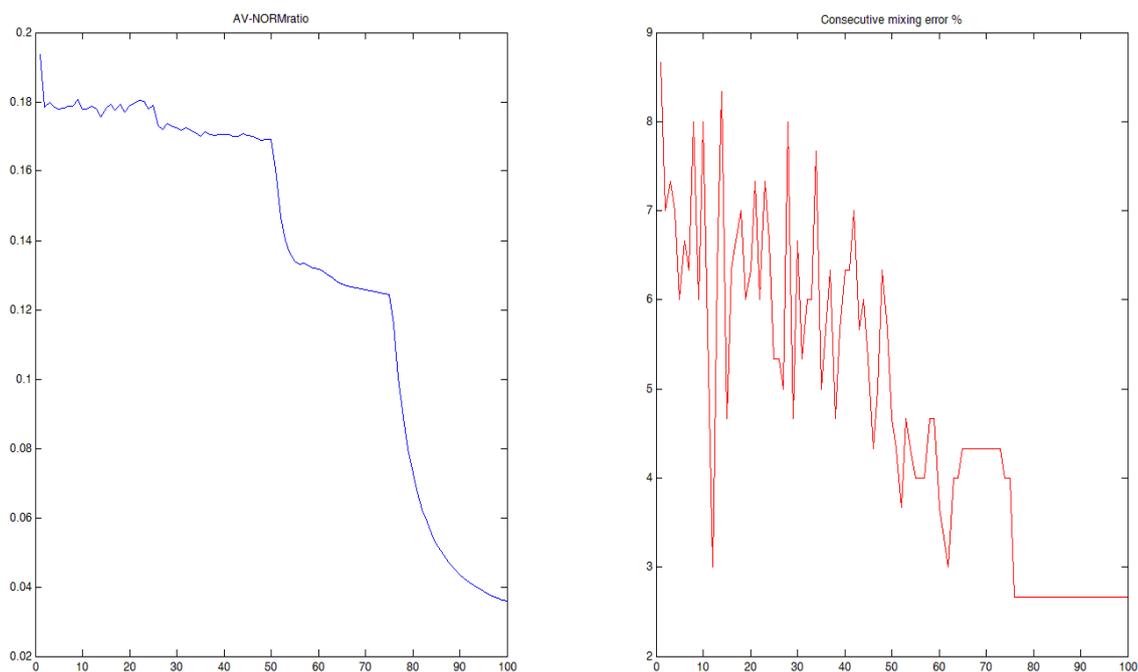


Figura 87- Mapa de Kohonen - Resultado entrenamiento 3D

En el caso de tres dimensiones el error de mezcla de entrenamiento es del 2.7% (presentado en la Figura 87) y el de validación de 9.3%.

El gráfico de la Figura 86 indica que, a partir del mapa resultante, el algoritmo puede seleccionar en dos clusters independientes las muestras de entrada, es decir los tubos (salvo un ínfimo grupo, representados con valores negativos en el eje “Silhouette”). Por otro lado, el error de mezcla indica que las clases de estudio pueden ser diferenciadas una de otra, concluyendo que el algoritmo permite identificar las clases de los tubos a partir de la información de las variables empleadas.

Si bien los resultados de los algoritmos presentados en este apartado, es decir el de la Universidad de Milán y el de la Comisión Nacional de Energía Atómica no son directamente comparables entre sí, es posible concluir que por métodos de procesamiento no lineal se obtienen resultados convergentes que permiten predecir alguna salida del macroproceso (en este caso la necesidad del acondicionamiento superficial adicional), aportando como información solamente los valores de entrada.

Concretamente, para el caso estudiado, solamente con la información de los tubos extrudados (materia prima), y a pesar de todas las transformaciones ocurridas en el macroproceso, es posible predecir (con las proporciones analizadas) antes de realizar cualquier operación si un tubo precisará el acondicionamiento superficial adicional o no. Esta predicción podría resultar de utilidad, dado que se pueden estudiar acciones preventivas tendientes a evitar el proceso adicional.

5 Conclusiones

En este trabajo, con los datos obtenidos del proceso de producción del primer lote nacional de tubos de aleación de circonio laminados en frío se procuró obtener información de los mismos, a fin de conocer más en profundidad las características del proceso estudiado.

En el apartado 1 de este trabajo, a partir del estudio de los valores de las variables medidas y derivadas, se pudieron determinar las características dimensionales de los tubos extrudados. El estudio realizado permitió determinar el comportamiento de las variables de estudio, siendo la falta de comportamiento gaussiano de las mismas una característica de principal interés. Dado este comportamiento se emplearon herramientas de estadística robusta (incluyendo el test de Levene, el cual puede ser empleado en estas condiciones) para determinar valores esperables, dispersiones, elementos considerados outliers y analizar la dependencia de las variables con las coladas y billets correspondientes.

En el apartado 2 se determinó el comportamiento del proceso de laminación, el cual resulta similar en las distintas secciones bajo estudio. El análisis de las variables de estudio permitió determinar la falta de comportamiento gaussiano como característica de los valores obtenidos al analizarlos de manera global en las distintas secciones. Dada esta característica se emplearon herramientas de análisis similares a las empleadas en el apartado 1 para el tubo extrudado, incluyendo además un análisis mediante el test de Kruskal-Wallis de la estabilidad de las variables de estudio en los distintos días de laminación, para cada posición espacial de los tubos.

Tanto en el apartado 1 como en el apartado 2 se registraron los hallazgos preliminares obtenidos mediante las técnicas de dendograma y análisis por componentes principales, los cuales evidencian que es posible profundizar el procesamiento matemático de las variables de estudio y del proceso.

Del análisis de los resultados obtenidos de la materia prima (tubo extrudado) y del producto (tubo laminado) es destacable la estabilidad del proceso estudiado, el cual, como se indicó en el apartado 3, se encuentra mínimamente afectado por las variaciones del material de entrada. Este proceso de laminación no solo permite obtener tubos con las características dimensionales especificadas, sino que también su alta precisión reduce significativamente las dispersiones de las variables controladas (diámetros y espesores) respecto a las variaciones de la materia prima. En este apartado, a fin de poder predecir las distintas variables medidas, se propusieron dos aproximaciones equivalentes entre sí en cuanto a los resultados obtenidos: una aproximación mediante una función multivariable de las variables de entrada y una aproximación constante mediante la variable medida

El conocimiento de las características del producto y sus entradas, junto con las aproximaciones matemáticas propuestas, permitió plantear en el apartado 3 dos métodos de control del proceso estudiado (método con límites globales y método con límites puntuales), los cuales fueron validados con los datos empíricos. Es de destacar que estos métodos permiten controlar el proceso con algoritmos sencillos, de manera similar a las cartas de control disponibles, las que debido al comportamiento de las variables, requieren algoritmos más complejos. La elección entre los métodos de control propuestos dependerá del nivel de detalle deseado y del procesamiento matemático requerido por cada uno.

A fin de poder optimizar el proceso de producción y control, teniendo en cuenta las experiencias del lote estudiado, surgen las siguientes necesidades:

- Mantener estable la configuración del proceso y, bajo esa configuración, laminar la mayor cantidad posible de tubos, lo cual permite contar con límites de control más robustos y realizar aproximaciones estadísticas confiables.
- Considerar automatizar los procesos de medición y adquisición de datos a fin de minimizar el registro de valores extremos (outliers no generados por el proceso productivo); en una etapa preliminar de este trabajo fue necesario detectar errores generados por transcripción de valores y otros similares. Si bien la estadística robusta empleada en este trabajo permite atenuar la influencia de los valores extremos, al analizar los datos en tiempo real durante el proceso productivo resulta más dificultoso detectar este tipo de situaciones.

En trabajos posteriores podría estudiarse la viabilidad de controlar el segundo paso de laminación, que forma parte del macroproceso, con el mismo método aquí propuesto para el primer paso de laminación.

Cabe destacar que mediante un algoritmo basado en entrenamiento fue posible, con un determinado nivel de confianza, predecir una característica de salida del macroproceso solamente utilizando como información los datos de la materia prima. Los mapas de Kohonen empleados en este trabajo u otros métodos similares podrían resultar de utilidad para predecir características de salida y, de ser necesario, tomar de antemano las acciones preventivas necesarias tendientes a optimizar el proceso productivo.

Es oportuno mencionar que la existencia del Sistema de Gestión de la Calidad implementado permitió contar de manera eficaz con los datos aquí empleados, disponer de la trazabilidad necesaria y la confiabilidad metrológica en las mediciones registradas.

Por último, cabe mencionar que este trabajo podrá considerarse eficaz si la información obtenida a partir de los datos históricos resulta útil para mejorar el control de los próximos lotes a laminar.

Anexo I – Distribución del error de método en la Reducción de Área

La reducción de área luego del proceso de laminación respecto del tubo extrudado se define como:

$$\text{Reducción de Área} = 100 * \left(1 - \frac{\bar{t}_{\text{laminado}} \bar{\phi}_{\text{laminado}} - \bar{t}_{\text{laminado}}^2}{\bar{t}_{\text{extrudado}} \bar{\phi}_{\text{extrudado}} - \bar{t}_{\text{extrudado}}^2} \right) [\%]$$

Para calcular esta variable, durante el proceso de producción se emplearon como valores promedio para la ecuación anterior el promedio de todos los valores de un tubo; por ejemplo, el espesor promedio laminado se obtuvo :

- Promediando los espesores máximos de las distintas posiciones espaciales,
- Promediando los espesores mínimos de las distintas posiciones espaciales
- Generando el promedio con los valores anteriores

En un trabajo anterior [8] se estudió la incertidumbre de reducción de área informada y se consideró para los cálculos la diferencia entre la máxima reducción de área (ocurrida en alguna posición específica del tubo) respecto del valor informado. Este trabajo proponía desarrollar otros estudios para conocer la distribución de esas diferencias en todo el tubo, y no considerar la diferencia máxima únicamente.

Dado que los datos empleados para el presente trabajo permiten realizar el estudio detallado propuesto, en la Figura 88 se grafican las diferencias respecto al valor informado de la reducción de área, en los distintos puntos de medición de cada tubo para el lote completo de tubos.

En el trabajo de referencia se había supuesto que las diferencias resultaban equiprobables, y por lo tanto la incertidumbre asociada al error de método se calculó teniendo en consideración una distribución rectangular [15]. Al observar el gráfico citado se concluye que distribución de esas diferencias no resulta equiprobable y por lo tanto la incertidumbre asociada al error de método podría aproximarse mediante una distribución triangular, lo que finalmente implicará una menor incertidumbre asociada a la Reducción Área informada.

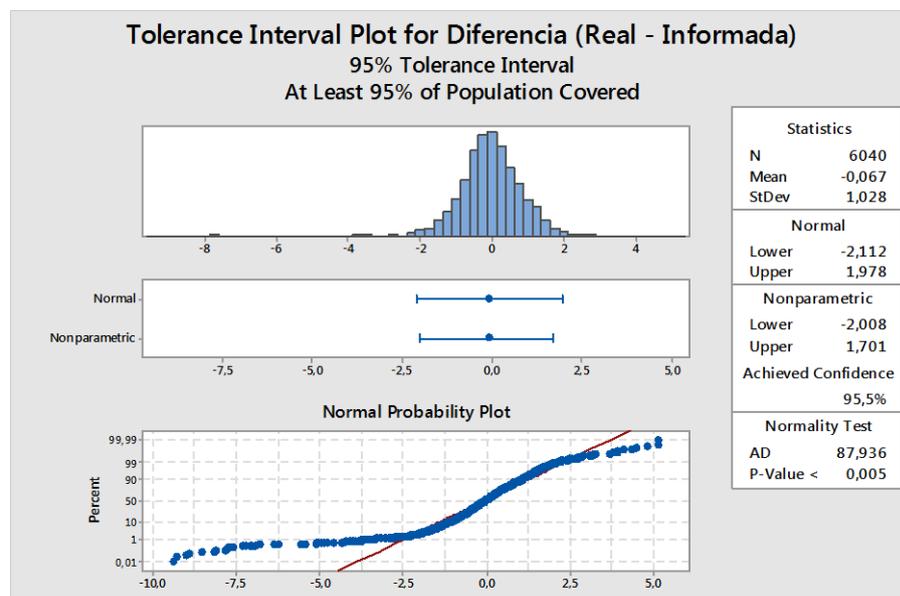


Figura 88 - Reducción de Área - Distribución de errores

Bibliografía

- [1] Ballabio D y M. Vasighi (2012), “A MATLAB Toolbox for Self Organizing Maps and supervised neural network learning strategies”, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 118, pp. 24-32.
- [2] Ballabio D, V. Consonni y R. Todeschini (2009), “The Kohonen and CP-ANN toolbox: a collection of MATLAB modules for Self Organizing Maps and Counterpropagation Artificial Neural Networks”, *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 98, pp. 115-122
- [3] Banchik, A. D. (2014), *Informe sobre las dimensiones de los tubos extrudados, laminados L1 y laminados L2 correspondientes a la serie E*.
- [4] Banga, S. J. y G. D. Fox (2013), “Método de comparaciones múltiples” [en línea]. Disponible en <http://support.minitab.com/es-mx/minitab/17/M%C3%A9todo%20de%20comparaciones%20m%C3%BAltiples,%20Prueba%20de%20varianzas%20iguales.pdf> [última consulta:30/05/2017]
- [5] Böhm, K., E. Smidt y J. Tintner (2012), “Application of multivariate data analyses in waste management” en Valim de Freitas, L. y A. P. Barbosa Rodrigues de Freitas (coord.), *Multivariate analysis in management, engineering and the sciences*, Croacia, InTech.
- [6] Box, G.E.P., W.G. Hunter y J. Stuart Hunter (1978), *Statistics for experimenters: an introduction to design, data analysis and model building*, Nueva York, John Wiley and Sons.
- [7] “Calculate the estimated median and confidence interval for the 1-sample Wilcoxon test” [en línea]. Disponible en: <http://support.minitab.com/en-us/minitab/17/topic-library/basic-statistics-and-graphs/hypothesis-tests/nonparametrics-tests/calculate-the-estimated-median-and-confidence-interval-for-the-1-sample-wilcoxon-test/> [última consulta: 30/05/2017]
- [8] Carus Zega, G. A. (2015), *Empleo del Sistema de Gestión de la Calidad para la determinación de la incertidumbre en la reducción de área de tubos laminados*, Universidad Nacional de General San Martín, Instituto Dan Beninson.
- [9] Clodt, T. (2004), *Überwachen der Produkt- und Prozessqualität*, Fuldabrück, Coodt Verlag. Disponible en https://www.cloudt.de/pdf_archiv/StartPPQ.pdf [última consulta 7/06/2017]
- [10] Colton, J (2013), *Normality tests and rounding* [en línea] Disponible en: <http://blog.minitab.com/blog/the-statistical-mentor/normality-tests-and-rounding> [última consulta 30/05/2017]
- [11] Correa, J. C., R. Iral, L. Rojas (2006), “Estudio de potencia de pruebas de homogeneidad de varianza”, *Revista Colombiana de Estadística*, vol 29 N°1, pp. 57 a76.
- [12] Flores, A. V., A. G. Gomez, G. A. Juarez, N. Loureiro, R. I. Samper, J. R. Satisteban, M. A. Vicente Alvarez, A. Tolley, A. Condó, R. D. Bianchi, A.D. Banchik, P. Vizcaíno (2014), “Typical Zirconium Alloys Microstructures in Nuclear Components”, *Practical Metallography*, 51-9, pp. 656-674.
- [13] Folguera, L.(2016), *Análisis de información ambiental mediante el uso de técnicas quimiométricas*, Universidad Nacional de General San Martín, Instituto de investigación e ingeniería ambiental.
- [14] Hibbert, D. B. y J. Justin Gooding (2006), *Data analysis for chemistry: an introductory guide for students and laboratory scientists*, Nueva York, Oxford University Press, Inc.

- [15] IRAM 35.050:2001 “Procedimientos para la evaluación de la incertidumbre de la medición”
- [16] Llinás Solano, H. (2014), *Introducción a la estadística matemática*, p. 90, Barranquillas, Universidad del norte. Disponible en https://books.google.com.ar/books?id=d9iVBAAAQBAJ&pg=PA90&lpg=PA90&dq=%22varianza+de+la+mediana%22&source=bl&ots=4ksMtlOw2&sig=gFLrSo--ThRVeNH89FqVk-GDC_8&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjrvXV4LHUAhVFkZAKHQpZAdcQ6AEIQjAG#v=onepage&q=%22varianza%20de%20la%20mediana%22&f=false [última consulta 9/06/2017]
- [17] Magallanes, J. F. (2008), “A new uniform mapping algorithm for sample selection”, *Journal of Chemometrics* (2009), 23, pp. 132–138.
- [18] Magallanes, J., A. García Reiriz, S. Liberman y J. Zupan (2011), “Kohonen classification applying ‘missing variables’ criterion to evaluate the p-boronophenylalanine human-body-concentration decreasing profile of boron neutron capture therapy patients”, *Journal of Chemometrics*, 25-6, pp. 340-348.
- [19] Magallanes, J. y E. Morzan (2017), *Mapas de Kohonen en 3D*, Comunicación interna, Comisión Nacional de Energía Atómica, Argentina.
- [20] Maronna, R., R. Douglas Martin y V. J. Yohai (2006), *Robust statistics: theory and methods*, West Sussex, Inglaterra, John Wiley & Sons, Ltd.
- [21] Massart, D.L., B.G.M. Vandeginste, L.M.C. Buydens, S. De Jong, P.J. Lewi y J. Smeyers-Verbeke (1998), *Handbook of chemometrics and qualimetrics*, parte A, p.282, Amsterdam, Elsevier.
- [22] Miller, N. J. y J. C. Miller (2002), *Estadística y quimiometría para química analítica*, Madrid, Pearson Educación S. A.
- [23] Olivieri, A. C. y H. Goicoechea (2007), *La calibración en química analítica*, Santa Fe, Universidad Nacional del Litoral
- [24] Ruiz-Falcó Rojas, A. (2006), *Control estadístico de procesos*, pp. 13-15, Madrid, Universidad Pontificia Comillas. Disponible en <http://web.cortland.edu/matresearch/ControlProcesos.pdf> [última consulta 7/06/2017]
- [25] Sumathi, S. y P. Surekha (2010), *Computational Intelligence Paradigms - Theory and Applications using MATLAB®*, Boca Raton, FL., CRC Press.