

Deslaminación del barniz en procesos de corte y embutición de hojalata: minimización mediante aplicación de diseño de experimentos fraccionado



Varnish delamination in tinplate cutting and drawing operations: minimization through application of fractionated experiment design



Laura Francos-Garrote¹, José-Florentino Álvarez-Antolín¹, Ramon Martínez-Fernandez¹ y Juan Asensio-Lozano²

¹ Universidad de Oviedo. Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica. Edificio Departamental Este. calle Wifredo Ricart, s/n - 33204 Gijón (España). Tfno: +34 985 181949.

² Escuela de Minas. Energía y Materiales de Oviedo. Calle Independencia, 13 - 33004 Oviedo (España). Tfno: +34 985 10 43 02

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8524> | Recibido: 12/07/2017 • Evaluando: 04/09/2017 • Aceptado: 22/11/2017

ABSTRACT

• The aim of this work is to avoid varnish delamination during cutting and drawing operations, which are carried out in the manufacturing process of tinplate lids for cans intended for food storage. Delamination, which occurs in the periphery of tin discs during the cutting operation, generates a varnish "thread" that can be thicker than 200 μm and may adhere to the cutting tool, compromising product quality and productivity. As a consequence, lengthy production downtimes for tool cleaning operations are required.

By means of optical or electronical microscopy it is possible to determine the amount of varnish adhered to the tool, as it is directly related to the depth of the delamination layer.

The experimental methodology followed a fractionated Design of Experiments with 8 factors, 2 levels and resolution IV. The research was carried out in an industrial scale and studied parameters were those inherent to the manufacturing process.

It is concluded that the depth of the delamination layer is uneven and manifests two different behaviours depending on the direction: one in the direction of the fabrication line and other in the opposite direction. The factor with greater influence over the depth of the delamination layer is the stamping pressure. If the stamping pressure decreases, the thickness of the detached varnish thread also decreases. Tin plate thickness resulted to be another important process variable, being smaller thicknesses beneficial.

A thicker varnish layer (amount of varnish applied) and a specific curing treatment are possible solutions to counter the deleterious effects of high stamping pressure and thicker tinplates respectively.

• **Keywords:** Varnish Delamination, Tinplate, Cutting, Drawing, Design of Experiments.

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es la eliminación de la "deslaminación" del barniz producida en los procesos de corte y embutición que forman parte del conformado de tapas para envases de uso alimentario. Esta deslaminación se produce en la periferia circunferencial de los discos formados tras el corte. Este "hilo" alcanza espesores superiores a las 200 μm , llegando a adherirse al utillaje de la maquinaria, afectando a la calidad del producto y a su productividad. Como consecuencia, son necesarias paradas programadas para la limpieza del utillaje y la aspiración del barniz acumulado. La cantidad de barniz depositado se puede cuantificar mediante microscopía óptica o electrónica, midiendo el espesor

de la capa deslaminada. La metodología de investigación seguida fue la aplicación de un Diseño de Experimentos Fraccionado con 8 factores, 2 niveles y resolución IV. La investigación se llevó a cabo a escala industrial y los factores estudiados fueron propios del proceso de fabricación.

Se concluye que el espesor de la capa deslaminada no es uniforme, presentando 2 comportamientos diferentes. Uno según la dirección de avance de la línea de fabricación y otro según su dirección perpendicular. El factor con un mayor efecto sobre el espesor de la capa deslaminada es la presión del pisador, de tal manera que si disminuye esta presión también disminuye el hilo de barniz despegado. También resultó con un efecto significativo el espesor de la chapa de hojalata, resultando favorables espesores bajos. Un elevado gramaje del barniz refuerza el efecto de la presión del pisador, y una determinada secuencia del curado refuerza el efecto del espesor de la chapa.

Palabras clave: Deslaminación del Barniz, Hojalata, Corte, Embutición, Diseño de Experimentos.

1. INTRODUCCIÓN

Las tapas de envases para uso alimentario se fabrican a partir de chapa de hojalata de espesor variable entre 0.14 y 0.18 mm [1]. El acero presenta una microestructura plenamente ferrítica [1] y [2], con un límite elástico entre 580 y 620 MPa. La capa protectora de estaño ronda los 3 g/m² en ambas caras. La hojalata se protege por ambas caras con varias capas de un barniz formado por una resina del tipo poliéster fenólica que requiere de su disolución en un determinado disolvente. La aplicación de este barniz se realiza mediante rodillos. Se aplican 2 capas de barniz en cada una de las caras de la hojalata, con un curado intermedio tras la aplicación de cada capa. La temperatura de curado es de 180 °C. Previamente a la obtención de la geometría final de la tapa, se conforma una "cazoleta" mediante un proceso conjunto de corte y embutición, ver Figura 1. Durante el corte se produce la deslaminación del barniz según la periferia circunferencial del disco que se forma en dicho corte. Esta deslaminación puede considerarse como una consecuencia de la deformación que sufre la superficie de corte que forman la chapa y el barniz. El "hilo" del barniz despegado se adhiere al utillaje de la maquinaria, entorpeciendo el proceso productivo. Después de fabricar cientos de "cazoletas", resulta inevitable una parada programada para la limpieza de la maquinaria. El objetivo de este trabajo fue determinar aquellos factores de fabricación que tuvieran un efecto significativo sobre esta deslaminación del barniz, situando estos



Figura 1: Cazoleta obtenida tras los procesos de corte y embutición

factores en aquellos niveles de trabajo que permitieran reducir o eliminar dicha deslaminación. Para ello, el método de investigación seguido fue la aplicación de un Diseño de Experimentos fraccionado con 8 Factores, 16 Experimentos, y Resolución IV. Mediante esta metodología de investigación se pretende, a partir de la variación deliberada de determinadas condiciones de trabajo, generar un conocimiento más profundo sobre una determinada respuesta industrial, analizando sus variaciones ante dichas modificaciones [3]. En este caso la respuesta industrial analizada fue el espesor de la capa deslaminada. Dado que inicialmente se carecía de referencias y experiencias anteriores que permitieran identificar alguno de los factores de producción con alguna influencia sobre la pérdida de barniz, se planteó una estrategia secuencial de investigación partiendo de un primer Diseño de Experimentos fraccionado, de manera que los conocimientos adquiridos pudieran acotar el origen del problema y definir un camino de mejora en posteriores Diseños. Esta metodología de experimentación permite, tras considerar inicialmente los objetivos y recursos disponibles, planificar en qué condiciones se van a realizar un reducido número de experimentos que permitan determinar el efecto de los factores analizados sobre una determinada respuesta industrial. De esta manera, los conocimientos adquiridos en un primer diseño, pueden utilizarse para decidir en qué condiciones se realizarían los siguientes diseños, definiendo un camino de mejora continua. La investigación fue desarrollada a escala industrial [4], sobre cazoletas obtenidas tras los procesos de corte y embutición. El espesor de la capa deslaminada se midió a partir de imágenes obtenidas mediante microscopía óptica. Los factores productivos estudiados fueron el gramaje del barniz, el espesor de la hojalata, el tiempo de agitación del barniz con el disolvente, la secuencia del curado, la holgura entre la cuchilla fija y la móvil durante el corte, la presión del pistón, el tiempo transcurrido entre el curado del barniz y el corte de la hojalata, y la presión del pisador. Se concluye que el factor que tiene un efecto significativo sobre el espesor de la capa de barniz deslaminado fue la presión del pisador, de tal manera que se reduce la pérdida de barniz si éste se sitúa en su nivel bajo. Por otra parte, se constató que la deslaminación del barniz no es homogénea, presentando 2 comportamientos diferentes. Uno según la dirección de avance de la línea de fabricación y otra según la dirección perpendicular. El mayor espesor de capa deslaminada se produce en este segundo caso.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. FUNDAMENTOS DE LOS DISEÑOS DE EXPERIMENTOS

La aplicación de la técnica estadística del diseño de experimentos pretende modificar deliberadamente las condiciones nor-

males de trabajo para producir cambios en algunas de las respuestas estudiadas. Estos cambios deliberados sobre las condiciones normales de trabajo se realizan sobre determinados factores productivos, previamente seleccionados. El problema básico para la aplicación de un diseño de experimentos reside en decidir qué conjunto de pruebas permiten, con la menor cantidad de recursos, alcanzar el nivel de conocimiento deseado. En los procesos industriales es habitual que unos pocos factores sean responsables de la mayor parte de las variaciones de la respuesta, resultando el resto de factores responsables de variaciones de menor cuantía, indistinguibles del ruido experimental. Los diseños de experimentos factoriales completos requieren de un elevado número de experimentos, que crece de manera exponencial en función del número de factores estudiados. Cuando existen k factores a estudiar en un diseño de experimentos factorial completo el número de ensayos es 2^k , donde 2 es el número de niveles que aplicamos a cada uno de los factores [5] y [6]. Los diseños factoriales fraccionales permiten estudiar un elevado número de factores con un número de experimentos mucho menor, asumiendo la pérdida de información de posibles interacciones entre factores, que en la práctica no suelen resultar muy significativas. Debe señalarse que los diseños fraccionales se simbolizan como 2_{N}^{k-p} , donde 2 es el número de niveles, k el número de factores, p el grado de fraccionamiento, y N su resolución.

2.2. CONCEPTOS DE RESOLUCIÓN, DE EFECTOS, Y DE INTERACCIONES

La resolución de un diseño indica el nivel de confusiones que se presentan en la estimación de los efectos, es decir, representa la pérdida de información de posibles interacciones entre factores. En general, un diseño de experimentos de resolución N es aquel en el que ningún efecto de q factores está confundido con otro que contenga menos de $N-q$ factores [7]. En nuestro caso, el Diseño de Experimentos planteado es del tipo 2_{IV}^{8-4} , lo que significa que su resolución es IV, y por tanto, los efectos principales están confundidos con interacciones de 3 factores. Compruébese que $4(\text{resolución}) = 1(\text{efectos principales}) + 3(\text{interacciones de 3 factores})$. Se define efecto de un factor a la variación de la función respuesta como consecuencia de la variación de dicho factor. Se definen los efectos principales como aquellos efectos sobre la función respuesta derivados de cada factor por separado, es decir, el cambio de la función respuesta al variar un determinado factor de su nivel más bajo, -1 , a su nivel más alto, $+1$. Las interacciones entre 2 factores se definen como la variación entre el efecto medio de un factor con el otro factor en su nivel bajo, -1 , y el efecto medio del mismo factor con el otro factor en el nivel alto, $+1$. Análogamente se definirían las interacciones entre varios factores. La importancia de los efectos principales tiende a ser mayor que la importancia de las interacciones de 2 factores, y éstas a su vez mayores que las interacciones de 3 factores y así sucesivamente [7]. Para las variables cuantitativas, los efectos principales e interacciones se pueden asociar con los términos de un desarrollo de Taylor de la función respuesta, por lo que al desprestigiar interacciones de tercer orden se estarían desprestigiar los términos de tercer orden del desarrollo de Taylor. Esto posibilita la realización de diseños de experimentos fraccionados, reduciendo el número de experimentos, pero asumiendo un posible error que se deriva de desprestigiar interacciones entre factores. El objetivo de utilizar un enfoque fraccionario no es hacer un buen ajuste, sino tratar de averiguar qué factores tienen una influencia significativa sobre la variable respuesta [8]. El grado de ajuste de esta función dependerá de la "curvatura" de la función respuesta en la zona de trabajo

y del grado de fraccionamiento. La zona de trabajo queda definida por los niveles de los factores estudiados.

2.3. FACTORES CON EFECTO SIGNIFICATIVO

La respuesta experimental está sometida a una variación aleatoria. Esta variación seguirá una ley normal, donde su desviación típica refleja el error experimental. Los efectos, son combinaciones lineales de las respuestas, por lo que, por aplicación del Teorema Central del Límite, siguen una ley normal. Cada efecto principal puede considerarse una variable aleatoria donde el valor obtenido es una estimación de su media, por lo que este valor va acompañado de la estimación de su desviación típica. Si todos los efectos fueran no significativos, éstos seguirán una ley $N(0,\sigma)$ por lo que aparecerían alineados en una representación de los efectos sobre papel probabilístico normal. Si algún efecto resultara significativo, éste seguirá una ley $N(\mu,\sigma)$ no apareciendo alineado con los no significativos. El efecto estandarizado es el cociente entre la diferencia del valor de la variable y su media con la desviación típica. Esto representa no sólo si el valor de la variable está por encima o por debajo de la media, si no también cuánto se aleja de ella. Para decidir si un efecto resulta significativo podemos comparar dicho efecto estandarizado en un papel probabilístico normal [8]. Aquellos efectos que se alejen de la recta hacia los extremos resultan significativos. Aquellos factores significativos que se alejen de la recta a su izquierda señalan que su nivel -1 hace aumentar la función respuesta respecto a su nivel +1. Aquellos factores significativos que se alejen de la recta a su derecha señalan que su nivel +1 hace aumentar la función respuesta respecto a su nivel -1 [8].

2.4. APLICACIÓN SOBRE LA DESLAMINACIÓN DEL BARNIZ

La Tabla 1 esquematiza el Diseño de Experimentos aplicado sobre el espesor de la capa deslaminada. La Tabla 1-a) muestra los factores y los niveles estudiados. El nivel -1 de la secuencia de curado se identifica como i+e+e+i. La letra "i" se refiere a la aplicación de una capa de barniz sobre la cara interior de la tapa, y análogamente la letra "e" sobre la cara exterior. Entre la aplicación de cada capa de barniz se realiza un curado a 180 °C. El nivel +1 se corresponde con una secuencia de curado i+i+e+e. La Tabla 1-b) muestra la matriz de experimentos, la secuencia de generadores y las confusiones del Diseño de Experimentos. La columna "generadores" indica el algoritmo de signos aplicado en la construcción de las columnas E, F, G, y H. La columna "confusiones" muestra el patrón de confusión [7] y [9]. Las columnas de signos E, F, G, y H, de la matriz de experimentos se han construido como el producto de las columnas BCD, ACD, ABC, y ABD respectivamente. Estos "productos" se denominan generadores del diseño 2_{IV}^{8-4} , e introducen las confusiones de tercer orden (interacciones de 3 factores) con los efectos principales. La columna de "confusiones" de la Tabla 1-b) señala aquellas interacciones de segundo orden (2 factores) cuyos efectos están confundidos [7]. Por ejemplo, en este caso, estarán confundidos en un mismo efecto las interacciones AB+CG+DH+EF, y el resto de interacciones de 2º orden que se señalan en dicha columna.

2.5. TOMA DE MUESTRAS

En cada uno de los 16 experimentos se analizaron 5 "cazoletas", extrayéndose de cada una de ellas, a lo largo del perímetro circunferencial de la "cazoleta", cuatro fragmentos dispuestos en posiciones perpendiculares. Las dimensiones aproximadas de dichos fragmentos fueron 5mm x 10mm. La parte del fragmento que se corresponde con el borde circunferencial de la cazoleta fue la observada en el microscopio óptico. El microscopio óptico

empleado fue un "Epiphot 200" de la marca NIKON. Las muestras fueron observadas a 50 aumentos. En cada uno de los fragmentos se realizaron 20 medidas, lo que equivale a 80 medidas en cada cazoleta y a un total de 400 medidas en cada experimento. El espesor de la capa deslaminada no es uniforme a lo largo del borde circunferencial de los fragmentos observados, por lo que se realizaron las medidas empleando una plantilla que posicionaba los 20 puntos de medida, garantizando así la aleatoriedad de los resultados obtenidos. El espesor de la capa deslaminada se determinó como la distancia entre el borde del fragmento y el punto donde la capa alcanza una densidad de barniz aparentemente uniforme. La Figura 2 muestra un ejemplo de estas mediciones.

a) Factores analizados y niveles

Código	Factores	Nivel -1	Nivel +1
A	Gramaje barniz	12 g/m ²	15 g/m ²
B	Espesor	0.16 mm	0.18 mm
C	Tiempo agitación	30 minutos	60 minutos
D	Secuencia curado	i+e+e+i	i+i+e+e
E	Presión sombrero	3 bar	6 bar
F	Tiempo entre curado y corte	1 día	6 días
G	Holgura	0.03 mm	0.06 mm
H	Presión pisador	3 bar	5 bar

b) Matriz de experimentos

Experi- mento	A	B	C	D	E	F	G	H	Genera- dores	Confusiones
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	E=BCD F=ACD G=ABC H=ABD	A
2	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1		B
3	-1	1	-1	-1	1	-1	1	1		C
4	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1		D
5	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1		E
6	1	-1	1	-1	1	-1	-1	1		F
7	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1		G
8	1	1	1	-1	-1	-1	1	-1		H
9	-1	-1	-1	1	1	1	-1	1		AB+CG+DH+EF
10	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1		AC+BG+DF+EH
11	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1		AD+BH+CF+EG
12	1	1	-1	1	-1	-1	-1	1		AE+BF+CH+DG
13	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1		AF+BE+CD+GH
14	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1		AG+BC+DE+FH
15	-1	1	1	1	1	-1	-1	-1		AH+BD+CE+FG
16	1	1	1	1	1	1	1	1		

Tabla 1: Diseño de Experimentos analizado

3. RESULTADOS

3.1. ANÁLISIS GENERAL

Para cada experimento se determinó un "grupo de estadísticos" formado por los valores de la media, mediana, y los percentiles del 25% y 50%, lo que permite disponer de una visión general del conjunto de datos obtenidos en cada experimento. Al comparar la media con la mediana observamos el "sesgo" del conjunto de datos obtenidos, y los percentiles 25 y 75 nos permiten conocer los valores extremos del conjunto de datos y si éstos se encuentran muy alejados de la media, lo que sería sinónimo de una alta variabilidad. La Tabla II muestra los resultados obtenidos, e incluye los efectos sobre cada estadístico de las variaciones de los Factores que aparecen identificados en la columna de la derecha, denominada "Efectos".

Por ejemplo, los valores de los efectos de cada estadístico que se encuentran en la misma fila que la "media" representan el valor medio de cada estadístico para los 16 experimentos. Es decir, el valor medio del espesor de capa deslaminada de los 16 experimentos fue 106,598 micras, y el percentil 25 de los 16 experimentos fue 66,9419 micras. El resto de los valores que aparecen en la columna "Efecto" de cada estadístico refleja el efecto que supone sobre el espesor de capa deslaminada la variación de los Factores de primer

orden (A, B, C, D, E, F, G, y H) y de las interacciones de 2º orden. Por ejemplo, el efecto sobre el espesor de capa deslaminada medio (106,598 micras) de variar el Factor H (presión del pisador) desde su nivel +1 (5 bar) a su nivel -1 (3 bar) supone un descenso promedio respecto a dicha media de 62,0575 micras, lo que equivale a una reducción superior al 40% del espesor de capa deslaminada promedio. Para calcular los efectos, tanto los efectos principales como las interacciones de todo tipo, se suele emplear el algoritmo de Yates que puede implementarse en una hoja de cálculo [8] La Figura 3 muestra la representación de los efectos estandarizados en papel probabilístico normal. Las Figura 3(a) y 3(b) muestran el efecto significativo del Factor H (presión del pisador) sobre la media y la mediana, de tal manera que una presión del pisador en su nivel -1 (3 bar) favorece una disminución del espesor de capa deslaminada. La Figura 3(c) señala la aparición del Factor B (espesor de chapa de hojalata) con efecto significativo sobre el estadístico percentil 25, lo cual viene a reflejar que pequeños espesores de chapa favorecen una disminución de este estadístico. A su vez, en las Figuras 5(c) y 5(d) se muestra la influencia significativa de la interacción AH+BD+CE+FG sobre los percentiles 25 y 75. En este efecto significativo se confunden las interacciones de 2º orden AH, BD, CE, y FG. Para analizar cuál de estas interacciones tiene una mayor influencia sobre estos estadísticos es necesario un análisis más detallado de dichas interacciones de 2º orden [7]. La Tabla III muestra dicho análisis. De su estudio se concluye que el efecto del Factor H en su nivel -1 se ve favorecido si el Factor A (gramaje del barniz) se encuentra en su nivel +1 (15 g/m²). Es en esta combinación (H=-1 y A=+1) cuando se obtiene un

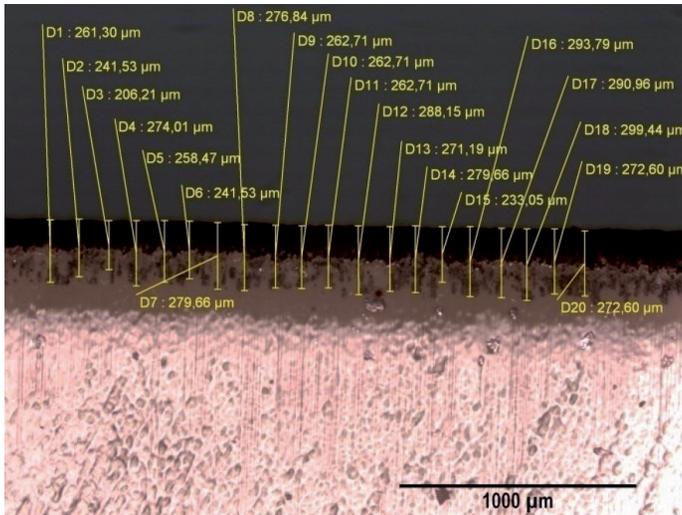


Figura 2: Ejemplo de las mediciones realizadas sobre espesor de capa deslaminada en uno de los fragmentos analizados correspondiente al Experimento 7

Experimento	media		mediana		Percentil 25		Percentil 75		Efectos
	Valor	Efecto	Valor	Efecto	Valor	Efecto	Valor	Efecto	
1	66,40	106,598	63,56	91,7625	49,44	66,9419	81,92	138,796	media
2	145,06	-2,57	118,64	-6,815	86,20	-4,10375	201,99	-2,07375	A
3	127,18	5,4225	117,94	12,9675	91,84	20,5213	156,79	-5,42875	B
4	51,15	-4,3975	46,61	-15,8075	36,72	-6,67375	60,73	-9,13625	C
5	72,08	8,755	62,15	14,05	49,44	0,56125	91,82	10,2762	D
6	142,44	-2,59	93,22	3,98	73,45	1,63125	212,22	-2,78125	E
7	137,13	-3,6675	106,66	-4,8425	87,57	-6,75375	173,38	-1,19125	F
8	76,32	9,18	69,12	8,55	58,63	8,97125	90,41	11,7038	G
9	133,24	62,0575	135,60	52,1875	79,10	43,7463	180,79	79,1412	H
10	90,49	-9,4075	81,92	3,4325	43,79	7,53875	127,12	-257338	AB+CG+DH+EF
11	109,63	-1,9375	90,40	-2,3975	62,15	-3,39625	162,43	2,16375	AC+BG+DF+EH
12	147,22	-5,615	142,66	-1,135	112,99	1,71875	175,14	-17,4338	AD+BH+CH+DG
13	130,15	3,3	100,30	-5,9	72,03	-0,76125	164,19	8,51375	AE+BF+CH+DG
14	51,23	-13,9425	26,84	-11,9075	0,00	-7,89625	72,03	-25,7363	AF+BE+CD+GH
15	87,25	5,425	84,75	13,495	60,38	9,22875	107,34	3,75375	AG+BC+DE+FE
16	138,59	13,9725	127,83	12,2775	107,34	16,4638	162,43	21,2313	AH+BD+CE+FG

Tabla II: Estadísticos del espesor de capa deslaminada medido sin tener en consideración la direccionalidad del avance de la línea de fabricación

a) sobre percentil 25

AH	H=-1	H=+1	CE	E=-1	E=+1	BD	D=-1	D=+1	FG	G=-1	G=+1
A=-1	55,35	82,64	C=-1	77,70	62,86	B=-1	64,63	48,73	F=-1	74,06	66,57
A=+1	34,79	95,00	C=+1	54,56	72,65	B=+1	68,69	85,71	F=+1	50,85	76,28

b) sobre percentil 75

AH	H=-1	H=+1	CE	E=-1	E=+1	BD	D=-1	D=+1	FG	G=-1	G=+1
A=-1	110,88	168,79	C=-1	146,99	136,03	B=-1	155,37	136,03	F=-1	144,15	134,63
A=+1	87,57	187,94	C=+1	120,33	151,84	B=+1	125,00	143,45	F=+1	121,73	154,67

Tabla III: Análisis de las interacciones de 2º orden, que confundidas presentan un efecto significativo

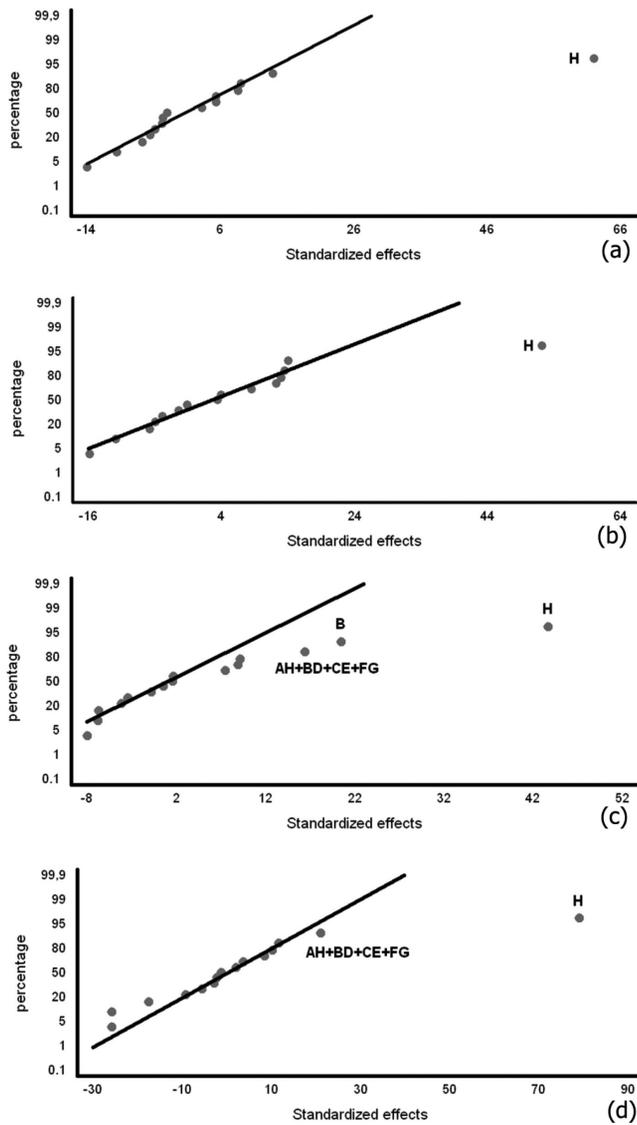


Figura 3: Representación de los efectos estandarizados en papel probabilístico normal sobre el espesor de capa deslaminada. (a) Media, (b) Mediana, (c) Percentil 25, (d) Percentil 75

menor valor para estos estadísticos, reduciéndose la variabilidad del espesor de capa deslaminada.

Durante un análisis posterior de los resultados se constató que el espesor de la capa deslaminada dependía de su posición respecto a la dirección de avance de la línea de fabricación. Para poder analizar estas observaciones, sin necesidad de repetir los 16 experimentos, se tomaron otras 5 "cazoletas" para cada experimento y se analizaron 2 fragmentos de cada cazoleta alineados con la dirección de avance y 2 fragmentos con la dirección perpendicular a la dirección de avance de fabricación. En este nuevo análisis se realizaron también 20 medidas en cada fragmento, pero en este caso, para reforzar la influencia de los posibles Factores con efecto significativo, se tomaron los 10 valores más altos del espesor de capa deslaminada de cada fragmento. En este caso se analizaron los valores promedio. La Tabla IV muestra los resultados obtenidos. La Figura 4 muestra la representación de los efectos estandarizados en papel probabilístico normal.

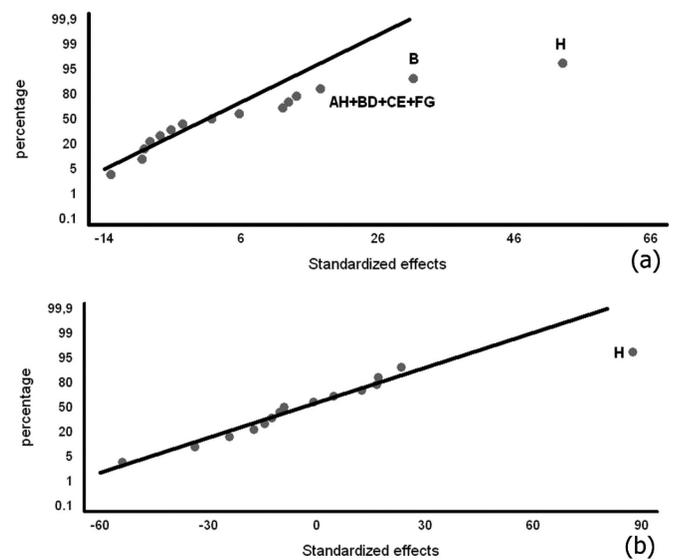


Figura 4: Representación de los efectos estandarizados en papel probabilístico normal del espesor de la capa deslaminada en las direcciones a) paralela y b) perpendicular a la dirección de avance de la línea de fabricación

Experimento	Dirección paralela a la de avance de fabricación		Dirección perpendicular a la de avance de fabricación		Efectos
	Valor	Efecto	Valor	Efecto	
1	64,57	83,6107	96,22	169,611	media
2	108,69	-5,78363	249,65	-9,055	A
3	131,77	31,2264	151,75	-17,3	B
4	47,741	-13,0814	67,99	23,4475	C
5	64,61	-4,20887	133,09	-0,7875	D
6	77,78	1,70388	269,19	-24,2	E
7	119,43	-8,52112	292,33	17,19	F
8	71,13	14,0986	99,82	-10,2475	G
9	86,79	53,1461	192,71	87,5325	H
10	62,47	5,74137	137,17	-53,9175	AB+CG+DH+EF
11	74,39	-7,32637	180,32	-14,33	AC+BG+DF+EH
12	144,79	12,9761	187,29	-12,37	AD+BH+CH+DG
13	79,07	-2,57112	201,30	12,6075	AE+BF+CH+DG
14	0,00	-8,12613	146,76	-33,7575	AF+BE+CD+GH
15	71,39	12,1836	145,39	4,8	AG+BC+DE+FE
16	133,15	17,6211	162,80	16,765	AH+BD+CE+FG

Tabla IV: Espesor de la capa deslaminada según las direcciones paralela y perpendicular a la dirección de avance de la línea de fabricación. Los valores resultan del promedio de los 10 valores más altos medidos en cada fragmento

AH	H=-1	H=+1	CE	E=-1	E=+1	BD	D=-1	D=+1	FG	G=-1	G=+1
A=-1	99,243	73,761	C=-1	98,110	82,191	B=-1	78,914	57,082	F=-1	89,632	86,109
A=+1	62,235	99,203	C=+1	67,408	86,733	B=+1	92,517	105,929	F=+1	63,490	95,211

Tabla V: Análisis de las interacciones de 2º orden que confundidas presentan un efecto significativo según la dirección paralela a la línea de avance de fabricación

3.1.1. Análisis según la dirección paralela al avance de la línea de fabricación

Los factores con efecto significativo sobre la dirección de avance de la línea de fabricación resultan ser los Factores H (presión del pisador), B (espesor de chapa), y la interacción AH+BD+CE+FG, de tal manera que si queremos reducir el espesor de la capa deslaminada debemos situar los Factores H y B en su nivel -1. Es decir, presión del pisador en 3 bar y espesor de chapa en 0.16 mm. La Tabla V muestra las interacciones AH+BD+CE+FG detalladas. De su análisis se deduce que:

1. El efecto del Factor H (presión del pisador) en su nivel -1 se vería reforzado con el Factor A (gramaje del barniz) en su nivel +1 (15 g/m²)
2. El efecto del Factor B (espesor de chapa) en su nivel -1 se vería reforzado con el Factor D (secuencia de curado) en su nivel +1 (i+i+e+e)

Cabe destacar, que todas las muestras analizadas del experimento 14 no presentaban deslaminación del barniz, por lo que las condiciones de fabricación inherentes a este experimento resultan favorables para eliminar este fenómeno. Este experimento coincide con los Factores H, B, A y D en sus niveles óptimos, -1, -1, +1, y +1, respectivamente.

3.1.2. Análisis según la dirección perpendicular al avance de la línea de fabricación

El Factor H (presión del pisador) resulta ser el único con efecto significativo, de tal manera que para disminuir el espesor de la capa deslaminada debemos situar este Factor en su nivel -1 (3 bar).

3.2. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS Y CONTINUACIÓN DE LA ESTRATEGIA SECUENCIAL DE INVESTIGACIÓN

La presión del pisador tiene un efecto muy significativo en el espesor de la capa deslaminada. Este efecto se repite sobre todo el perímetro de las cazoletas, independientemente de la dirección de avance de la línea de fabricación. Sin embargo, el espesor de chapa de hojalata únicamente tiene un efecto significativo según la dirección de avance de la línea de fabricación. Se ha constatado que el gramaje en su nivel +1 (15 g/m²) y la secuencia de curado en su nivel +1 refuerzan el efecto de la presión del pisador y del espesor de la chapa de hojalata según dicha dirección de avance. El experimento 14 coincide con estos factores en sus niveles óptimos, comprobándose que desaparece completamente la pérdida del barniz según la dirección de avance de la línea de fabricación. Teniendo en cuenta estos resultados, resultaría interesante continuar la estrategia secuencial de investigación en un segundo Diseño de Experimentos que incorpore los Factores con efecto significativo en este primer Diseño, como es el caso de la presión del pisador, el espesor de la chapa de hojalata, el gramaje del barniz, y la secuencia de curado, y que añada otros como la dirección de avance de la línea de fabricación, la temperatura del curado, o el espesor de la capa de estaño.

4. CONCLUSIONES

Al carecer de referencias previas que permitan acotar los factores industriales que puedan tener una influencia significativa sobre la pérdida de barniz durante el proceso de corte, se diseña una es-

trategia secuencial de investigación basada en el Diseño de Experimentos. Tras un primer Diseño de Experimentos se concluye que:

1. La presión del pisador presenta una influencia significativa sobre el espesor de la capa de barniz deslaminada, resultando que si situamos este parámetro en un nivel de 3 bares podemos reducir el espesor de la capa deslaminada en más del 40% respecto a los valores promedios.
2. La pérdida de barniz no es uniforme, presentando 2 comportamientos diferentes: Uno según la dirección de avance de la línea de fabricación y otro según su dirección perpendicular, resultando menor en el primer caso.
3. Según la dirección perpendicular a la de avance de la línea de fabricación, el único factor que presenta un efecto significativo es la presión del pisador. Reduciéndose la pérdida de barniz si situamos su valor en los 3 bares señalados anteriormente.
4. Sin embargo, según la dirección de avance de la línea de fabricación, además de la presión del pisador, aparece con un efecto significativo el espesor de la chapa de hojalata, de tal manera que si se reduce ésta a su nivel -1 (0,16 mm) se produce una disminución adicional de la pérdida de barniz.
5. El efecto de la presión del pisador y del espesor de la hojalata se ve reforzado, sobre la dirección de avance, por el gramaje del barniz en su nivel +1 (15 g/m²), y por la secuencia de curado, también en su nivel +1 (i+i+e+e)
6. Si situamos los factores presión del pisador, espesor de chapa, gramaje del barniz, y secuencia de curado, en sus niveles óptimos (-1, -1, +1, +1, respectivamente) se consigue eliminar la deslaminación del barniz en la dirección de avance de la línea de fabricación.

Se recomienda continuar con la estrategia secuencial de investigación, realizando un segundo Diseño de Experimentos que, incluyendo los factores que resultaron con un efecto significativo en este primer Diseño, se incorporen nuevos factores industriales de producción, que permitan seguir avanzando en la eliminación total de esta pérdida de barniz.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Pero-Sanz J.A. Aceros. Metalurgia Física. Selección y Diseño. 1ª Edición. Editoriales Dossat 2000, 2004. 558p. ISBN: 84-89656-54-1
- [2] Asensio J., Romano G., Martínez V.J., et al. "Ferritic steels - Optimization of hot-rolled textures through cold rolling and annealing". Materials Characterization. Vol.47-2 p.119-127. DOI: 10.1016/S1044-5803(01)00160-7 (2001)
- [3] Ramachandran K.M., and Tsokos C.P. Mathematical Statistics with Applications. First Edition. Elsevier, 2009. 804p. ISBN: 978-0-12-374848-5
- [4] Tanco M., Viles E., Ilzarbe L., Álvarez M.J. "Implementation of Design of Experiments projects in industry". Applied Stochastic Models in Business and Industry. Vol 25-4 p. 478-505. DOI: 10.1002/asmb.779 (2009)
- [5] Cox D.R., Reid N. The Theory of Design of Experiments. USA. Chapman & Hall/CRC, 2000. 336p. ISBN: 9781584881957
- [6] Montgomery D., Runger G. Probabilidad y Estadística aplicadas a la Ingeniería. Urbina Medal E.G. (traductor). 1ª Edición. México D.F., McGraw Hill, 2001. 895p. ISBN: 9701010175
- [7] Prat Bartés A., Tort-Martorell L., Labrés X., Grima Cintas P., Pozueta Fernández L. Métodos Estadísticos. Control y Mejora de la Calidad. 1ª Edición. Barcelona: Ediciones de la Universidad Politècnica de Catalunya, S.L., 1997. 300p. ISBN: 84-8301-222-7
- [8] Box G., Hunter S., Hunter W.. Estadística para Investigadores. Tomás Morer X (traductor). 2ª Edición. Barcelona: Reverté, 2008. 630p. ISBN: 978-84-291-5044-5
- [9] Richard A.J. Probabilidad y Estadística para Ingenieros. Campos Olguin V (traductor). 8ª Edición. México D.F.: Pearson Educación, 2012. 552p. ISBN: 978-607-32-0799-7