

Optimización de crimpado en amortiguadores neumáticos por medio de parámetros de diseño usando análisis de elemento finito y método de Taguchi

Javier Acosta Ugalde¹

Resumen - Este trabajo estudia el efecto de los parámetros de diseño que son controlables dentro del proceso de crimpado de amortiguadores neumáticos. Se estudia el efecto en la perdida de presión superficial (PPS) debido a la disminución de temperatura máxima esperada, utilizando herramientas de Análisis de Elemento Finito (FEM) y Diseño de Experimentos por medio del método de Taguchi. El objetivo es identificar que niveles de los parámetros minimizan la perdida de presión superficial, al tiempo de robustecer el producto al ser menos sensibles a los factores de ruido.

Se consideran tres componentes responsables de la presión superficial: Anillo de soporte, Anillo de crimpado, y Superficie de crimpado. La variación en la presión superficial y en la perdida de presión superficial dentro de un mismo producto se debe a la variación de las propiedades mecánicas de los materiales de estos componentes. Debido a la función que desempeñan los anillos de crimpado y de soporte al ser los responsables de retener la presión en la zona de crimpado, y a la modificación de sus límites de cedencia elástica ($Rp0.2$) debido a la deformación en frío, este estudio considera como factores de ruido sus límites superior e inferior de cedencia elástica ($Rp0.2$), dando como resultado cuatro factores de ruido de acuerdo con sus combinaciones: $Rp0.2$ Superior para ambos anillos, $Rp0.2$ Inferior para ambos anillos, $Rp0.2$ Superior para el anillo de soporte e inferior para el anillo de crimpado, y $Rp0.2$ Inferior para el anillo de soporte y superior para el anillo de crimpado.

Índice de Términos – Crimpado, Análisis de elemento finito, Método de Taguchi, Presión superficial, Límite de cedencia, Robusto.

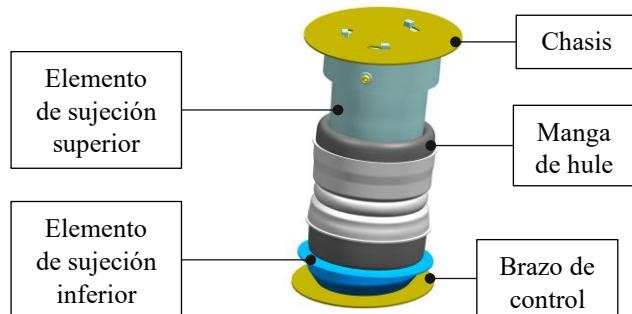
I. INTRODUCCIÓN

A. Amortiguadores Neumáticos

Los amortiguadores neumáticos son elementos de suspensión que han sido usados extensivamente tanto en vehículos de carga como en vehículos de pasajeros, y que reemplazan a los resortes helicoidales de acero con el objetivo de proveer una mejora en el confort y la seguridad del pasajero, ajustar la altura del vehículo de acuerdo con las necesidades de carga, y mejorar la calidad de la conducción por medio del ajuste de su rigidez [1]. Estos dispositivos están compuestos básicamente por dos

elementos de sujeción superior e inferior que sirven como interfaz con el vehículo en el chasis y el brazo de control respectivamente, y por una manga de hule que sirve como cámara de aire y elemento flexible para absorber los movimientos cardánicos de la suspensión (Figura 1).

Figura 1 Amortiguador neumático independiente

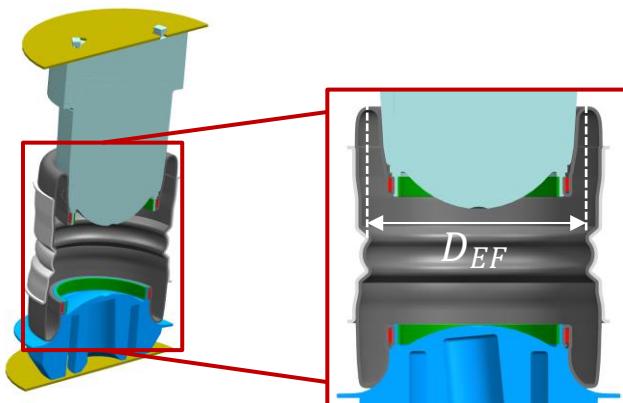


La fuerza generada, o fuerza efectiva (F_{EF}), de un amortiguador neumático depende del producto de la presión dentro del amortiguador (P) y del área efectiva de aire dentro de la manga de hule (A_{EF}), conocida simplemente como área efectiva:

$$F_{EF} = P \cdot A_{EF} = P \frac{\pi \cdot D_{EF}}{4} \quad (1)$$

Durante su funcionamiento, el sistema de amortiguamiento neumático responde a diferentes condiciones de conducción cambiando su altura para variar la fuerza efectiva. Como resultado, la presión dentro del amortiguador y el diámetro efectivo en cualquier punto cambian [2] (Figura 2).

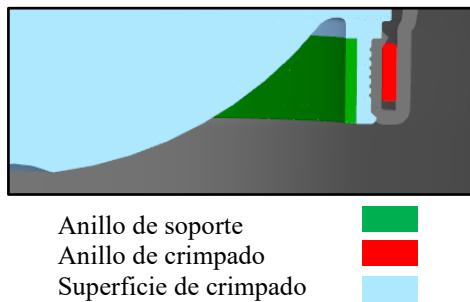
Figura 2 Corte transversal de amortiguador neumático independiente



B. Crimpado

Para mantener la presión absoluta dentro del amortiguador (La cual depende del peso del vehículo y las cargas cinéticas de la suspensión) es necesario unir efectivamente la manga de hule a los elementos de sujeción superior e inferior, para esto se utilizan dos componentes: Los anillos de crimpado y de soporte (Figura 3).

Figura 3 Corte transversal de zona de crimpado



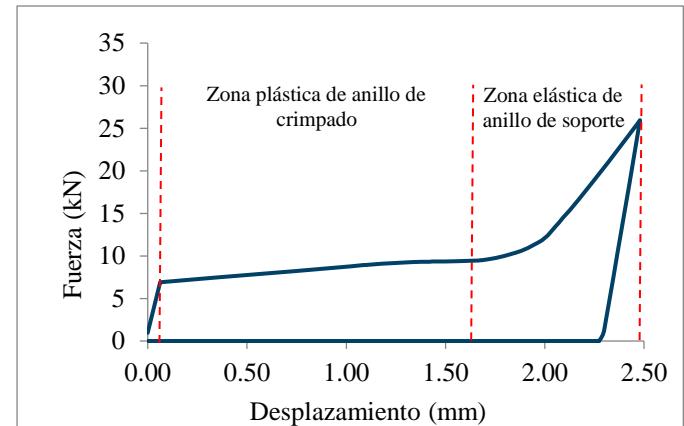
El proceso de crimpado es un método de unión mecánica, muchas veces preferido sobre métodos aditivos o destructivos como la soldadura. Consiste en la deformación plástica de un elemento de retención sobre un elemento de soporte para unirlos físicamente [3]. Particularmente en los amortiguadores neumáticos los elementos en cuestión son el anillo de crimpado y el anillo de soporte, respectivamente, y este método de unión se utiliza para mantener la hermeticidad. Los anillos de crimpado y de soporte ejercen presión sobre la superficie de crimpado de los elementos de sujeción superior e inferior, uniendo la manga de hule de tal forma que no se deslice y/o desensamble durante el comportamiento cinemático, y ejerciendo suficiente presión superficial con el objetivo de mantener la presión absoluta dentro de la cámara de aire. La presión superficial de la zona de crimpado puede ser hasta 20 veces mayor que la presión absoluta dentro del amortiguador.

El objetivo y comportamiento esperado de cada uno de los componentes es el siguiente:

- Anillo de crimpado: Es el responsable de presionar la manga de hule contra la superficie de crimpado. Se busca deformarlo plásticamente 10% de su diámetro inicial.
- Anillo de soporte: Es el responsable de absorber la presión resultante del anillo de crimpado, con el objetivo de proteger a la superficie de crimpado de sufrir una deformación plástica. Trabaja en su zona elástica, por lo que su límite de cedencia mínimo debe ser superior al límite de cedencia máximo del anillo de crimpado.
- Superficie de crimpado: Sirve como interfaz para unir la manga de hule al vehículo. Debido a que la geometría de los elementos de sujeción juega un papel significativo en el volumen de aire, esta sujeta a la factibilidad de distintos procesos de manufactura, por lo que sus materiales pueden variar, desde polímeros hasta aceros.

Una curva de Fuerza – Desplazamiento de un proceso de crimpado luce como se muestra en la Figura 4.

Figura 4 Curva de Fuerza – Desplazamiento en proceso de crimpado



Se espera que esta curva cambie con respecto a los límites de cedencia ($R_p0.2$) de los materiales de los anillos de soporte y de crimpado, y por ende también se espera que la presión superficial y su variación debido a cambios de temperatura se vean afectadas por estos límites, así como por los coeficientes de expansión térmica de los materiales de los tres componentes. El objetivo de este trabajo es encontrar la combinación de los materiales y parámetros más robusta e insensible a los factores de ruido, y que al mismo tiempo minimice la pérdida de presión superficial.

II. MATERIALES Y JUSTIFICACIÓN

Existen distintos estudios que hacen uso del método de Taguchi con una experimentación por medio de Análisis de elemento finito [p.ej. 4-11]. La mayoría de estos estudios, utilizan Taguchi debido a la reducción de experimentos que incorpora, y algunos consideran factores de ruido en el análisis [p.ej. 8-11]. La bondad principal de usar Taguchi se resume en un equilibrio entre optimización y robustez [20]. Como se explica previamente, el objetivo de este trabajo es robustecer el proceso

de crimpado por medio de los parámetros de diseño controlables, siendo menos sensible a los factores de ruido.

Los factores de ruido fueron escogidos debido, además de su función para retener la presión superficial, a la naturaleza de los materiales correspondientes a los anillos de soporte y de crimpado: El trabajo en frio.

A. Trabajo en frio

Es la deformación plástica de los metales debajo de la temperatura de recristalización. La deformación es generada a temperatura ambiente, sin embargo, temperaturas medias pueden usarse para incrementar la ductilidad. Sus principales ventajas y desventajas son [13]:

- a) Ventajas
 - 1. No es necesario que haya un calentamiento.
 - 2. Mejor acabado superficial.
 - 3. Resistencia, fatiga y dureza son mejoradas.
- b) Desventajas
 - 1. Mayores fuerzas requeridas para lograr la deformación plástica.
 - 2. Menos ductilidad resultante, por lo que recocidos adicionales pueden usarse para compensarla.
 - 3. Propiedades anisotrópicas posibles, por lo que los límites de cedencia pueden presentar ventanas muy amplias dentro de un mismo producto.

El trabajo en frio altera la microestructura del material, por lo que las propiedades mecánicas del producto también se verán afectadas [12]. En aceros, dentro de este proceso sucede un fenómeno conocido como envejecimiento por deformación, el cual depende del tiempo y la temperatura, y es causado por la difusión intersticial de átomos de carbono y nitrógeno. Entre mayor sea el contenido intersticial de estos elementos y el tiempo de envejecimiento, este efecto incrementa [15]. El fenómeno puede apreciarse al someter a carga una muestra de acero hasta sobrepasar su límite de cedencia, retirar la carga e inmediatamente volver a colocar la carga. Esto evidenciará un incremento en el límite de cedencia debido a la deformación, sin embargo, si el componente se deja envejecer a temperatura ambiente por determinado tiempo antes de volver a someter la carga, el incremento en el punto de cedencia será mucho mayor [14].

B. Anillos de crimpado y de soporte

Los materiales de los anillos de crimpado y de soporte son aceros con bajo contenido de carbono, y recomendados para trabajo en frio. Todos los anillos de crimpado y de soporte son producidos por medio de trabajo en frio. Sus límites de tracción (Rm) y cedencia elástica (Rp0.2) se muestran en la Tabla 1. Estos límites son obtenidos de las normas correspondientes [16-18].

Tabla 1 Límites de tracción y de cedencia para anillos de crimpado y de soporte

Componente	Material	Norma	Rm (MPa)	Rp0.2 (MPa)
Anillo de crimpado	C4C	EN 10263	330-410	305-385
	DC01	EN 10139	250-315	150-255
	DC01 C390	EN 10139	390-470	310-390
Anillo de soporte	DC01 C590	EN 10139	590-740	520-670
	DC01 C690	EN 10139	690-840	620-770
	S600MC	EN 10149	650-820	600-770

El módulo de Young, la relación de Poisson, y el coeficiente de expansión térmica para estos materiales es 210000 MPa, 0.303 y $1.05 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, respectivamente.

C. Superficie de crimpado

Los materiales de la superficie de crimpado y sus propiedades mecánicas se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2 Propiedades mecánicas para superficie de crimpado

Material	Temp (°C)	Re / Rp0,2 (MPa)	Módulo de Young (MPa)	Coeficiente de Poisson	Coeficiente de expansión térmica (°C $^{-1}$)
AW6082 T6	-	252.8	70000	0.3	2.38x10-5
PA6 GF35	-40	87.6	8100	0.39	4.5x10-5
	23	35.8	7000	0.39	
S420MC	-	500	210000	0.33	1.05x10-5

D. Propiedades plásticas y caracterización mecánica

Las curvas de esfuerzo – deformación plástica para el aluminio y los aceros fueron obtenidas a través de pruebas de tensión conforme a la norma ISO 6892-1. Las condiciones de las pruebas corresponden al método "B" (Taza de esfuerzo) [19]. Se utilizaron 3 muestras para cada material, con las siguientes dimensiones: $a_0 = 2.02$, $b_0 = 6.06$ y $S_0 = 12.18$ (Ancho, Largo y Área transversal, respectivamente).

Las propiedades correspondientes al material PA6 GF35, incluyendo las curvas de esfuerzo – deformación plástica a diferentes temperaturas, fueron obtenidas de la base de datos CAMPUS [20], enfocada en la caracterización de plásticos con distintos nombres comerciales.

Las propiedades de los materiales han sido validadas experimentalmente múltiples ocasiones mediante la producción en serie dentro de Vibracoustic SE [21]. El proceso de validación consiste en la correlación de la curva de Fuerza – Desplazamiento (Figura 4) real, la cual debe encontrarse dentro de los límites pre establecidos por la simulación, considerando los límites de cedencia de los anillos de crimpado y de soporte (Tabla 1). El procedimiento indica que para validar el proceso de crimpado se requieren al menos 125 curvas de Fuerza – Desplazamiento reales [22].

III. ANÁLISIS DE ELEMENTO FINITO

La simulación consta de un modelo Axisimétrico, con elementos cuadráticos o de segundo orden. Estos elementos modelan un anillo con respecto al eje de referencia. Son recomendados para modelar geometrías sometidas a cargas axisimétricas [23]. Las Figuras 6 y 7 muestran el comportamiento que consideran estos elementos en la simulación. Como se muestra, estos elementos cuentan con 3 grados de libertad: r , z y θ .

Se considera un contacto general para todos los componentes, con un coeficiente de fricción de 0.3. El tamaño de elemento general es de 0.5 mm.

A. *Modelo y preprocesamiento*

El modelo toma en cuenta los tres elementos rígidos del proceso de crimpado: Anillo de soporte (a), Anillo de crimpado (c) y superficie de crimpado (b). Adicionalmente se considera un componente rígido para simular la mordaza.

Figura 6 Modelo axisimétrico



Figura 7 Vista isométrica de modelo axisimétrico



La simulación considera 3 pasos:

1. Crimpado: Desplazamiento del anillo de crimpado, considerando 5% de su deformación radial y 1.2% de traslape radial con la superficie de crimpado, dando una deformación radial total igual a 5.9%. La temperatura ambiente es 23°C.
2. Liberación: Se retira la fuerza sometida por el componente de la mordaza. Se considera la retracción de los anillos de acuerdo con su elasticidad.
3. Cambio de temperatura: Se someten todos los componentes a un cambio de temperatura de -40°C. Esta temperatura es definida por el Fabricante del automóvil.

B. *Post-procesamiento*

Se evalúa la presión superficial en la zona media del anillo de crimpado en los pasos 2 y 3, obteniendo mediante su relación un porcentaje de perdida de presión superficial (PPS) con respecto a la presión resultante del paso 2. La Figura 9 muestra

un ejemplo de los resultados de los pasos 1, 2 y 3 en cuanto a esfuerzo de Von Mises. La Figura 8 muestra un ejemplo del resultado de presión superficial en el paso 3.

Figura 8 Resultado de presión superficial en paso 3

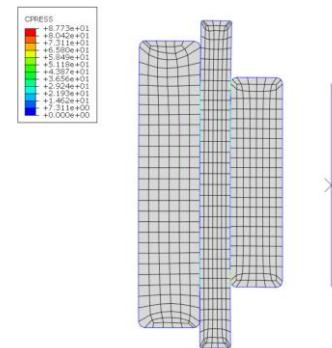
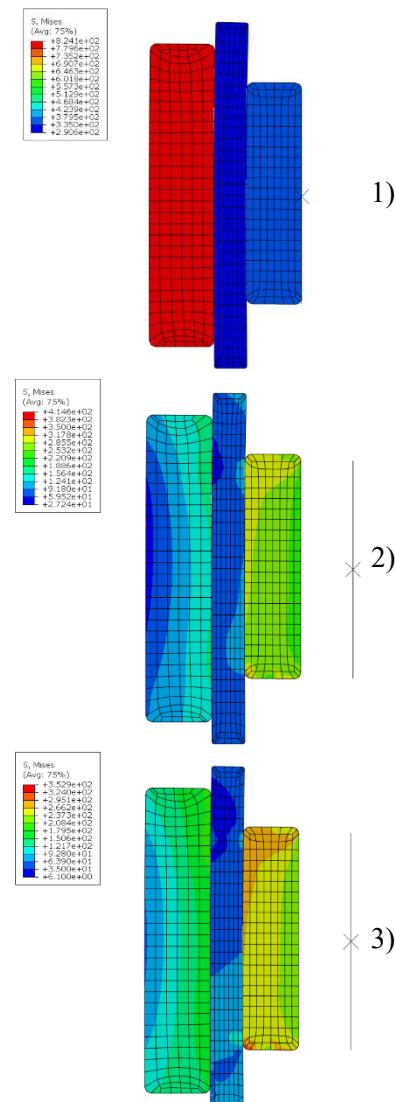


Figura 9 Resultados de esfuerzo (Von Mises) en pasos 1, 2 y 3



IV. MÉTODO DE TAGUCHI

El método de Taguchi representa una aproximación a un diseño robusto, en donde dependiendo del tipo de característica de calidad a controlar se define un indicador de eficiencia, el cual se conoce como relación señal-ruido. La variación en la característica de calidad a controlar se debe a factores controlables que pueden ser monitoreados y definidos, y a factores externos inherentes al proceso o al producto que no pueden ser controlados, los cuales se conocen como factores de ruido. La relación señal-ruido es usada para identificar los niveles óptimos de los factores controlables que además son menos sensibles a los factores de ruido [24].

Este trabajo busca analizar la perdida de presión superficial debido a la disminución de temperatura máxima esperada por lo que para su optimización la relación señal ruido es “Menos es mejor”

$$\eta = -10 \log \left[\frac{\left(\sum_{i=1}^n y_i^2 \right)}{n} \right] \quad (2)$$

A. Arreglo ortogonal

Los diseños de experimentos basados en el método de Taguchi hacen uso de arreglos ortogonales, en donde cada nivel de los factores ocurre el mismo número de veces para cada configuración de prueba de todos los demás factores [25]. Esto permite hacer una comparación balanceada de todos los niveles de los factores. Este estudio considera siete factores de control con tres niveles cada uno, y dos factores de ruido con dos niveles cada uno, por lo que se utiliza un arreglo interno L27 y un arreglo externo L4. Los factores de control y de ruido se muestran en las Tabla 3 y 4, respectivamente.

Tabla 4 Factores de ruido y sus niveles

Factores de ruido (Arreglo L4)		
Factor	Niveles	
Rp0.2 Anillo de soporte (MPa)	DC01 C590	670
	Máximo	DC01 C690
		S600MC
		770
Rp0.2 Anillo de crimpado (MPa)	DC01 C590	520
	Máximo	DC01 C690
		S600MC
		600
Rp0.2 Anillo de crimpado (MPa)	C4C	385
	Máximo	DC01
		255
		DC01 C390
Rp0.2 Anillo de crimpado (MPa)	C4C	305
	Máximo	DC01
		150
		DC01 C390
		310

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados correspondientes a la perdida de presión superficial (PPS) se pueden observar en la Tabla 5. Las respuestas Señal-Ruido para cada factor son calculadas obteniendo el promedio de las relaciones señal-ruido de la Tabla 5 para cada nivel de cada factor (p.ej. La respuesta del factor A “Material de superficie de crimpado” nivel 1 es calculada promediando las relaciones señal-ruido de las filas 1 a la 9). Por medio de la diferencia entre las respuestas de los niveles 1 a 3 de cada factor es posible obtener una clasificación de la influencia que el factor tiene sobre la perdida de presión superficial. La Tabla 6 muestra las respuestas y los efectos principales (Delta) para cada factor. Podemos observar que los factores A, B y C tienen los efectos más grandes, respectivamente en ese orden, y que el factor E representa el menor efecto.

Factores de control
(Arreglo L27)

Nivel	Material de superficie de crimpado - A	Material de anillo de crimpado - B	Material de anillo de soporte - C	Espesor de superficie de crimpado (mm) - D	Espesor de anillo de crimpado (mm) - E	Espesor de anillo de soporte (mm) - F	Diámetro de crimpado (mm) - G
1	AW6082 T6 (AL)	C4C	DC01 C590	1.5	2	2	80
2	PA6 GF35 (GF35)	DC01	DC01 C690	2	2.5	2.5	100
3	S420MC	DC01 C390	S600MC	2.5	3	3	120

Tabla 3 Factores de control y sus niveles

Tabla 5 Resultados: Perdida de presión superficial

Experimento	Factores de ruido (Arreglo L4)							Rp0.2 Anillo de soporte	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Relación Señal-Ruido (η)	
	Factores de control (Arreglo L27)								Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo		
	Material de superficie de crimpado	Material de anillo de crimpado	Material de anillo de soporte	Espesor de superficie de crimpado	Espesor de anillo de crimpado	Espesor de anillo de soporte	Diámetro de crimpado	PPS1	PPS2	PPS3	PPS4	Respuesta media	Desviación estándar	
1	AL	C4C	DC01C590	1.5	2	2	80	42.3%	37.8%	31.2%	38.6%	37.5%	4.6%	8.5
2	AL	C4C	DC01C590	1.5	2.5	2.5	100	44.6%	39.4%	32.3%	37.2%	38.4%	5.1%	8.3
3	AL	C4C	DC01C590	1.5	3	3	120	43.0%	37.4%	29.5%	32.3%	35.6%	5.9%	8.9
4	AL	DC01C390	DC01C690	2	2	2	80	33.0%	33.7%	27.7%	42.4%	34.2%	6.1%	9.2
5	AL	DC01C390	DC01C690	2	2.5	2.5	100	32.0%	31.4%	27.1%	41.0%	32.9%	5.8%	9.6
6	AL	DC01C390	DC01C690	2	3	3	120	30.0%	28.7%	25.2%	38.0%	30.5%	5.4%	10.2
7	AL	DC01	S600	2.5	2	2	80	25.7%	40.6%	35.3%	30.1%	32.9%	6.5%	9.5
8	AL	DC01	S600	2.5	2.5	2.5	100	24.9%	29.7%	31.4%	28.0%	28.5%	2.8%	10.9
9	AL	DC01	S600	2.5	3	3	120	23.4%	26.5%	28.4%	24.0%	25.6%	2.3%	11.8
10	GF35	C4C	DC01C690	2.5	2	2.5	120	20.8%	26.6%	18.3%	31.2%	24.2%	5.8%	12.1
11	GF35	C4C	DC01C690	2.5	2.5	3	80	25.5%	26.2%	23.2%	34.4%	27.3%	4.9%	11.2
12	GF35	C4C	DC01C690	2.5	3	2	100	27.4%	30.1%	24.1%	35.8%	29.3%	5.0%	10.6
13	GF35	DC01C390	S600	1.5	2	2.5	120	28.5%	24.2%	25.6%	19.7%	24.5%	3.7%	12.2
14	GF35	DC01C390	S600	1.5	2.5	3	80	29.9%	31.7%	25.4%	20.7%	26.9%	4.9%	11.3
15	GF35	DC01C390	S600	1.5	3	2	100	41.9%	26.4%	34.2%	19.0%	30.4%	9.9%	10.0
16	GF35	DC01	DC01C590	2	2	2.5	120	19.1%	21.1%	17.0%	27.0%	21.0%	4.3%	13.4
17	GF35	DC01	DC01C590	2	2.5	3	80	23.1%	20.9%	21.8%	29.3%	23.8%	3.8%	12.4
18	GF35	DC01	DC01C590	2	3	2	100	25.1%	25.8%	21.9%	31.0%	26.0%	3.8%	11.6
19	S420MC	C4C	S600	2	2	3	100	4.3%	4.5%	3.0%	21.5%	8.3%	8.8%	18.9
20	S420MC	C4C	S600	2	2.5	2	120	3.1%	3.6%	2.6%	9.2%	4.6%	3.1%	25.5
21	S420MC	C4C	S600	2	3	2.5	80	4.5%	4.5%	2.3%	7.5%	4.7%	2.1%	25.9
22	S420MC	DC01C390	DC01C590	2.5	2	3	100	6.4%	5.6%	3.9%	11.7%	6.9%	3.4%	22.5
23	S420MC	DC01C390	DC01C590	2.5	2.5	2	120	5.8%	4.9%	3.8%	15.4%	7.5%	5.3%	21.1
24	S420MC	DC01C390	DC01C590	2.5	3	2.5	80	12.1%	5.7%	3.6%	3.7%	6.3%	4.0%	22.9
25	S420MC	DC01	DC01C690	1.5	2	3	100	2.6%	2.5%	2.5%	3.3%	2.7%	0.4%	31.2
26	S420MC	DC01	DC01C690	1.5	2.5	2	120	2.0%	2.2%	2.2%	2.7%	2.3%	0.3%	32.9
27	S420MC	DC01	DC01C690	1.5	3	2.5	80	1.4%	1.5%	1.5%	2.1%	1.6%	0.3%	35.6

Tabla 6 Respuestas para relaciones señal-ruido de la perdida de presión superficial – Mas pequeño es mejor

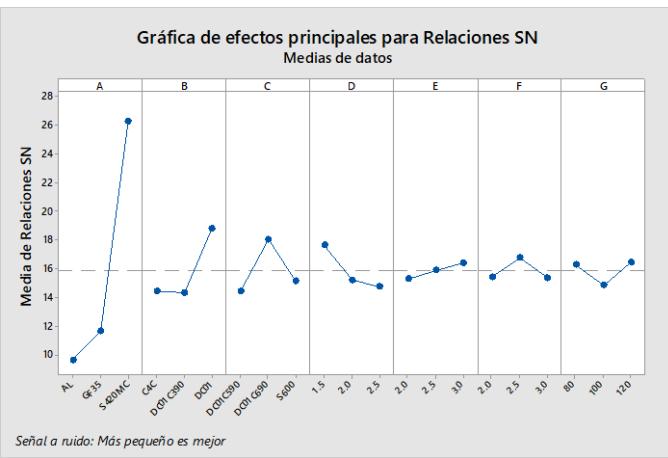
Nivel	A	B	C	D	E	F	G
1	9.648	14.426	14.404	17.638	15.281	15.434	16.280
2	11.641	14.334	18.056	15.199	15.891	16.760	14.839
3	26.283	18.812	15.112	14.736	16.400	15.377	16.453
Delta	16.635	4.478	3.652	2.902	1.118	1.383	1.614
Clasificar	1	2	3	4	7	6	5

Tabla 7 Análisis de Varianza de Medias

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
A	2	0.379644	0.379644	0.189822	1421.99	0.000
B	2	0.012713	0.012713	0.006356	47.62	0.000
C	2	0.002158	0.002158	0.001079	8.08	0.006
D	2	0.001208	0.001208	0.000604	4.52	0.034
E	2	0.000039	0.000039	0.000019	0.14	0.867
F	2	0.003069	0.003069	0.001534	11.49	0.002
G	2	0.004489	0.004489	0.002245	16.82	0.000
Error residual	12	0.001602	0.001602	0.000133		
Total	26	0.404921				

Por medio del análisis de los efectos principales de cada nivel, es posible identificar cual es la combinación que favorece la robustez del producto, siendo la que representa la menor sensibilidad a los factores de ruido mientras minimiza la respuesta (Figura 10).

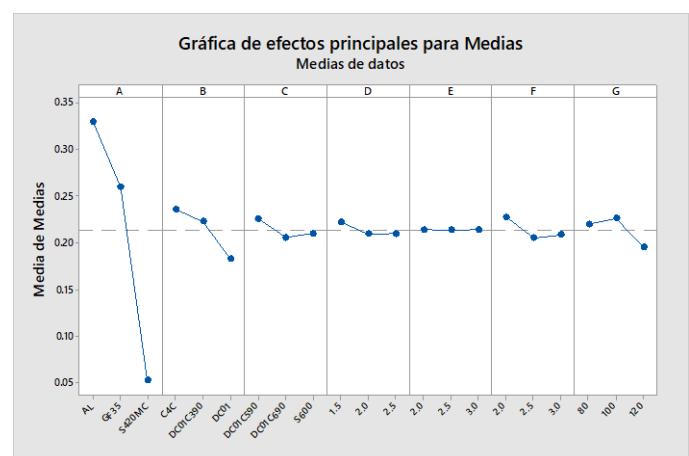
Figura 10 La combinación ideal para robustecer el proceso y minimizar la perdida de presión superficial es A3, B3, C2, D1, E3, F2 y G1/3



Es posible ver que la combinación ideal corresponde al experimento 27, con una pérdida de presión superficial promedio de 1.6%. De igual forma, esta combinación presenta

la relación señal ruido más alta, con un valor de 35.64, por lo que podemos concluir que la combinación que minimiza la perdida de la presión superficial también es la más robusta.

Considerando como principio de significancia una comparación con el valor $P < 0.05$, no hay suficiente evidencia estadística para concluir que el factor E tiene un efecto significativo en la variable de respuesta (Tabla 7). De igual forma es posible observar esto en la Grafica de efectos principales para Medias (Figura 11)

Figura 11 Efectos principales para medias

Además, podemos concluir que los experimentos correspondientes a las combinaciones A3, B3 y C2, representan los experimentos más robustos y con mejor resultado en la pérdida de presión superficial, con una desviación estándar de 0.34% y una pérdida de presión superficial promedio de 2.2%. Se recomienda hacer uso de esta combinación.

VI. CONCLUSIÓN

Este estudio presenta un método para la optimización del proceso de crimpado en amortiguadores neumáticos dentro de la etapa de diseño, con el objetivo de disminuir la perdida de presión superficial y robustecer el producto.

Se hace uso del Análisis de Elemento Finito como medio de experimentación y del método de Taguchi como base para la creación de un diseño de experimentos balanceado. Se consideran como factores de ruido los límites de cedencia de los materiales de los componentes que fueron fabricados mediante trabajo en frío, debido a la amplitud de estos límites inherentes al proceso de trabajo en frío. Los factores de control son parámetros que pueden decidirse desde la etapa de diseño, por lo que la combinación óptima de estos parámetros representa también una guía de diseño para futuros proyectos. En total se corrieron 108 experimentos, considerando los 4 factores de ruido multiplicados por las 27 combinaciones correspondientes al arreglo ortogonal interno. La combinación óptima (más robusta y mejor resultado de perdida de presión superficial) fue determinada y verificada, coincidiendo con el experimento número 27.

VII. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la empresa Vibracoustic SE, Unidad de negocio de Amortiguadores Neumáticos, por el apoyo técnico para la realización de este proyecto.

REFERENCIAS

- [1] TrelleborgVibracoustic. (2015). Automotive Vibration Control Technology: Fundamentals, Materials, Construction, Simulation, and Applications (1st ed.). Vogel Business Media.
- [2] Oman S, Nagode M. The influence of piston shape on air-spring fatigue life. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*. 2018; 41:1019–1031. <https://doi.org/10.1111/ffe.12748>
- [3] PEI-Genesis. (n.d.). Soldering Vs. Crimping: Advantages & Disadvantages. Recuperado October 5, 2023, from <https://blog.peigenesis.com/soldering-vs-crimping-advantages-disadvantages>
- [4] Hoang, V.-H., Huynh, N.-T., Nguyen, H., & Huang, S.-C. (2019). Analysis and optimal design a new flexible hinge displacement amplifier mechanism by using Finite element analysis based on Taguchi method. 2019 IEEE Eurasia Conference on IOT, Communication and Engineering (ECICE), 259–262. <https://doi.org/10.1109/ECICE47484.2019.8942671>
- [5] Yang, Z., Cui, C., Wan, X., Zheng, Z., Yan, S., Liu, H., Qu, F., & Zhang, K. (2022). Design feature combinations effects of running shoe on plantar pressure during heel landing: A finite element analysis with Taguchi optimization approach. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbioe.2022.959842>
- [6] Okokpuije, I. P., Chima, P. C., & Tartibu, L. K. (2022). Experimental and 3D-Deform Finite Element Analysis on Tool Wear during Turning of Al-Si-Mg Alloy. *Lubricants*, 10(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/lubricants10120341>
- [7] Marchiori, G., Berni, M., Boi, M., Petretta, M., Grigolo, B., Bellucci, D., Cannillo, V., Garavelli, C., & Bianchi, M. (2019). Design of a novel procedure for the optimization of the mechanical performances of 3D printed scaffolds for bone tissue engineering combining CAD, Taguchi method and FEA. *Medical Engineering & Physics*, 69, 92–99. <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2019.04.009>
- [8] Karimpour, S. R., Besmi, M. R., & Mirimani, S. M. (2020). Optimal design and verification of interior permanent magnet synchronous generator based on FEA and Taguchi method. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 30(11). <https://doi.org/10.1002/2050-7038.12597>
- [9] Huh, H., Heo, J. H., & Lee, H. W. (2003). Optimization of a roller levelling process for Al7001T9 pipes with finite element analysis and Taguchi method. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(4), 345–350. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00269-9](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00269-9)
- [10] Li, Y., Liang, D., Fan, Y., Xin, J., & Zhuang, W. (2019). Application of Taguchi method and finite element analysis in optimization of automobile roof technical parameters. 2019 IEEE International Conference on Smart Manufacturing, Industrial & Logistics Engineering (SMILE), 75–79. <https://doi.org/10.1109/SMILE45626.2019.8965292>
- [11] Wang, H. T., Liu, Z. J., Chen, S. X., & Yang, J. P. (1999). Application of Taguchi method to robust design of BLDC motor performance. *IEEE Transactions on Magnetics*, 35(5), 3700–3702. <https://doi.org/10.1109/20.800636>
- [12] The Ultimate Guide for Beginners: What is Cold Working Metal? - Metal Wood Working. (2023, April 4). <https://metalwoodworking.com/the-ultimate-guide-for-beginners-what-is-cold-working-metal/>
- [13] Degarmo, E. Paul; Black, J T.; Kohser, Ronald A. (2003). Materials and Processes in Manufacturing (9th ed.). Wiley. ISBN 0-471-65653-4
- [14] Loporcaro, G., Pampanin, S., & Kral, M. V. (2019). Long-term strain-ageing effects on low-carbon steel reinforcement. *Construction and Building Materials*, 228, 116606. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.332>
- [15] Cottrell, A. H., & Bilby, B. A. (1949). Dislocation Theory of Yielding and Strain Ageing of Iron. *Proceedings of the Physical Society. Section A*, 62(1), 49–62. doi:10.1088/0370-1298/62/1/308
- [16] UNE-EN 10139:2016 Flejes de acero bajo en carbono, no recubiertos. (n.d.). Retrieved October 8, 2023, from <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=norma-une-en-10139-2016-n0057232>
- [17] UNE-EN 10149-2:1996 Productos planos laminados en caliente de acero. (n.d.). Retrieved October 8, 2023, from <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=norma-une-en-10149-2-1996-n0010607>
- [18] UNE-EN 10263-2:2018 Barras, alambrón y alambre de acero para la construcción. (n.d.). Retrieved October 8, 2023, from <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0059902>
- [19] UNE-EN ISO 6892-1:2020 Materiales metálicos. Ensayo de tracción. (n.d.). Retrieved October 8, 2023, from <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0064441>
- [20] CAMPUSplastics. (n.d.). Retrieved October 8, 2023, from <https://www.campusplastics.com/>
- [21] Air Springs – Vibracoustic SE. (n.d.). Retrieved October 8, 2023, from <https://www.vibracoustic.com/en/product-category/light-vehicle-products/air-springs/>
- [22] Quality HSE - OPI-69-7.2-0007 Crimping Release Process—All Documents. (n.d.). Retrieved October 8, 2023. (El detalle de este procedimiento es información confidencial, y su reproducción por medios ajenos a la compañía está prohibido)
- [23] Dassault Systèmes. (2014). Abaqus 6.14 Online Documentation. Recuperado October 5, 2023, from <http://130.149.89.49:2080/v6.14/>
- [24] Mitra, A. (2011). The Taguchi method. *WIREs Computational Statistics*, 3(5), 472–480. <https://doi.org/10.1002/wics.169>
- [25] 14.1: Design of Experiments via Taguchi Methods - Orthogonal Arrays. (2020, May 19). Engineering LibreTexts. [https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial_and_Systems_Engineering/Chemical_Process_Dynamics_and_Controls_\(Woolf\)/14%3A_Design_of_Experiments/14.01%3A_Design_of_Experiments_via_Taguchi_Methods_-_Orthogonal_Arrays](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial_and_Systems_Engineering/Chemical_Process_Dynamics_and_Controls_(Woolf)/14%3A_Design_of_Experiments/14.01%3A_Design_of_Experiments_via_Taguchi_Methods_-_Orthogonal_Arrays)