

Implementación de un diseño de experimentos para una mejora estructural de un asidero apoyapiernas

Josep M. Puigoriol-Forcada^{1,3}, Andrés-Amador García-Granada^{2,3}, Ferran López-Navarro³, Guillermo Reyes-Pozo³

¹ Laboratorio de Ingeniería de Productos Industriales, LEPI (España)

² Laboratorio SEAT-IQS (España)

³ IQS School of Engineering, Universidad Ramon Llull (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7762>

1. INTRODUCCIÓN

La metodología conocida como Diseño de Experimentos (*Design of Experiments*, DoE) se establece a partir de herramientas basadas en el álgebra y la estadística para analizar las relaciones entre cantidades físicas objeto de estudio (respuesta), y sus parámetros independientes fuentes de variación (factores). Dicha metodología tiene como principal objetivo reducir el número de experimentos, logrando gestionar la cantidad suficiente de información para obtener una respuesta clara y lo más eficiente posible[1]. Existen dos enfoques principales: el de los diseños de selección, utilizados para identificar cualitativamente los factores más importantes entre los enumerados por el experimentador, y el de la creación de superficies de respuesta, cuando se desea saber cómo la respuesta varía cuantitativamente. Estos dos enfoques son complementarios y con frecuencia un diseño de filtrado de parámetros se complementa con la obtención de superficies de respuesta [2][3].

Existen numerosos casos de aplicación de esta herramienta en el entorno CAD, como ayuda para la toma de decisiones a lo largo del desarrollo, especialmente en aquellas situaciones donde es relativamente cómodo obtener experiencias mediante macros automáticas. De esta forma pueden encontrarse ejemplos de su aplicación en casos de modelos 3D donde la creación de malla es bastante automática, o en aquellos donde se realizan análisis sobre una sección 2D [4]–[7]. Sin embargo, cuando la creación de cada modelo, que representa una experiencia, conlleva tiempo, suele haber una tendencia al descarte. No es de extrañar que en una ingeniería de desarrollo de producto sumergida en su agitado ritmo diario, especialmente en algunos sectores

muy competitivos como es el de la automoción, muy pocas veces se piense en su implementación.

En este estudio se presenta un caso de optimización estructural utilizando el laboratorio virtual (basado en el Método de los Elementos Finitos, MEF), donde la obtención de cada experiencia requiere cierto tiempo de modelización, por tratarse de modelos con elementos tipo placa.

2. OBJETIVOS. CONTEXTUALIZACIÓN

Se persigue establecer, de forma cuantificable, la influencia de las distintas posibles modificaciones sobre un diseño de partida de un conjunto asidero apoyapiernas (consola central de un automóvil), para una optimización de su rigidez estructural. Se desea evaluar las posibles interferencias entre los parámetros de estudio definidos inicialmente. Estos resultados deben poder ayudar en la toma de decisiones sobre los posibles rediseños de mejoras (modificaciones del molde).

La función principal del conjunto asidero es la de protección de las piernas. En

concreto, impedir posicionar una rodilla de los ocupantes delanteros de un vehículo en el área central del tablero (alineada con la consola central), con el fin de minimizar los daños en el menisco en el caso de coche frontal o posterior a baja velocidad [8]. Dicho conjunto asidero debe ser lo suficientemente rígido para impedir este posicionamiento, por lo que el cuaderno de cargas refleja ensayos para garantizar un nivel mínimo de rigidez estructural.

Se parte de un diseño inicial con una pobre respuesta estructural a flexión frente a un ensayo de fuerza estática puntual (fuerza central), siendo la variable de validación la flecha lateral (deformación máxima en la dirección de aplicación de la fuerza, dirección Y). El objetivo del ensayo se exige al conjunto completo del asidero formado por una pieza tapa y una pieza contratapa (ver Figura 1). Siendo la contratapa la que presenta la aportación principal a la rigidez del conjunto, el objetivo se impone sólo a esta pieza, para facilitar los análisis.

2. OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL. DISEÑO DE EXPERIMENTOS

En base a las primeras simulaciones iniciales, que han detectado una insuficiente respuesta estructural, se desea realizar el estudio de modificaciones en el diseño de la contratapa antes de realizar un cambio de material. Un nuevo material *composite* reforzado con fibra de vidrio para esta pieza, con un módulo elástico mayor, presentaría mejoras significativas en la respuesta pero encarecería la pieza de forma considerable, por lo que se quiere evitar esta solución.

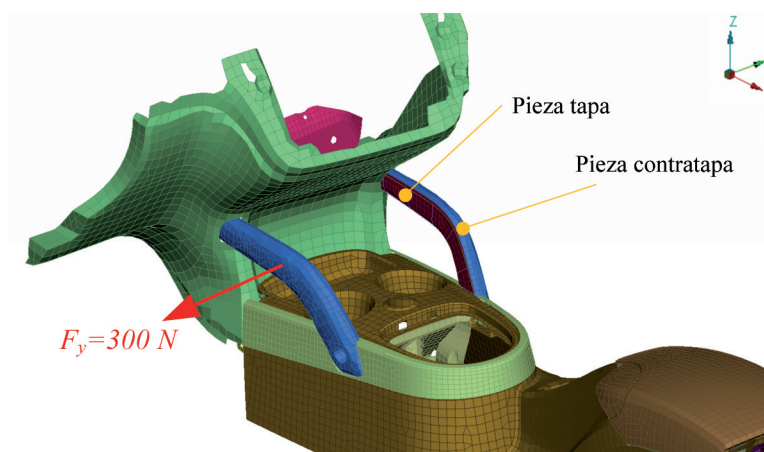


Fig. 1: Vista conjunto asidero apoyapiernas (tapa y contratapa) ensamblado con la consola central. Ensayo de fuerza estática puntual de 300N, dirección Y

Con la finalidad de orientar el estudio de búsqueda de posibles soluciones, se ha utilizado la técnica de la creación de un diagrama causa-efecto.

2.1. DIAGRAMA CAUSA-EFECTO

Se ha trazado un diagrama causa-efecto [9] con un equipo multidisciplinar formado por un ingeniero líder responsable de simulación, un técnico de producto responsable del conjunto de estudio, un técnico de utillajes, un técnico de calidad, un técnico de área CAD y el jefe de área CAD-CAE. Este equipo de trabajo resulta importante para establecer, en una primera etapa y de la forma más generalista posible, los parámetros que puedan estar relacionados con la rigidez del conjunto protector. Se muestra la visión del equipo en el diagrama de la Figura 2, resultado de la sesión de trabajo, exactamente como se desarrolló.

El proceso de creación del diagrama se ha realizado estableciendo las categorías generales y, posteriormente, se han determinado las posibles causas o variables de influencia. Se han establecido como categorías principales el material, la sollicitación, las condiciones de entorno y el diseño (geometría). De estas categorías se derivan para su implementación en el diagrama: el material, el modo de solici-

tación, los diseños en zona inferior, superior y central, y la posible influencia de la pieza tapa.

En la reunión se ha visualizado la simulación realizada con el modelo de referencia, estatus actual, para la comprensión de la deformación de la pieza de estudio (ver detalle superior izquierdo en Figura 2), como aporte al proceso de búsqueda de causas.

Antes de desarrollar un DoE como técnica de estimación de los efectos sobre la respuesta, resulta muy importante filtrar las variables que se crean más efectivas, para lograr un DoE óptimo. El número de experimentos encarece de forma considerable el estudio, aun realizando los ensayos mediante laboratorio virtual (MEF). Tal como se ha comentado anteriormente se descarta, a priori, un cambio de material. La interacción tapa-contratapa se cree poco influyente. Además, la implementación de esta categoría en modelos CAE es muy costosa (necesidad de modelar detalles para los clips, las grapas y una modelización correcta del apriete entre piezas). El modo de sollicitación viene dictado por el cuaderno de cargas (ensayos detallados) del pliego de condiciones. Consecuentemente, las modificaciones (variables de estudio) se plantean como nervios añadidos y posibles aumentos de

espesores (ver Figura 4, donde pueden compararse los cambios de cada propuesta versus la referencia inicial). Las propuestas de nervios responden a dar rigidez en la fijación inferior y también de forma global. El diseño actual de la fijación superior permite pocas opciones en la zona.

2.2. SELECCIÓN DE LOS FACTORES DE ESTUDIO Y DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Los nervios a introducir han dado pie a 3 factores de estudio, que representan 3 tipos de modificaciones en molde para añadir nervios: A, B y C. Los factores de estudio se muestran en la Figura 3, conjuntamente con el modelo referencia.

La selección del plan de experimentación se basa en el *know how* adquirido por parte del ingeniero de simulación a lo largo de los años: pocos factores se creen relevantes frente a la respuesta estructural del tipo nerviado. La implementación de series de nervios no siempre es efectiva debido a que en muchos casos el efecto de la segunda serie resulta redundante con la primera. Al final puede obtenerse una pieza demasiado nerviada, poco deseable debido a problemáticas asociadas al molde. Se plantea un nerviado para paliar la deformación local observada en la fijación inferior, un nerviado longitudinal (efectivo

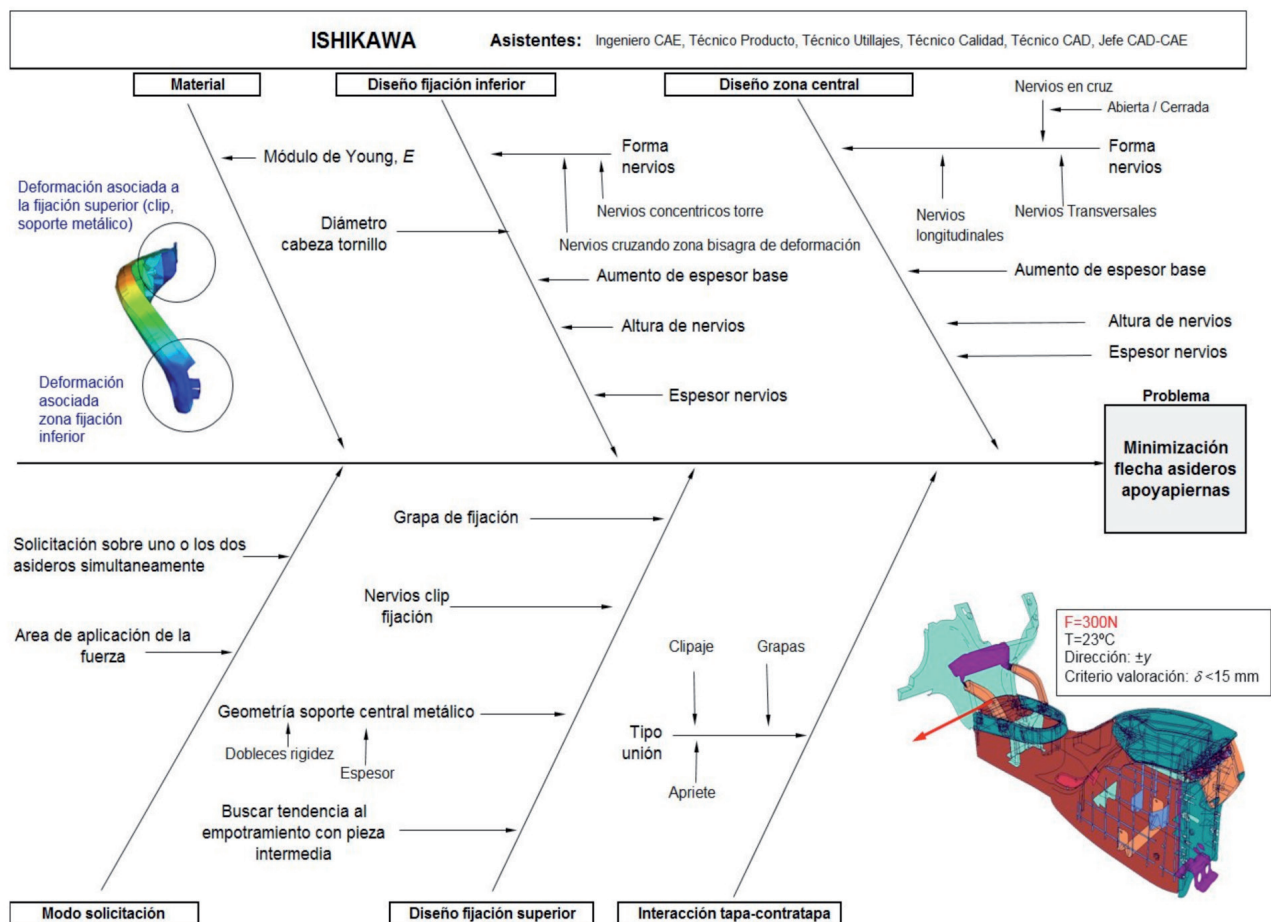


Fig.2: Diagrama causa-efecto. Detalle de la deformación de la contratapa (aumentada). Detalles del caso de carga

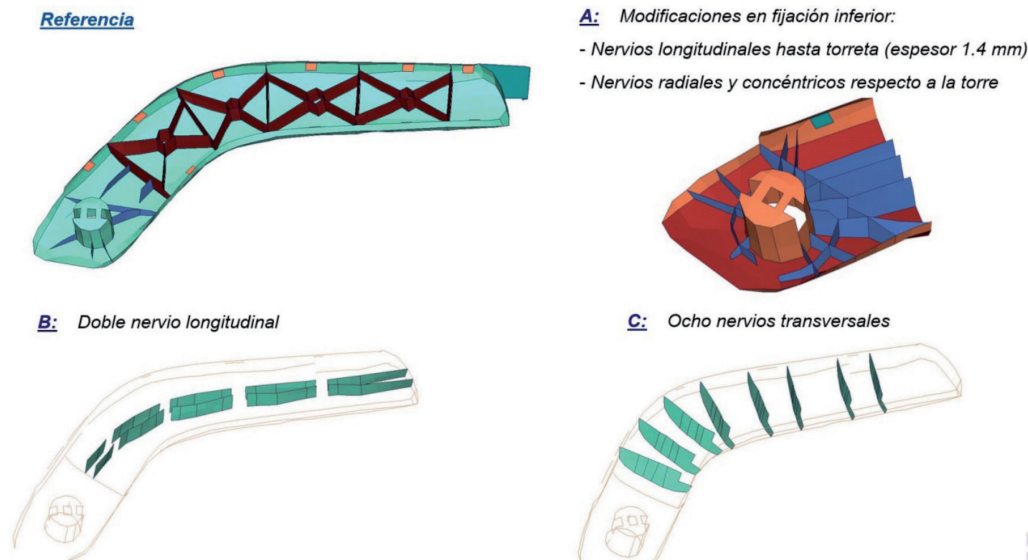


Fig. 3: Modelo de estudio y factores de estudio. Detalles sobre modelos CAE

en vigas) y uno transversal. Este último se cree que puede introducir rigidez si se combina con los otros nervios.

Debido a que se manejan pocos factores de estudio, se selecciona el Modelo Factorial Completo [2], donde cada variable puede presentar dos niveles. Por consiguiente, se tratarán un total de 8 experiencias (2^3), situadas en el cubo de extremos de las 3 variables, sin experiencia central. Este tipo de diseño permite estimar los efectos principales lineales de las variables de estudio y las interacciones de segundo y tercer orden. Los resultados se interpretan mejor que los de otros diseños. Existe también la posibilidad de añadir experimentos para una estimación cuadrática (puntos estrellas) posteriormente, si se cree necesario. Esto representaría introducir un nivel medio de implementación, que podría tener sentido solo en algunos casos, e interesante según la interacción entre los factores.

Se descarta la elección del Diseño Factorial Fraccional por la viabilidad de implementación de estos 8 ensayos virtuales del diseño completo. Aunque los modelos CAE con elementos tipo placa son costosos de modelar (obtención de la fibra intermedia de las caras de las piezas), la existencia de pocos factores y el grado de trabajo que representa cada modificación ha limitado el trabajo de preprocesamiento. Una regla orientativa a seguir, adoptada por ingenierías para este tipo de diseño, es no ir más lejos del valor de 16 experiencias, para unos tiempos de modelado razonables.

También se descarta el diseño bloqueado por qué no existe ninguna variable externa que influya en los análisis. Un caso para el planteamiento de un bloque

sería el hecho de usar softwares distintos para las simulaciones, por ejemplo.

2.3. NIVEL DE LOS PARÁMETROS. EXPERIENCIAS

Tal como se ha comentado anteriormente, cada parámetro se evalúa a dos niveles: + modificación implementada sobre el modelo original (Referencia), y - modificación no implementada. En la Figura 4 se muestran los 8 modelos que representan las experiencias a simular basándose en la combinatoria del diseño de experimentos.

Las experiencias se resumen en la Tabla 1. Los nombres de los modelos se re-

lacionan directamente con las modificaciones implementadas (nivel +).

3. RESULTADOS

En este apartado se presentan los datos obtenidos mediante simulación. A partir de los valores obtenidos de la flecha lateral para cada modelo se procesa el algoritmo de Yates, para posteriormente poder interpretar resultados.

3.1. RESPUESTA FLECHA

Se muestra en el siguiente diagrama de barras (Figura 5) la comparativa de la respuesta flecha lateral, en mm, versus el valor objetivo deseado (15 mm). Tal como puede observar-

Modelos	A	B	C	Niveles
--- (Ref)	-	-	-	+ Con la modificación
A	+	-	-	- Sin la modificación
B	-	+	-	
AB	+	+	-	
C	-	-	+	
AC	+	-	+	
BC	-	+	+	
ABC	+	+	+	

Tabla 1. Esquema de experiencias

A	B	C	Respuesta (mm)	1	2	3	Div	Estim. (mm)	Efecto
-	-	-	19.44	35.14	66.11	126.14	8	15.77	Media
+	-	-	15.7	30.97	60.03	-21.06	4	-5.27	A
-	+	-	18.47	30.74	-9.71	-5.62	4	-1.41	B
+	+	-	12.5	29.29	-11.35	-1.98	4	-0.50	AB
-	-	+	18.27	-3.74	-4.17	-6.08	4	-1.52	C
+	-	+	12.47	-5.97	-1.45	-1.64	4	-0.41	AC
-	+	+	17.42	-5.8	-2.23	2.72	4	0.68	BC
+	+	+	11.87	-5.55	0.25	2.48	4	0.62	ABC

Suma cuadrados = 2055.44 2055.44
Suma = 126.14

Tabla 2: Matriz de Yates

Nº orden	1	2	3	4	5	6	7	8
Efecto, mm	-5.27	-1.52	-1.41	-0.50	-0.41	0.62	0.68	15.77
Identidad efectos	A	C	B	AB	AC	ABC	BC	Media
Probabilidad	6.25	18.75	31.3	43.8	56.25	68.75	81.25	93.75

Probabilidad $P = 100 (i-0,5)/n$

Tabla 3: Tabla de probabilidades de efectos ordenados

se, existen tres modelos que cumplen el requerimiento, habiendo un cuarto muy cercano al objetivo.

3.2. ALGORITMO DE YATES

Se establece el siguiente algoritmo de Yates [10] para el factorial completo de

la respuesta (Tabla 2), y se ordenan los efectos tal como puede observarse en la Tabla 3.

Se marca cada factor en papel probabilístico normal, teniendo en cuenta su efecto medio (en horizontal) versus su probabilidad (eje vertical). Puede notarse

que tan solo el factor A no se ajusta a la recta discontinua trazada.

3.3. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Los efectos no significativos y todas la interacciones se distribuyen siguiendo

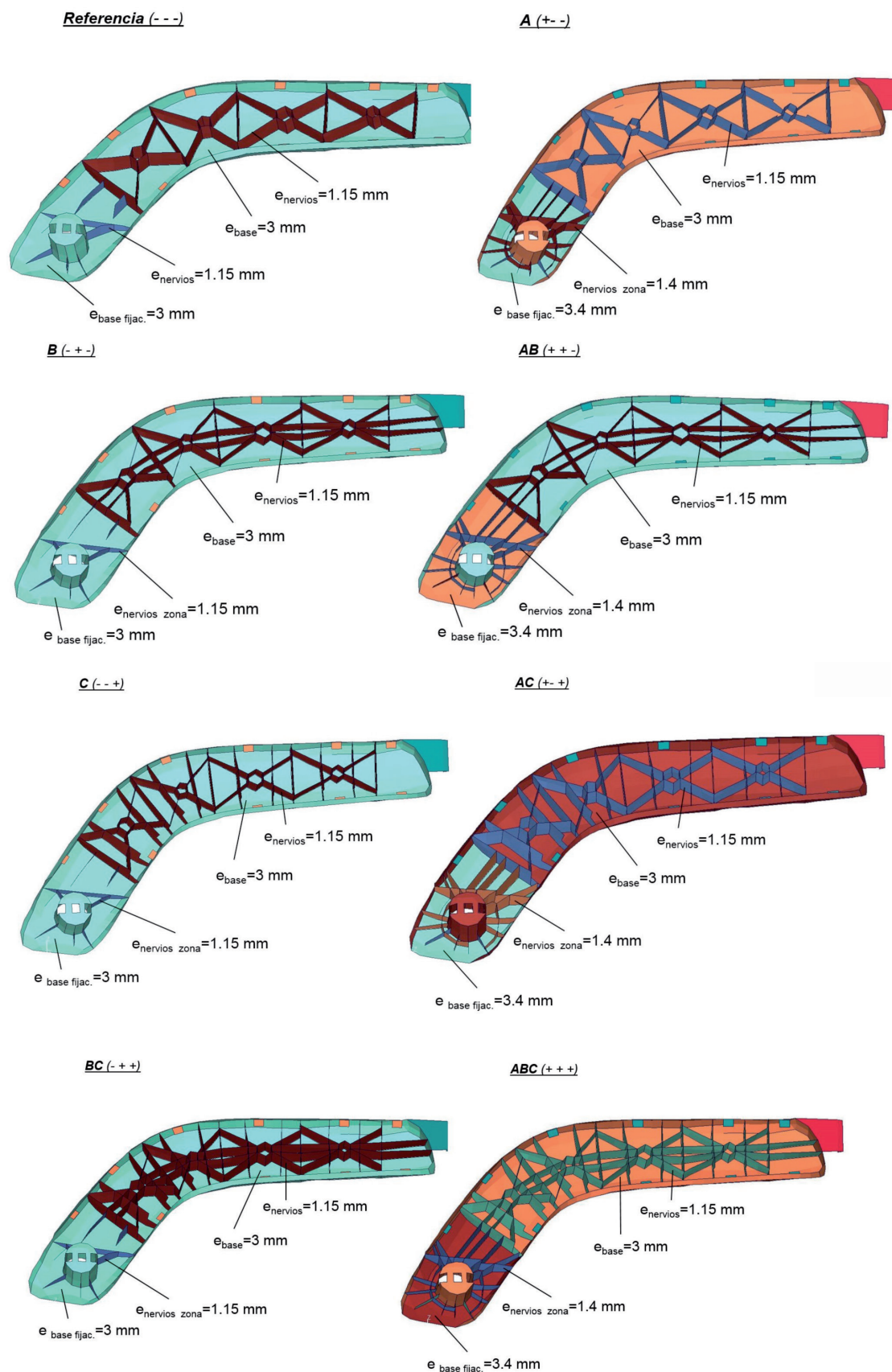


Fig.4: Modelos CAE (8 experiencias)

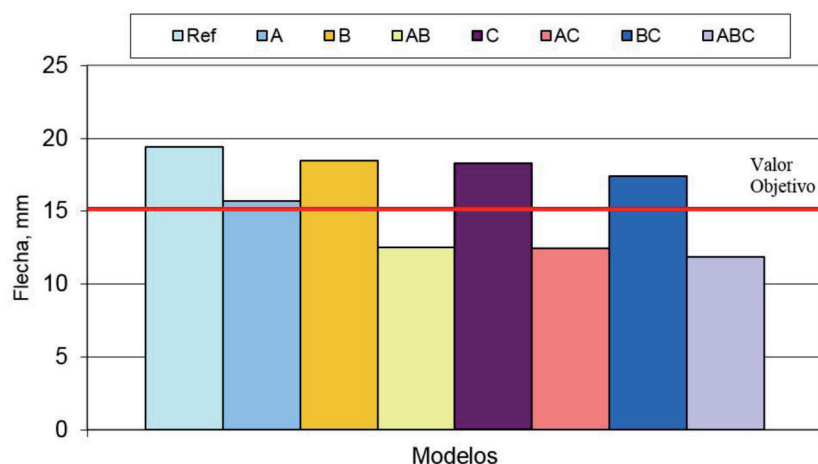


Fig.5. Comparativa de la respuesta flecha lateral, $F=300N$ en y

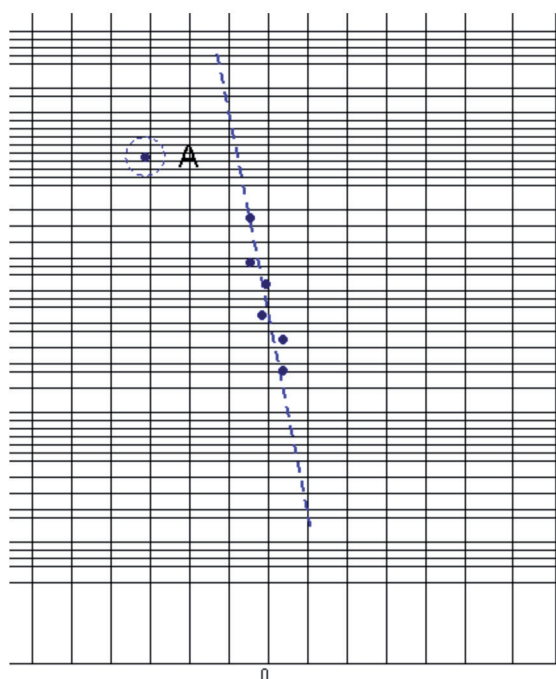


Fig.6: Papel probabilístico normal

una normal con media $0, N(0; \sigma_e)$. Consecuentemente, los puntos que se ajustan a la recta que pasa por $(0,50)$ no tienen una influencia clara sobre la respuesta flecha presentada por el asidero. Como muestra la Figura 6, el único factor significativo es el A: modificaciones en el área inferior. Éste se ajusta a una distribución normal, pero de media distinta. Al implementar la modificación en la fijación inferior (aumento de rigidez local), la flecha se disminuye en unos 5 mm aproximadamente (tabla 3).

Este resultado es coherente con las respuestas de los modelos calculados. Tan solo aquellos que incorporan el factor A (A, AB, AC y ABC) se acercan o superan el objetivo establecido de rigidez. El efecto B y el C, si bien suponen una mejora de rigidez, no son factores tan influyentes

como el A. La introducción de los nervios B y C supondría una densidad de nervios no ideal para el molde, y tampoco para la calidad del acabado superficial de la pieza de estudio, en relación a la mejora de rigidez que representaría.

Por otro lado, ninguna interacción ha resultado significativa: no existe interferencia entre factores.

Se recomienda implementar, como factor influyente, el factor A.

4. CONCLUSIONES

No debe descartarse la posibilidad de implementar un diseño de experimentos en el entorno

CAE durante el proceso de desarrollo por motivos de tiempo de modelización, pues en algunos casos puede ser muy efectivo mediante un diseño controlado en cuanto a número de experiencias, si se filtra adecuadamente el número de factores a introducir en el diseño. Establecer un diagrama causa-efecto para el estudio de la problemática puede resultar de gran ayuda para visualizar todas aquellas causas potenciales. Este mapa facilita también la tarea del filtrado por parte del equipo multidisciplinar.

En el diseño de un asidero apoyapiernas, si se parte de nervios en forma de cruz a lo largo del asidero, la introducción de nervios adicionales longitudinales y/o transversales no aporta una disminución significativa de la flecha del asidero frente al ensayo de sollicitación lateral. Esto es

debido a que dichos nervios resultan redundantes frente a la acción que realizan los primeros nervios implementados en el diseño inicial (nervios en cruz).

La variable de estudio flecha tiene una fuerte relación con las fijaciones. Para el caso de estudio, existe una fuerte influencia del diseño de la fijación inferior. Debe asegurarse un buen comportamiento local en los puntos de sujeción de los asideros.

PARA SABER MÁS

- [1] K. M. Ramchandran and C. P. Tsokos, "Chapter 9 - Design of Experiments," in Mathematical Statistics with Applications in R (Second Edition), Second Edi., K. M. R. P. Tsokos, Ed. Boston: Academic Press, 2015, pp. 459-494.
- [2] D. R. Cox and N. Reid, The Theory of the Design of Experiments. USA: CHAPMAN & HALL/CRC, 2000.
- [3] R. L. Mason, R. F. Gunst, and J. L. Hess, Statistical design and analysis of experiments (with applications to engineering and science). New York: John Wiley & Sons, Ltd., 1989.
- [4] D.-C. Chen, C.-S. You, F.-L. Nian, and M.-W. Guo, "Using the Taguchi Method and Finite Element Method to Analyze a Robust New Design for Titanium Alloy Prick Hole Extrusion," Procedia Eng., vol. 10, pp. 82-87, 2011.
- [5] J. Zhang, D. Wu, J. Zhou, and J. Wang, "Multi-objective Optimization of Process Parameters for 7050 Aluminum Alloy Rib-web Forgings' Precise Forming based on Taguchi Method," Procedia Eng., vol. 81, no. October, pp. 558-563, 2014.
- [6] M. I. Equbal, R. Kumar, M. Shamim, and R. K. Ohdar, "A Grey-based Taguchi Method to Optimize Hot Forging Process," Procedia Mater. Sci., vol. 6, no. Icmpe, pp. 1495-1504, 2014.
- [7] U. a. Dabade and R. C. Bhedasgaonkar, "Casting defect analysis using design of experiments (DoE) and computer aided casting simulation technique," Procedia CIRP, vol. 7, pp. 616-621, 2013.
- [8] D. J. Tichon, "Finite Element Analysis of the Effect of Low-Speed Rear End Collisions on the Medial Meniscus," Master's Theses. Paper 47, University of Connecticut, 2011.
- [9] Kaoru Ishikawa, Introduction to Quality Control, 3rd ed. London: CHAPMAN & HALL, 1989.
- [10] H. Spliid, Design and Analysis af Experiments with k factors having p levels, 1st ed. Lyngby: Technical University of Denmark, 2002.

AGRADECIMIENTOS

Agradecimientos a la empresa SEAT y a Faurecia Interior Systems SALC España por la información a disposición para poder llevar a cabo la implementación de este caso de estudio.