

Optimización por simulación numérica del proceso de peen forming de aleaciones de aluminio

Autor: Miguel A. Castillo Acero
Director de Desarrollo Tecnológico de AERNNOVA
www.aernnova.com

Aernnova es una empresa española dedicada al desarrollo, diseño, industrialización y producción en serie de estructuras aeronáuticas, con su integración de sistemas correspondiente, que es proveedor directo, Tier 1, de los grandes fabricantes mundiales de Aeronaves, Airbus, Boeing, Bombardier, Embraer entre otros.

El sector se ha caracterizado y se caracteriza, por una búsqueda constante de soluciones estructurales óptimas, tanto en peso, como en sus costes de desarrollo, de producción y de mantenimiento a lo largo de su vida económica. En los últimos años se han añadido requerimientos de eco-sostenibilidad que añaden un parámetro más a la ecuación que hay que resolver para alcanzar la mejor solución integral. En la producción de piezas mecanizadas esto se ha traducido en buscar soluciones de mínimo gasto de materia prima y material de corte.

El proceso de conformado en frío por “perdigoneado”, más conocido por su denominación inglesa “Peen Forming”, da una respuesta eficiente al requerimiento de mínimo uso de materia prima metálica. Así, para obtener paneles integrales rigidizados, de una aleación metálica ligera determinada, con cierta curvatura, en lugar de partir de paralelepípedos de una materia prima, de espesores tal que la libren junto con las alturas de los montantes y sus creces de mecanizado, podemos partir de paneles más finos, con el consiguiente ahorro de materia prima recurrente. Este panel más fino se debe mecanizar a cierta geometría, desconocida, para que aplicando “Peen Forming” con ciertos parámetros, inicial-

mente también desconocidos, nos den la pieza final en tolerancias objetivo. El ahorro del proceso se produce como consecuencia no sólo del menor volumen de la materia prima inicial, sino también en la disminución de los tiempos de mecanizado y menor consumo de herramientas de corte. Además, con una combinación óptima de parámetros, podemos conseguir un control de la profundidad y esfuerzos de compresión de las capas superficiales que mejorarán las características de fatiga y propagación de grieta de la pieza. Por otra parte, una barrera del proceso está precisamente en proveer los parámetros que producen las extensiones de la pieza, en las zonas menos comprometidas por fatiga, y que estos esfuerzos sean por debajo de ciertos niveles de seguridad predefinidos.

Bloque de material



Mecanizado del flat pattern



Peen-forming

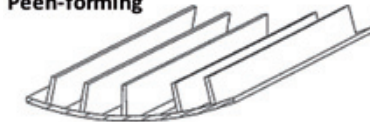


Figura 1: Conformado Peen Forming

Planteado el problema podemos abordar la solución para una pieza determinada por prueba y error sobre diferentes prototipos, hasta obtener un resultado que consideramos suficientemente bueno. Este proceso es largo y costoso. Tampoco tiene una garantía de convergencia, salvo que el tiempo

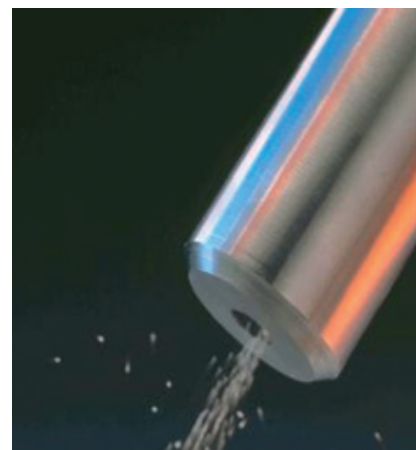


Figura 2: Boquilla de “Peen Forming”

no sea una restricción al desarrollo. Adicionalmente el número de ensayos sobre probetas cortadas de los paneles conformados, para validar los esfuerzos residuales, encarece mucho el desarrollo, siendo necesaria la validación de cada pieza que se vaya a “pinformear”.

Nuestro objetivo de desarrollo es otro: proveernos de una herramienta de simulación numérica del proceso de conformado suficientemente robusta que nos permita determinar a priori la mejor selección de parámetros para la obtención de la configuración final, sin necesidad de entrar en pruebas de convergencia por prueba y error, con su riesgo asociado, disminuyendo los ciclos de desarrollo de *peen forming* futuros sobre nuevas piezas, materiales, geometrías y sus costes de desarrollo. Sin esta herramienta, tendríamos que repetir el desarrollo de obtención de los parámetros adecuados, quizás no óptimos, de *peen forming* para cada nueva pieza-material-geometría sin más bagaje que nuestra experiencia en desarrollos anteriores. Con la herramienta numérica, si no estamos en el punto óptimo de selección de parámetros, que es la intención del proyecto, estaremos muy cerca del mismo para

cualesquiera que sean las combinaciones de aleaciones material- geometría en nuestras futuras necesidades. Este tipo de herramientas de simulación demuestra la madurez de la tecnología frente a cliente, minimizando los riesgos asociados al desarrollo y por tanto la cuota de mercado de *Aernnova*. Además genera un proceso más robusto, repetible y fiable que al final repercute en la cuenta de resultados de la compañía y mejora nuestra competitividad.

El proyecto se aborda en dos fases de desarrollo:

- La primera consiste en desarrollar una metodología numérica que simule completamente el proceso de conformado por *peen forming*, la física de los elementos involucrados, identificar los parámetros que más influyen en la calidad de la pieza resultante y cuantificar sus efectos. Este método numérico de simulación será validado con ensayos. La

primera fase consiste en disponer de un modelo predictivo validado.

- La segunda parte del proyecto aborda el problema de encontrar el conjunto de parámetros óptimo para partiendo de una geometría inicial conocida, alcanzar una geometría final objetivo con sus requerimientos de tolerancias y esfuerzos residuales definidos. La segunda fase es una optimización basada en el modelo predictivo anterior.

Para conseguir los objetivos de la primera fase, el equipo del proyecto estableció una aproximación basada en etapas de una complejidad incremental. El paso de una etapa a la siguiente sólo se produce cuando se cumplen unos requerimientos pre-definidos que validan lo desarrollado en la etapa, concepto de *Puerta de Madurez*. Sólo después de dar por validado y verificado el desarrollo de una etapa, se procede a la siguiente. El siguiente esquema, muestra las 4 etapas seguidas para el

desarrollo de la primera fase y donde se encuentran las 3 *Puertas de Madurez* de desarrollo intermedias. Hay que añadir la *Puerta de Madurez* final de esta primera fase del proyecto. El proyecto de desarrollo dispuesto de esta forma, es un continuo de actividades que se abordan de forma controlada. Los requerimientos de éxito en cada etapa son predefinidos, salvo las sorpresas, que siempre vienen de lo que a priori no sabemos que desconocemos.

Debido a los requerimientos específicos del sector aeronáutico, resalto los requerimientos de integridad estructural que han quedado validados tras esta primera fase:

- Los esfuerzos residuales obtenidos con la herramienta de simulación han sido validados con campañas de ensayos de cupones
- Destacar al menos dos tipos de ensayos que deben refrendar el éxito:
 - ✓ Ensayos de fatiga, norma ASTM E466, para:
 - diferentes geometrías con di-

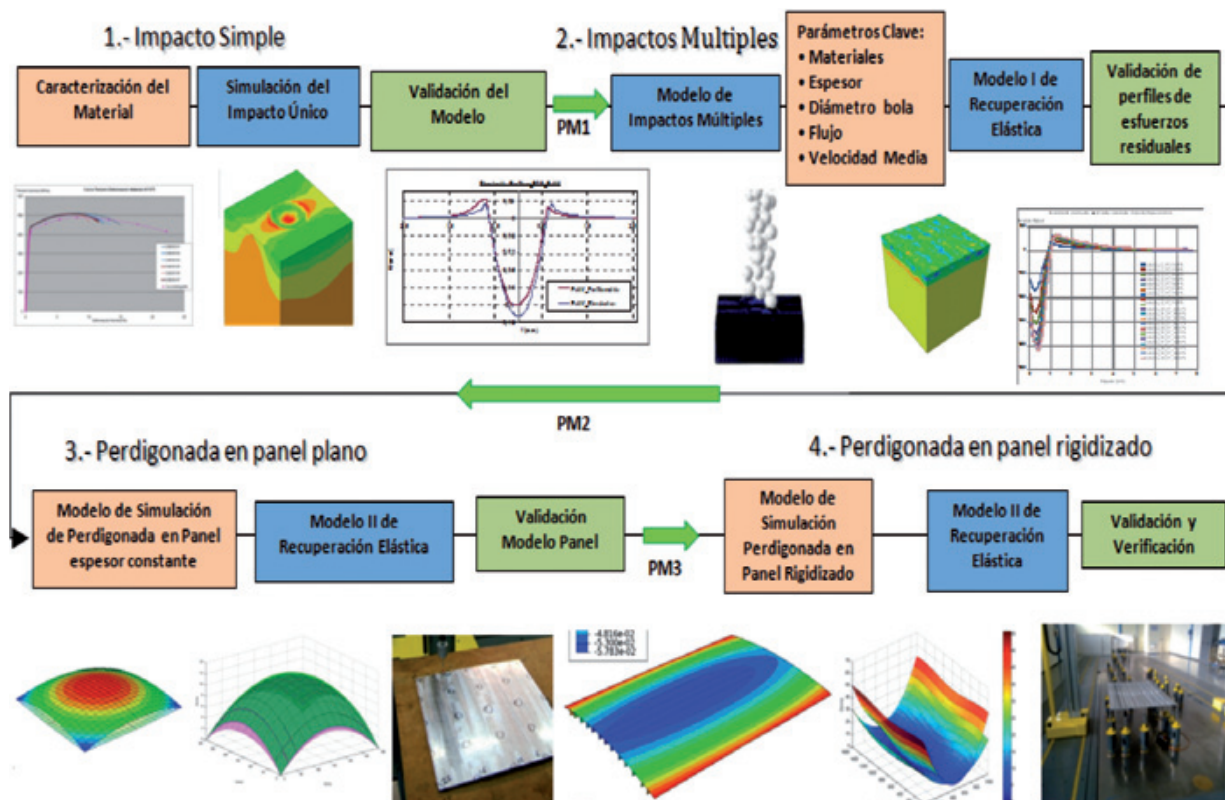


Figura 3: Etapas y Puertas de Madurez para el Desarrollo de la Primera Fase del Proyecto

Colaboración

ferentes parámetros de concentración de esfuerzos, K_t

- distintos ratios de esfuerzo mínimo y máximo en los ciclos de carga, R

- condiciones de precarga expresada en términos de porcentaje sobre el esfuerzo de fluencia del material a tracción, % F_{ty}

- ✓ Ensayos corrosión bajo tensiones según norma ASTM G 47
- Al finalizar la primera fase del proyecto se extrajeron las conclusiones principales que permiten la validación

MATERIAL	COUPON CONDITION	TEST CONDITION	PRE-STRESS	PEEN FORMING INTENSITY	SHOT PEENING	COMMENTS	DIRECTION			
7050 T7451	MACHINED Plate thickness 76 mm (3")	Kt=1, R=0,1	-----	-----	-----	16 specimens (4 per stress level)	L			
					0.006-0.010 A (size S230)	16 specimens (4 per stress level)				
					-----	16 specimens (4 per stress level)	L-T			
					0.006-0.010 A (size S230)	16 specimens (4 per stress level)				
		Kt=3, R=0,1			-----	16 specimens(4 per stress level)	L			
					0.006-0.010 A (size S230)	16 specimens (4 per stress level)				
7050 T7451	PEEN FORMING Plate thickness 66 mm (2,6")	Kt=1, R=0,1	0 % Fty	MEDIUM	-----	16 specimens (4 per stress level)	L			
					0.006-0.010 A (size S230)	16 specimens (4 per stress level)				
			80-100 % Fty		-----	16 specimens (4 per stress level)	L			
					0.006-0.010 A (size S230)	16 specimens (4 per stress level)				
					-----	16 specimens (4 per stress level)	L-T			
						0.006-0.010 A (size S230)		16 specimens (4 per stress level)		
		Kt=3, R=0,1	0 % Fty		-----	16 specimens (4 per stress level)	L			
					0.006-0.010 A (size S230)	16 specimens (4 per stress level)				
			80-100 % Fty		-----	16 specimens (4 per stress level)				
					0.006-0.010 A (size S230)	16 specimens (4 per stress level)				
		Kt=1, R=0,1	0 % Fty		HIGH	0.006-0.010 A (size S230)	16 specimens (4 per stress level)	L		
						0.006-0.010 A (size S230)	16 specimens (4 per stress level)	L		
			80-100 % Fty	0.006-0.010 A (size S230)		16 specimens (4 per stress level)	L-T			
				0.006-0.010 A (size S230)		16 specimens (4 per stress level)	L			
				0 % Fty		0.006-0.010 A (size S230)		16 specimens (4 per stress level)		
						80-100 % Fty	0.006-0.010 A (size S230)	16 specimens (4 per stress level)		
		Total = 336 test specimens								

Tabla 1: Resumen de parte de los ensayos de fatiga para cualificación material Al 7050-T7451 "Peen Forming"

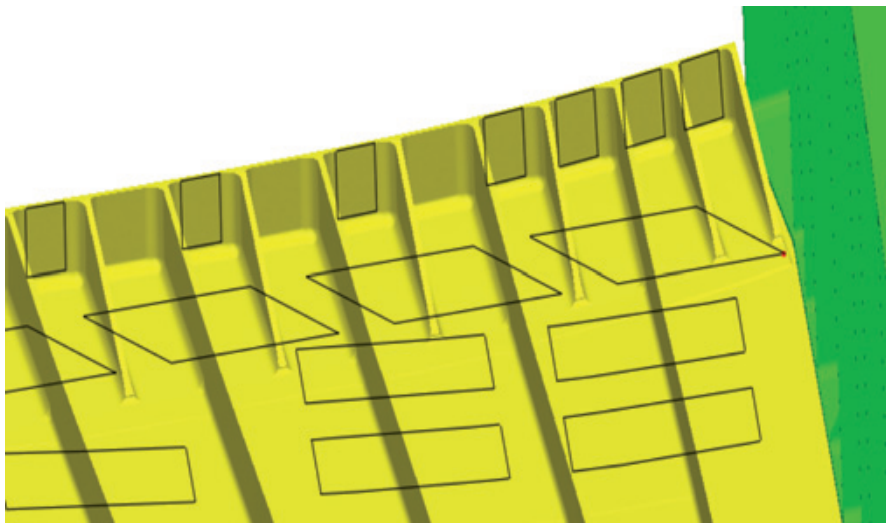


Figura 4: Esquema de extracción de probetas para ensayos de esfuerzos residuales de un elemento estructural

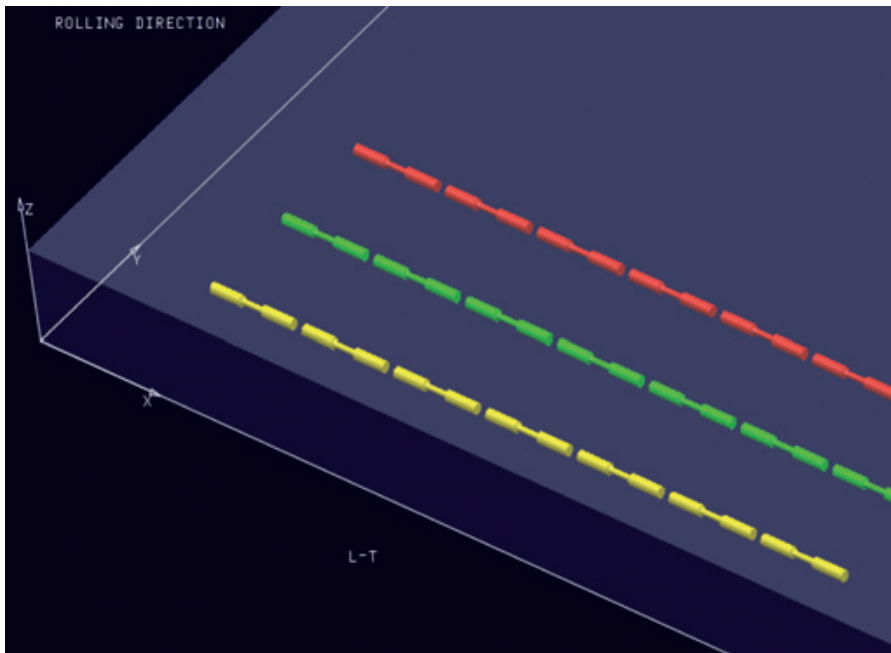


Figura 5: Esquema de extracción de probetas para ensayos de corrosión bajo tensiones

de la herramienta de simulación numérica del proceso:

- Las diferencias entre las predicciones del modelo y los resultados físicos son siempre menores al 10%
- Las profundidades son ligeramente superiores en el modelo que en la realidad
- Esto se puede deber a que el modelo no ha considerado el efecto

secundario de la velocidad de deformación de del material

- Los esfuerzos residuales y las deformaciones obtenidas por simulación son mayores que las reales. Desde un punto de vista de seguridad es conservador y nos da garantías
- Cuanto más alta ha sido la cobertura de *peen forming*, mejor correlación del modelo numérico.

En consecuencia la primera fase ha logrado su objetivo de dotarnos de una herramienta de simulación numérica validada y robusta que a partir de datos de geometría y material iniciales, con unos parámetros de proceso determinados, somos capaces de predecir el estado final de geometría, tolerancias y esfuerzos residuales en la pieza. Hay luz verde para proceder con la fase segunda de que la herramienta numérica pase a ser de optimización, utilizando la geometría inicial, final, sus tolerancias y sus requerimientos de esfuerzos residuales, conseguir el conjunto de parámetros óptimos para el proceso de conformado en frío por *peen forming*.

Este proyecto fue lanzado a mediados del año 2008. La validación y verificación de la primera fase acabó en el año 2011. El proyecto ha sido posible no sólo al buen hacer del equipo de desarrollo tecnológico de *Aernnova* en sus oficinas de ingeniería de **Madrid** y **Vitoria** y el centro de mecanizados de *Aernnova* en **Tarazona**, *Aeromac-NMF*, sino además gracias a la colaboración del *Instituto Tecnológico de Aragón*, ITA y sus investigadores. La dedicación de los tecnólogos del ITA ha sido clave para el éxito. En particular resalto su papel de reconciliación entre los requerimientos dispuestos por los ingenieros de *Aernnova*, desplegando los exigidos en nuestra industria, con las teorías de física fundamental y su modelado numérico. Este tipo de colaboración de ITA con *Aernnova* es un ejemplo de éxito para las colaboraciones de la industria con los centros de investigación. Tan necesario en nuestro entorno de búsqueda de mayor competitividad con innovaciones provenientes de nuevos desarrollos tecnológicos. Asimismo reconocemos y agradecemos la labor al CDTI, *Centro de Desarrollo Tecnológico Industrial*. Sin su apoyo financiero de parte de los costes de desarrollo necesarios para la culminación de esta primera fase del proyecto, éste no hubiera sido posible.

La segunda fase de este proyecto comenzó en Diciembre de 2011 y tenemos planificado culminarlo en Diciembre de 2013.