

Simulación de los ciclos de temperatura en el proceso de estampación en caliente

I. Iglesias Valle⁽¹⁾, A. Lamikiz Mentzaka⁽¹⁾, A. Gorriño Vicandi⁽¹⁾, S. Martínez Rodríguez⁽¹⁾,
J. Izaga Maguregi⁽²⁾, E. Garitaonandia Areitio⁽²⁾

(1) Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universidad del País Vasco UPV/EHU
aitzol.lamikiz@ehu.es

(2) Centro Tecnológico AZTERLAN

El proceso de estampación en caliente se basa en combinar una operación de estampación de chapa con un tratamiento térmico sobre la pieza conformada. Las principales ventajas que plantea este proceso son, por un lado, la reducción de las fuerzas de conformado debido al incremento de ductilidad que sufre el material a altas temperaturas, y en segundo lugar el incremento de resistencia del material, el cual puede alcanzar tensiones últimas superiores a 1.500 MPa (duplicando los valores de las chapas de acero alta resistencia). Esto permite reducir el peso de las piezas manteniendo su resistencia global. Así, muchos vehículos en la actualidad están incorporando piezas fabricadas mediante estampación en caliente tales como diferentes pilares del chasis, travesaños y otras partes de la estructura del vehículo.

Para garantizar un enfriamiento rápido de la chapa, y conseguir así la estructura martensítica requerida, los útiles de conformado están refrigerados. De esta forma no se calientan en exceso en un proceso de fabricación de series largas y la chapa se enfría rápidamente al contactar con el útil. Sin embargo, el diseño de los conductos de refrigeración se suele basar en taladros simples realizados en base a la experiencia. Así, en el presente trabajo, se propone un método de simulación térmica de los ciclos de conformado en caliente de una pieza para evaluar la evolución de la temperatura tanto en la chapa como en el troquel. La metodología ha permitido evaluar diferentes geometrías de conductos de refrigeración y obtener la posición y geometría óptima de los mismos.

1. INTRODUCCIÓN

Uno de los retos de la industria automovilística en los últimos años es el de satisfacer la exigencia de reducir el consumo de combustible, suponiendo una disminución de las emisiones de CO₂ a la atmósfera: Por otro lado, se busca incrementar la seguridad de los ocupantes del vehículo en caso de colisión. Para la obtención de este doble objetivo, se han dado una serie de pasos encaminados a optimizar la estructura del vehículo, utilizar materiales diferentes al acero de bajo contenido en carbono convencional para la fabricación de la estructura del vehículo o implementar técnicas de fabricación avanzadas tales como el hidroformado o el empleo de uniones disimilares entre componentes plásticos y metálicos, entre otros.

Así, una de las técnicas que más está creciendo en volumen de producción durante los últimos años es la técnica de estampación en caliente, debido a que se pueden obtener componentes de chapa metálica con una resistencia mecánica muy superior a los obtenidos con procesos de estampación convencionales [1, 2]. La estampación en caliente se basa en conformar una chapa mientras se realiza un tratamiento térmico de templado. Para ello, la chapa se ha tenido que calentar previamente en un horno y se introduce en el útil de conformado a una temperatura superior a la temperatura de austenización, la cual es de unos 825-830°C para los materiales más comunes utilizados en estampación en caliente. Una vez colocada la chapa, el útil realiza la operación de conformado y, durante este proceso, la pieza se enfría por conducción entre la chapa y el troquel. Dado que por un lado los útiles están refrigerados y, por otro lado, la masa de la chapa es despreciable frente a la masa de los útiles de conformado, el enfriamiento que sufre la pieza es muy rápido y se

obtiene como resultado una estructura martensítica. El resultado es que el material alcanza tensiones últimas que oscilan entre 1.200 a 1.600 MPa. Los materiales de chapa utilizados en este proceso son los denominados aceros al Boro y de forma más concreta, los más extendidos son los derivados del 22MnB5 en diferentes variantes y denominaciones comerciales. Si tomamos como referencia las piezas de aceros de alta resistencia utilizados habitualmente, como por ejemplo el DP800, se incrementa la tensión última del material prácticamente el doble. Por tanto, se pueden reducir los espesores de los componentes de refuerzo y en ocasiones se pueden simplificar conjuntos de varias piezas soldadas por una única pieza estructural, llegándose a reducciones de hasta el 50% en peso por pieza. En la Figura 1 se muestran los diferentes tipos de aceros empleados en un vehículo de gama media, clasificados en cinco grupos de rangos de tensión última.

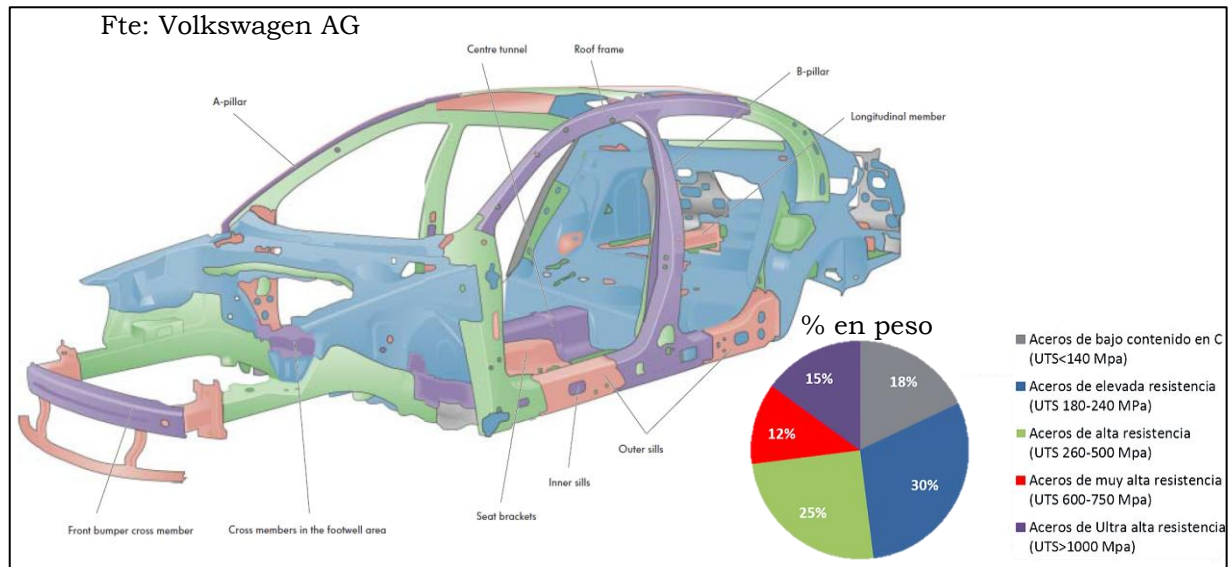


Figura 1. Aceros utilizados en la estructura del VW Passat 2006

Se puede observar que los componentes con mayores requisitos de resistencia mecánica se localizan en el frontal del vehículo, en los pilares A y B y las piezas que cierran el habitáculo del vehículo. Esta distribución hace que la transmisión de esfuerzos en caso de impacto distribuya las tensiones generadas a lo largo de los elementos con mayor resistencia. En la Figura 2 se muestran las líneas de esfuerzo para un caso de un impacto frontal y lateral. Se puede observar que las piezas fabricadas mediante conformado en caliente son las que mayor carga soportan en caso de colisión.

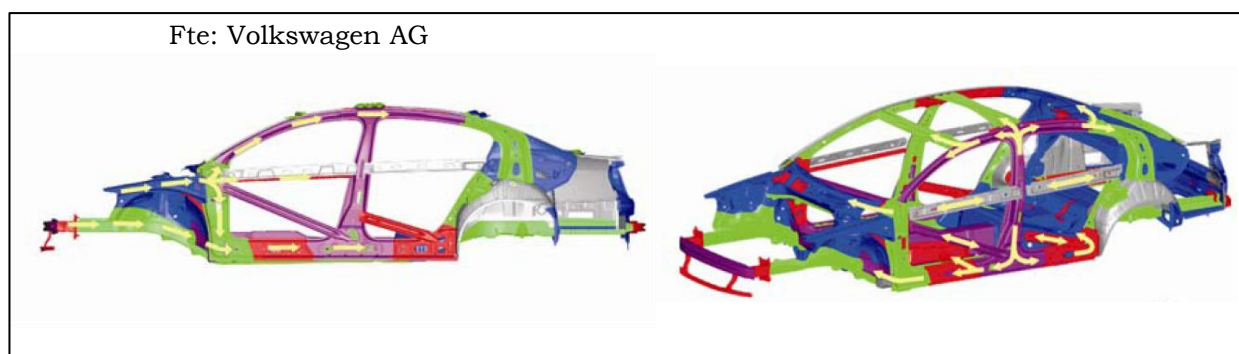


Figura 2. Líneas de esfuerzo para el caso de impacto frontal y lateral en el VW Passat 2006

La operación de conformado en caliente se realiza mediante una secuencia de 3 pasos. En primer lugar se calienta la chapa por encima de la temperatura de austenización en un horno. En segundo lugar se transfiere la chapa caliente a un troquel y, por último, se realiza

la operación de conformado propiamente dicha. En esta operación se produce un enfriamiento rápido que produce un tratamiento térmico de temple sobre la chapa resultando en una estructura martensítica de alta resistencia. En la Figura 3 se muestran esquemáticamente los pasos típicos de una operación de conformado en caliente.

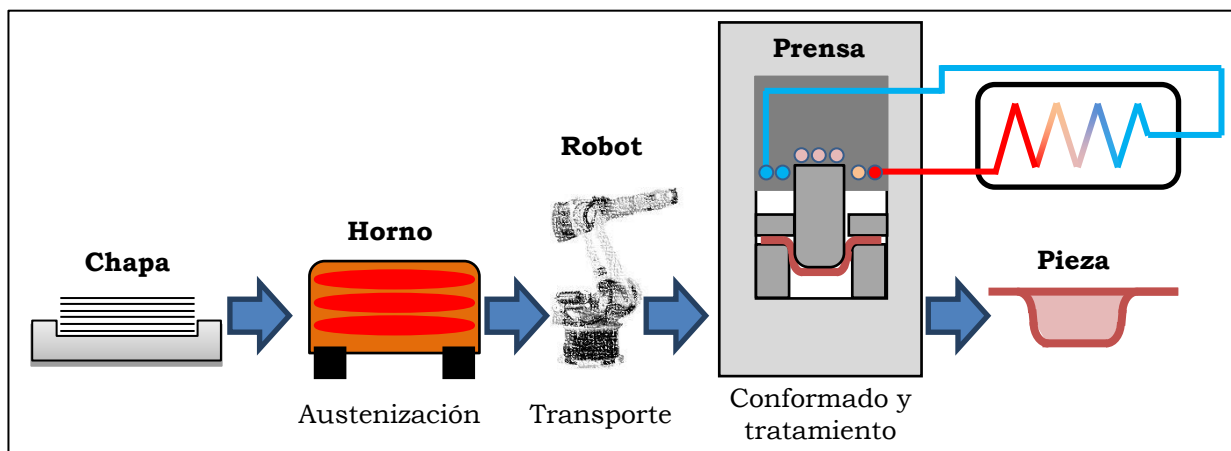


Figura 3. Pasos de una operación de conformado en caliente

El proceso de estampación, además de incrementar la resistencia de la pieza obtenida, presenta la ventaja de incrementar la conformabilidad de la chapa durante el proceso de estampación, ya que toda la deformación se realiza a alta temperatura. De esta forma, se incrementa la ductilidad del material y se reducen las fuerzas necesarias en la operación de estampación. En términos comparativos, se puede afirmar que la estampación de una pieza de este tipo (en términos de ductilidad y resistencia última), es similar al conformado de una chapa de acero de bajo contenido en carbono [3]. En la Figura 4 se muestra el cambio de la tensión última, así como de la elongación máxima, que sufre la chapa en las diferentes fases de una operación de conformado en caliente.

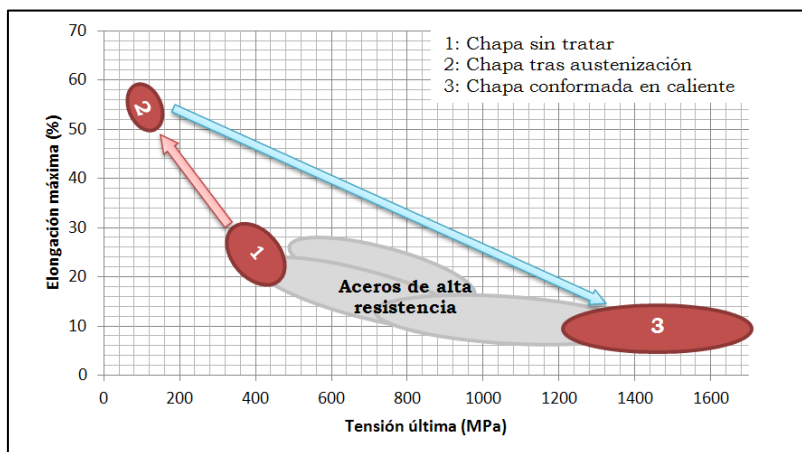


Figura 4. Tensión última y elongación para diferentes etapas de conformado en caliente

Un aspecto importante es que, debido a que la chapa se encuentra a alta temperatura, el riesgo de oxidación es elevado. Para reducir este problema, las chapas suelen llevar un recubrimiento de protección que puede ser de varios tipos, siendo el más utilizado el de base Al-Si. Su presencia no afecta a la operación de estampación [1].

El resultado de toda la operación depende de la transformación que sufre la chapa para la obtención de una estructura martensítica. Para ello, la temperatura de la chapa deberá descender por debajo de los 225 °C (Temperatura M_F característica de los aceros utilizados) en menos de 10 segundos para que esta transformación sea completa. Para cumplimentar estos dos requisitos, la velocidad de enfriamiento debe ser superior a una tasa de 50°C/segundo [4]. Por otro lado, también hay que evitar grandes diferencias de temperatura

en la pieza, puesto que puede traer consigo la aparición de deformaciones no homogéneas que distorsionen la pieza fabricada por encima de la tolerancia admisible. Así, el presente trabajo presenta una metodología simple de evaluación de la eficacia de los conductos de refrigeración de los troqueles para estampación en caliente. Para ello se ha utilizado un modelo térmico simple, pero capaz de dar rápidamente el gradiente térmico de la chapa y el troquel a lo largo del tiempo. A diferencia de otros trabajos que utilizan modelos más complejos [5, 6], se ha pretendido simplificar al máximo el algoritmo para realizar análisis comparativos rápidos. Posteriormente se han comprobado diferentes soluciones de refrigeración sobre de un troquel tipo cuya geometría se aproxima a la de un troquel de un pilar B en dimensiones y forma. Los resultados muestran que variando la posición y forma de los canales de refrigeración, aun teniendo en cuenta de que se trata de un modelo simplificado, se pueden conseguir circuitos de refrigeración eficaces partiendo de taladros simples realizados en los troqueles.

2. PLANTEAMIENTO DE LA SIMULACIÓN TÉRMICA DEL PROCESO

Con el objeto de simular el proceso de enfriamiento que sufre la chapa durante una operación de conformado en caliente, se ha planteado una simulación basada en un modelo térmico clásico, el cual se ha resuelto mediante un algoritmo basado en el Método de los Elementos Finitos (MEF). En primer lugar se han considerado una serie de hipótesis simplificadoras, las cuales han ayudado a resolver el modelo de forma mucho más rápida y simple de lo que hubiera sido la consideración de todas las variables del proceso. Así, las hipótesis simplificadoras que se han considerado son las siguientes:

- El enfriamiento comienza con el troquel cerrado: Es decir, no se ha contemplado el enfriamiento que se da durante el proceso de deformación de la chapa hasta el cierre del troquel. Se trata de un problema complejo, ya que es necesario resolver primero un cálculo de tensión – deformación en régimen plástico no lineal para poder calcular en cada instante el contacto entre chapa y troquel y realizar así el balance térmico en cada paso.
Los errores introducidos por esta simplificación, según Hoffmann et al. [5] son despreciables, ya que las máximas variaciones de temperatura sobre la pieza entre una simulación estrictamente térmica y una simulación que considera el problema térmico y mecánico acoplado es de 10°C. Así, y para simplificar la simulación, únicamente se considera el flujo de calor cuando se cierra el útil por completo.
- No se ha considerado convección: Se desprecia la convección y radiación entre la chapa y el aire. Se trata de una simplificación clásica cuando hay contacto entre cuerpos con una relación de masas muy descompensada, como es este caso. Así, la mayor parte del calor se transmitirá desde la chapa a los útiles por conducción. De todas formas, de se trata de una simplificación conservadora, ya que la velocidad de enfriamiento en realidad, será mayor que la estimada por el modelo debido al flujo de calor entre el conjunto y el aire que se transmite por convección y radiación.
- El fluido de refrigeración se encuentra a una temperatura constante: Se ha supuesto que el agua que fluye por los conductos de refrigeración se encuentra a una temperatura constante de 25°C. De esta forma se desprecia el flujo de calor por convección entre el útil de estampación y el flujo de agua. Se trata de nuevo de una hipótesis clásica, ya que la experiencia demuestra que la variación de la temperatura del agua de refrigeración es mínima entre la entrada y salida, siempre y cuando el flujo de agua sea suficiente y la pieza no sea muy grande. Dado que muchas piezas fabricadas por conformado en caliente son refuerzos de tamaño medio/pequeño se puede suponer esta simplificación como válida.
- No se ha contemplado la contracción de la chapa: Durante el enfriamiento de la chapa se produce una contracción de la chapa. En las simulaciones realizadas no se ha considerado este efecto.
- Conductividad térmica del utillaje constante: Se ha considerado la conductividad térmica de los útiles como una constante. Por el contrario, en el caso de la chapa es necesario considerar una conductividad térmica variable con la temperatura debido a las grandes diferencias de temperatura que sufre.

Una vez planteadas las hipótesis significativas, se ha planteado la simulación empleando un material de chapa convencional en este proceso como es un acero al Boro 22MnB5 y un troquel fabricado en un acero de herramientas de trabajo en caliente de alta conductividad térmica. En la Tabla 1 se muestran las composiciones y propiedades de ambos materiales.

MATERIAL DEL ÚTIL DE CONFORMADO			
Acero de herramientas de alta conductividad térmica			
TEMPERATURA [K]	DENSIDAD [Kg/m ³]	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA [W/m·K]	CALOR ESPECÍFICO [J/Kg·K]
298	7850	68	470
MATERIAL DE LA PIEZA			
Acero al Boro 22MnB5			
TEMPERATURA [K]	DENSIDAD [Kg/m ³]	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA [W/m·K]	CALOR ESPECÍFICO [J/Kg·K]
20	7848,1	46,71	475,63
100	7820,7	46,06	487,67
200	7790,2	45,59	499,21
300	7757,4	43,47	519,18
400	7722,3	40,7	543,45
500	7684,7	37,67	570,3
600	7644,5	34,63	599,31
700	7601,6	31,66	630,23
800	7616,7	23,92	694,1
900	7569,3	26,32	691,61
1000	7519,9	27,76	689,12
1100	7468,7	28,84	686,65
1200	7415,7	30	684,18

Tabla 1. Propiedades de los materiales de los útiles de estampación y la chapa

En cuanto a las condiciones de contorno, se han planteado unas condiciones iniciales típicas en una operación de conformado en caliente. En concreto, se parte de una chapa a 1.100K que se coloca sobre un troquel a temperatura ambiente (298K). Se parte también de una temperatura del agua de refrigeración de 298K. Para el resto de los intervalos de simulación, se ha supuesto un contacto completo entre chapa y útil, así como una temperatura igual al refrigerante en los conductos de refrigeración. Finalmente, se ha fijado un tiempo de simulación de 10 segundos.

La geometría de la pieza tipo utilizada es una simplificación de un pilar B. Se trata de una de las piezas principales en la estructuras de un automóvil y que en la actualidad se está fabricando mediante estampación en caliente para diversos modelos de diferentes fabricantes de automóviles. Así, se ha pasado de la geometría de un pilar B real a una pieza tipo de dimensiones similares (longitud, anchura y espesor) y radios de curvatura similares, pero con una sección constante lo que resulta en una geometría más sencilla y en un mallado más regular con menos elementos. Se han simulado 3 casos:

- **Caso 0 – Útil sin refrigeración:** Se ha utilizado como referencia, para evaluar el gradiente térmico en un caso sin refrigeración y observar así la evolución de este gradiente para los dos casos estudiados introduciendo refrigeración.
- **Caso 1 – Útil con taladros de refrigeración:** Se trata de la solución clásica para la refrigeración en útiles de estampación en caliente, la cual se basa en una serie de taladros cruzados que conforman así un circuito de refrigeración.

- **Caso 2 – Útil con refrigeración adaptativa:** Se ha simulado un sistema de refrigeración con sección no circular y que recorre la periferia de la pieza. Este tipo de conductos se podría realizar fabricando los troqueles por fundición y utilizando en este proceso machos desechables.

En la Figura 5 se muestra un esquema de la geometría de la pieza y los 3 casos planteados.

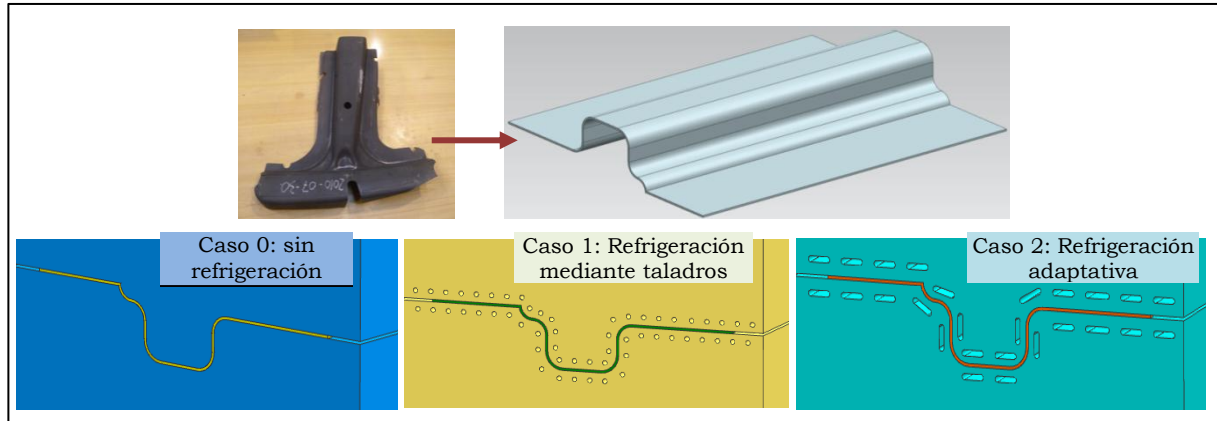


Figura 5. Geometría de la pieza tipo y detalle de los 3 casos simulados.

3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Se han realizado las simulaciones para los tres casos propuestos utilizando las condiciones planteadas en el apartado anterior. En todo momento se ha considerado la temperatura tanto en el troquel superior, troquel inferior y la propia pieza, centrando el estudio de la evolución de la temperatura en este último elemento. Se han podido observar las variaciones de temperatura y se ha calculado para cada caso la velocidad de enfriamiento.

Para realizar la comparativa entre los diferentes casos se han establecido dos criterios: La pieza debe encontrarse a una temperatura inferior $225\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($498\text{ }^{\circ}\text{K}$), lo cual equivale a una tasa de enfriamiento superior a 50°C/s . Por otro lado, se ha establecido también que la máxima variación entre dos puntos de la pieza no sea superior a 50°C . Este hecho es importante, ya que el enfriamiento tiene que ser lo más homogéneo posible para evitar distorsiones geométricas no uniformes en la pieza. En la Figura 6 se muestra un instante de las simulaciones para los tres casos simulados, así como los resultados obtenidos en la temperatura máxima (T_{max}) y en la máxima diferencia entre dos puntos (ΔT).

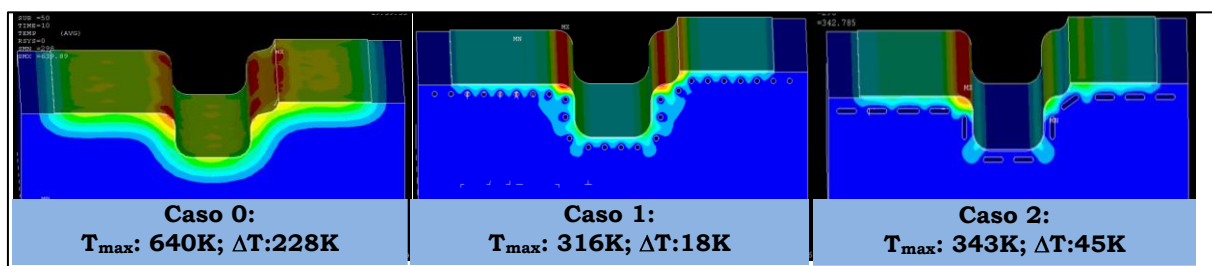


Figura 6. Campo térmico de la simulación en el troquel inferior para los 3 casos.

En la Figura 7 se muestra la evolución de la temperatura en la chapa para los tres casos planteados. Se puede observar que las curvas de enfriamiento de los casos 1 y 2 son mucho más pronunciadas que el caso de referencia, por lo que se deduce rápidamente que el efecto de la refrigeración en el troquel tiene una influencia significativa. Este aspecto, que por otro lado era esperado, hace pensar que el diseño del sistema de refrigeración puede ser un aspecto crítico en el diseño de útiles de estampación en caliente. A la vista de los resultados, se observa que no hay grandes diferencias entre los métodos de refrigeración convencionales, basados en taladros y canales de refrigeración más complejos, donde se se

busca una refrigeración más uniforme de toda la superficie. De hecho, atendiendo a los resultados de simulaciones, los resultados obtenidos en el caso 1 presentan enfriamientos más rápidos y homogéneos que los obtenidos en el caso 2.

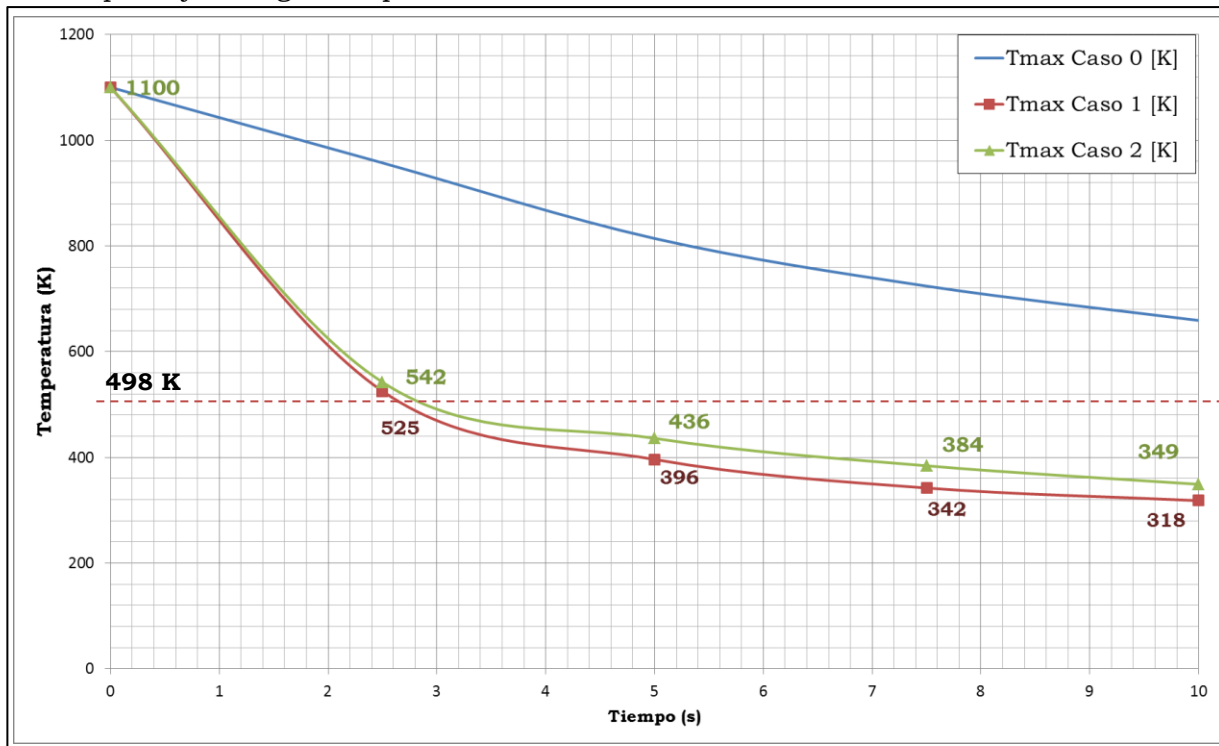


Figura 7. Evolución de la temperatura máxima en la pieza para cada caso

Se han realizado simulaciones variando la posición y número de taladros en el caso 1 y variando la disposición y geometría de los conductos de refrigeración del caso 2, pero los resultados a los que se ha llegado muestran valores dentro de los rangos de temperaturas presentados. Se han observado diferencias de unos 100K en el instante correspondiente a 2,5 segundos y valores inferiores a 40K para el último instante simulado correspondiente a 10 segundos.

4. CONCLUSIONES

La búsqueda de automóviles más ligeros y seguros ha provocado el empleo de aceros de ultra alta resistencia con estructura martensítica en determinadas partes del vehículo. Este tipo de aceros permite reducir hasta un 50% del peso de la pieza y al mismo tiempo se aumenta la resistencia de la misma. El método de obtención de este tipo de componentes, debido a que se mejora la conformabilidad del material y se obtiene la estructura requerida, es la estampación en caliente.

Para realizar esta operación, es necesario dotar a los útiles de estampación de una alta capacidad de disipación de calor. Esto se consigue mediante la combinación de dos factores: La utilización de aceros de alta conductividad térmica y la colocación de canales de refrigeración. A lo largo de este trabajo, se ha comprobado que si se emplean troqueles sin refrigeración, no se consigue la transformación martensítica completa de la pieza a pesar de emplear aceros de alta conductividad térmica. Así, es un requisito indispensable utilizar canales de refrigeración para la correcta realización de la estampación en caliente.

A pesar de que el diseño de los troqueles se suele apoyar en sistemas comerciales de simulación por EF que evalúan la deformación de la chapa en diferentes instantes, la fuerza necesaria, etc, el diseño de los conductos de refrigeración se realiza en base a experiencia previa. Así, se ha planteado una metodología simple para determinar el diseño del sistema de refrigeración del troquel más óptimo. La metodología se basa en un modelo térmico simple que no tiene en cuenta factores como la evolución del contacto entre pieza y troquel o

la convección del conjunto con el aire, pero estas simplificaciones siempre son conservadoras.

Así, si el resultado de la simulación muestra una velocidad de enfriamiento suficiente, se puede garantizar que en el caso real se obtendrán velocidades de enfriamiento superiores. Por otro lado, la metodología es válida para realizar comparaciones de diferentes diseños de sistemas de refrigeración.

Se ha aplicado el método a una pieza tipo en la que se han estudiado dos casos, además del caso de referencia sin refrigeración. Se ha observado que optimizando un diseño basado en taladros simples, se pueden obtener tasas de enfriamiento suficientes para realizar la estampación en caliente de forma efectiva, siendo los resultados similares e incluso mejores a los conseguidos con un sistema de refrigeración más complejo y que sería más difícil de fabricar.

También se ha estudiado la diferencia máxima de temperatura entre dos puntos de la pieza, situando el límite de esta variación en 50 grados. De nuevo el sistema de refrigeración basado en taladros se ha comportado de una manera más adecuada.

5. REFERENCIAS

- [1] H. Karbasian, A.E. Tekkaya; A review on hot stamping; *Journal of Materials Processing Technology* 210 (2010) 2103–2118
- [2] Bader, K.M., et al, Status and perspective of press hardening in car body manufacturing at Audi, *Automotive Circle International*, Gothenburg Sweden, September 2011.
- [3] Paul Akerstrom, Modeling and simulation of hot stamping, Doctoral Thesis, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering, Lulea University of Technology, Sweden, 2006.
- [4] M. Naderi, M. Ketabchi, M. Abbasi, W. Bleck; Analysis of microstructure and mechanical properties of different high strength carbon steels after hot stamping; *Journal of Materials Processing Technology* 211 (2011) 1117–1125
- [5] H. Hoffmann, H. So, H. Steinbeiss, Design of Hot Stamping Tools with Cooling System, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, Volume 56, Issue 1, 2007, Pages 269-272,
- [6] B. Abdulhay, B. Bourouga, C. Dessain, Experimental and theoretical study of thermal aspects of the hot stamping process, *Applied Thermal Engineering* 31 (2011) 674-685