

Conformado semisólido (tixoconformado) de aceros para componentes de automoción



Semisolid forming (thixoforming) of steel components for automotive industry

Gorka Plata¹, Jokin Lozares¹, Zigor Azpilgain¹ y Iñigo Loizaga²

¹ MONDRAGON UNIBERTSITATEA - MGEP. Departamento de Mecánica y Producción Industrial. Calle Loramendi, 4 - 20500 Arrasate-Mondragón.

² CIE Automotive - AIC. Parque Empresarial Boroa, Parcela 2A-4 - 48340 Amorebieta (Vizcaya).

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7771> | Recibido: 29/07/2015 • Aceptado: 23/02/2016

ABSTRACT

- Due to raw material and production costs, near net shaping of mechanical components will become a key factor to get the desired competitiveness. Semi-solid forming is one of those near net shape forming techniques, which shows a great potential for material and energy savings. In order to verify that sound commercial parts can be produced, commercial automotive spindles have been manufactured. The material employed for that purpose has been the LTT C45, a material especially designed for semi-solid processes and supplied by Ascometal. In comparison with the conventional forge process, the manufacturing steps have been reduced from 3 to 1, as well as it has been used a press of 4.000 kN instead of the 25.000 kN one. On the other hand, through the analysis of the mechanical properties and defects, validation of the process has been confirmed. In parallel, a study on used dies in this process has been performed. The first ones, made of 1.2344 steel, failed after 72 cycles, while the seconds, made of 1.2344 as well but with a heat treatment and nitration, still do not exhibit any damage or degradation.
- **Keywords:** Semisolid forming, tixofforming, steel, automotive, dies.

RESUMEN

Los procesos de producción "near net shape" suponen un ahorro en consumos de materia prima y costes de producción. De todos ellos, el conformado semisólido es el que se estudia en este trabajo. Con objeto de verificar que se pueden producir piezas comerciales totalmente libres de defectos, se han fabricado unos pivotes de rueda para el sector automotriz. Para ello, se ha utilizado el acero LTT C45, un material específicamente diseñado para este tipo de procesos, suministrado por Ascometal. En comparación con el proceso de forja convencional, se han reducido las etapas de fabricación de 3 a 1, así como de una prensa de 25.000 kN a una de 4.000 kN. Por otra parte, a través de un análisis de las propiedades mecánicas y de un estudio de las piezas en busca de defectos, se confirma la validez del proceso. A su vez, se han analizado los moldes empleados en el conformado. Los primeros, de acero 1.2344, han fallado después de 72 ciclos mientras que los segundos, de acero 1.2344, tratados térmicamente y nitrurados, aún no muestran señales de degradación.

Palabras clave: Conformado semisólido, tixoconformado, acero, automoción, moldes.

1. INTRODUCCIÓN

El conformado semisólido es un proceso de fabricación a caballo entre la forja y la fundición. El material se encuentra en estado semisólido y fluye de manera tixotrópica, viéndose su viscosidad reducida con la aplicación de esfuerzos de cizalladura y recuperada cuando se deja en reposo. Para que este tipo de comportamiento pueda producirse, el material debe consistir en glóbulos sólidos inmersos en una matriz líquida (Fig. 1). Esta distribución microestructural posibilita, gracias a la aplicación de fuerzas a cizalladura, la rotura de los enlaces químicos entre sólidos, permitiendo fluir a la fase líquida por la zona intergranular de manera que los sólidos pueden deslizarse entre sí. En este sentido, los esfuerzos para deformar el material se ven afectados por cambios en la temperatura y velocidad de conformado.

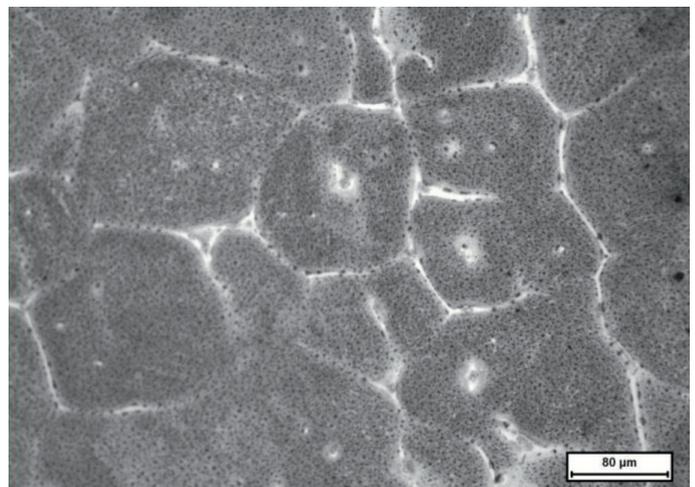


Fig. 1: Microestructura del acero LTT C45 después de enfriamiento rápido en agua desde el estado semisólido

Este comportamiento permite fabricar componentes de geometrías complejas, así como reducir el gasto de materia prima y consumo de energía, ya que se ve reducida tanto la fuerza de deformación en comparación con la forja como la temperatura en el caso de fundición. Este comportamiento fue accidentalmente descubierto por Spencer et al. [1] en 1972 durante la realización de unos experimentos sobre el agrietamiento en caliente y formación de rechupes en la aleación Sn-15%Pb. A partir de entonces, comenzaron las investigaciones y creación de patentes sobre el conformado en estado semisólido de aleaciones de bajo punto de fusión. No fue hasta la década de los 90 cuando se dieron los

primeros pasos en el estudio del tixoconformado de aleaciones férricas. Las primeras investigaciones en este ámbito se produjeron en la universidad de Sheffield, donde se fabricó la primera pieza de acero mediante este proceso de fabricación [2] (Fig. 2). Desde el año 2000, importantes consorcios europeos han trabajado y continúan haciéndolo para derribar las barreras que impiden una completa implementación de esta tecnología en la industria.

En cuanto al proceso de fabricación en sí, el tixoconformado puede dividirse en diversos tipos dependiendo de la cantidad de fracción sólida e instalaciones, siendo los procesos de fabricación para mayores fracciones sólidas más parecidos a un proceso de forja y, en el caso opuesto, similares a fundición o inyección [3]. En la actualidad ya existen instalaciones trabajando con metales de baja temperatura de fusión, como el aluminio y magnesio, para empresas automovilísticas y aeroespaciales en su mayoría [4]. En cambio, para los metales de alto punto de fusión como el acero, las altas temperaturas, el desgaste de los moldes y las dificultades de controlar el proceso, entre otros factores, hacen difícil el traspaso e implantación de esta tecnología a escala industrial.

Uno de los mayores problemas reside en la ausencia de estampas y moldes que resistan una cantidad de ciclos suficiente como para que el proceso sea económicamente rentable. La razón por la cual sucede este severo ataque sobre los moldes responde al complejo perfil de fuerza que actúa sobre ellos durante el proceso semisólido. Se distinguen cuatro categorías de ataque [5]: mecánico, térmico, químico y tribológico. Los dos primeros tienen una gran importancia a corto plazo ya que generan tensiones que pueden producir fallos instantáneos. En cambio, los dos últimos tienden a estar en otro plano debido a que producen una lenta degradación de la superficie.

En este trabajo, se presentan algunos de los resultados obtenidos en el conformado en estado semisólido de la aleación LTT C45. A diferencia de otros trabajos, la operación de conformado se ha llevado a cabo con fracciones sólidas de alrededor del 90%, valores muy elevados si los comparamos con procesos de conformado semisólido habituales, donde las fracciones sólidas suelen estar en el rango 50-70%. A continuación, se presentan los resultados obtenidos sobre una pieza comercial de automoción, analizando la calidad de los componentes fabricados y la degradación de los moldes.

2. MATERIALES Y METODOS

Se ha seleccionado un acero denominado LTT C45 de Ascometal, el cual está modificado para tener un rango de solidificación



Fig. 2: Ruedas dentadas de acero M2 fabricadas por tixoconformado [2]

más amplio y un menor punto de fusión lo que otorga el prefijo LTT (*Low Thixoforming Temperature*) al material. Cabe destacar que el acero se ha seleccionado bajo un criterio de idoneidad del proceso de forja semisólida, sin tener tanto en cuenta las propiedades mecánicas que se podrían llegar a alcanzar, ya que el primer objetivo del trabajo es comprobar la capacidad de obtener la geometrías planteadas. En cuanto al proceso de tixoconformado, se han utilizado las instalaciones de Mondragon Unibertsitatea, donde se encuentra una de las pocas células activas para la fabricación semi-sólida de componentes mediante tixoforja lateral.

2.1. MATERIALES

2.1.1. Material de los componentes

El acero seleccionado ha sido fabricado por un proceso de laminación en caliente, lo que posibilita que la microestructura globular se obtenga durante el calentamiento (SIMA) [7]. La composición del acero ha sido analizada por Ascometal. El contenido de los diferentes elementos aleantes están en el rango establecido por la misma en su patente de tixoconformado EP 1 426 460 A1 [8]. El material LTT C45 se puede clasificar como acero para muelles pero con un contenido en silicio, molibdeno y níquel mayor a otros aceros de la misma familia que amplía el rango semisólido del material. En la siguiente tabla se muestra su composición química (Tabla I).

2.1.2. Material de los moldes

Para la fabricación de los componentes se han utilizado dos utillajes diferentes. El primero fabricado con acero 1.2344 sin recubrimiento, muy usual en la industria de forja, con una dureza Rockwell C de 48-50 después de un tratamiento de temple y revenido. El segundo fabricado con el mismo material pero un tratamiento de temple y revenido de HRC 53 y un tratamiento de nitruración posterior con objeto de incrementar la dureza superficial.

2.2. METODOS

2.2.1. Instalaciones y geometría

La instalación para la fabricación del componente es la disponible en el laboratorio de conformado de Mondragon Unibertsitatea, donde ya se han hecho pruebas con acero anteriormente. Ésta instalación consiste en un horno de inducción de 150 kW, un robot de seis ejes para la transferencia del material del horno a la prensa, y una prensa servomecánica de 400 toneladas y una velocidad máxima del carro superior de 800 mm/s. En la Fig. 3 se muestra la instalación.

En cuanto a la geometría, se pretende fabricar un pivote de rueda trasero de automoción. Este componente se fabrica actualmente en CIE Automotive por forja en caliente en 3 etapas y utilizando una prensa de 25.000 kN. A continuación, en otro paso, se eliminan las rebabas y después del correspondiente tratamiento térmico y calibración, se mecaniza hasta las medidas finales.

En la siguiente figura (Fig. 5) se muestra la curva de calentamiento utilizada para lograr el estado semisólido del material, así como las curvas descriptivas del proceso de tixoforja.

2.2.2. Análisis del componente

Debido a posibles contracciones de la fase líquida durante el llenado de la pieza, puede aparecer cierta porosidad. Para asegurar

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu	Al	Sn	Ti
0.473	0.721	1.397	0.01	0.009	0.661	0.211	0.209	0.007	0.203	0.019	0.013	0.004

Tabla I: Composición química del acero LTT C45



Fig. 3: Célula de tixoconformado de Mondragon Unibertsitatea

el buen estado de los componentes fabricados por tixoforja, se ha realizado un completo análisis tomográfico de la pieza, obteniendo imágenes de planos axiales cada 1 mm y cada 0.25 mm como está indicado en la siguiente imagen (Fig. 6). El análisis de la mitad del eje del pivote se ha realizado con una mayor precisión puesto que es la zona más crítica. Además, es en esta zona donde se le aplica un tratamiento superficial por inducción y donde va situado el freno de disco. El equipo de tomografía utilizado tiene una resolución de 0,25mm.



Fig. 4: Imágenes CAD del componente a fabricar

Por otro lado, para analizar las propiedades mecánicas de los componentes antes y después del tratamiento térmico, se han obtenido probetas del eje de la pieza según la norma ASTM E 8M-04. El ensayo a tracción se ha realizado acorde a la norma UNE-EN ISO 6892-1:2010 B y P-51 a 20 mm/min. En la siguiente tabla se muestran los requerimientos mecánicos para la pieza comercial

(Tabla II). El tratamiento térmico de temple y revenido al que se ha sometido la pieza ha consistido en el calentamiento del material a una temperatura de austenización de 860 °C, con el consiguiente templado en aceite a 100 °C y revenido a 180 °C. Es importante remarcar que este tratamiento térmico es el realizado a las piezas forjadas con un acero diferente y por tanto no está optimizado para el LTT C45.

L.E. _{0,2%} (MPa)	R.T. (MPa)	Elong. (L ₀ =5d) (%)
1000	1100	11

Tabla II: Requerimientos mecánicos de la pieza forjada

También, se han estudiado los moldes empleados, contabilizando la cantidad de ciclos que han resistido sin que se aprecie degradación o fallo. En el caso de uno de los moldes, se han analizado las causas del fallo y los mecanismos de degradación causantes del mismo.

3. RESULTADOS

3.1. INSPECCION DE DEFECTOS

La Fig. 7 muestra las imágenes más representativas obtenidas durante el análisis tomográfico de un componente tixoforado al que se le ha aplicado el correspondiente temple y revenido.

Las imágenes de la izquierda (Fig. 7 (d)) muestran algunas discontinuidades en la base en los primeros 11 mm. Estas discontinuidades se forman durante el llenado, no afectan a la integridad del componente y son superficiales. La posición del nacimiento de este efecto es visible en las imágenes de la base, destacados



Fig. 6: Inspección tomográfica para el componente del material LTT C45

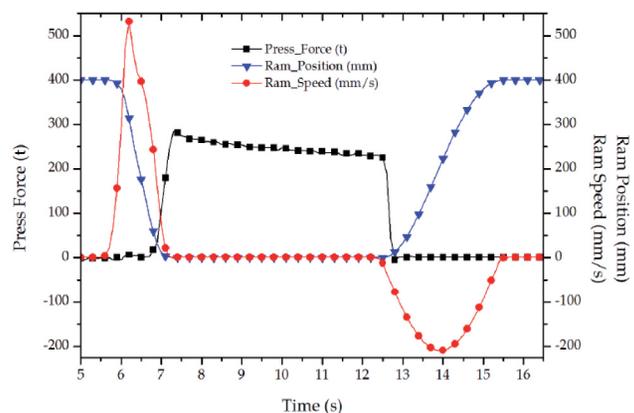
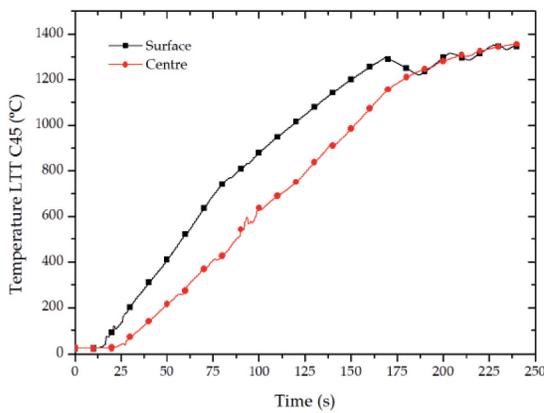


Fig. 5: Curva de calentamiento para el acero LTT C45 (izq.) y fuerza de la prensa, posición y velocidad del punzón durante la tixoforja (der.)

con flechas rojas. Observando más detenidamente el componente, se puede observar que el flujo del material durante el llenado genera pliegues que van hacia arriba comenzando en las aristas redondeadas de la base del mismo. En cualquier caso, estos han sido analizados y más que defectos pueden ser considerados como irregularidades superficiales ya que no entran dentro de la pieza. En el resto de las zonas, el componente es sano.

La calidad de la imagen se ha visto afectada dependiendo de la zona examinada. Así, cuando el haz pasa a través de áreas con gran cantidad de masa se obtienen imágenes de baja calidad, como se puede observar en la Fig. 7 (c). Por otra parte, el fenómeno de difracción ha sido visible en diversas zonas. Una de ellas se muestra en la Fig. 7 (b).

3.2. PROPIEDADES MECÁNICAS

En las Tabla III, Tabla IV y Tabla V se muestran las propiedades mecánicas del acero suministrado sin tratar, las propiedades mecánicas analizadas en las probetas de los componentes después del conformado semisólido y las propiedades de los componentes después de tratarlos térmicamente. Se muestran los resultados obtenidos en tres probetas diferentes, donde se observa un ligero incremento en el límite elástico y resistencia a la tracción comparando el componente después del proceso de conformado semisólido y el material suministrado. Por otra parte, se da una gran reducción en la elongación del material. En el caso del componente

tratado térmicamente, tanto el límite elástico como la resistencia a tracción aumentan considerablemente, aunque la elongación, en este caso, es casi nula.

Referencia	Diámetro (mm)	LE _{0,2%} (MPa)	R.T. (MPa)	Elong. (L ₀ =5d) (%)	Z (%)
Mat. Asco.	6	553	794	22.5	63

Tabla III: Propiedades mecánicas del acero LTTC45 suministrado por Ascometal

Referencia	Diámetro (mm)	LE _{0,2%} (MPa)	R.T. (MPa)	Elong. (L ₀ =5d) (%)	Z (%)
Forja SS 1	6	826	1143	14.9	29
Forja SS 2	6	588	919	2.7	16
Forja SS 3	6	586	982	6.9	16

Tabla IV: Propiedades mecánicas del acero LTT C45 después del proceso de conformado semi-sólido

Referencia	Diámetro (mm)	LE _{0,2%} (MPa)	R.T. (MPa)	Elong. (L ₀ =5d) (%)
Forja SS 1	6	1493	1647	0.6
Forja SS 2	6	-	1397	-
Forja SS 3	6	1430	1445	0.6

Tabla V: Propiedades mecánicas del acero LTT C45 después del tratamiento térmico

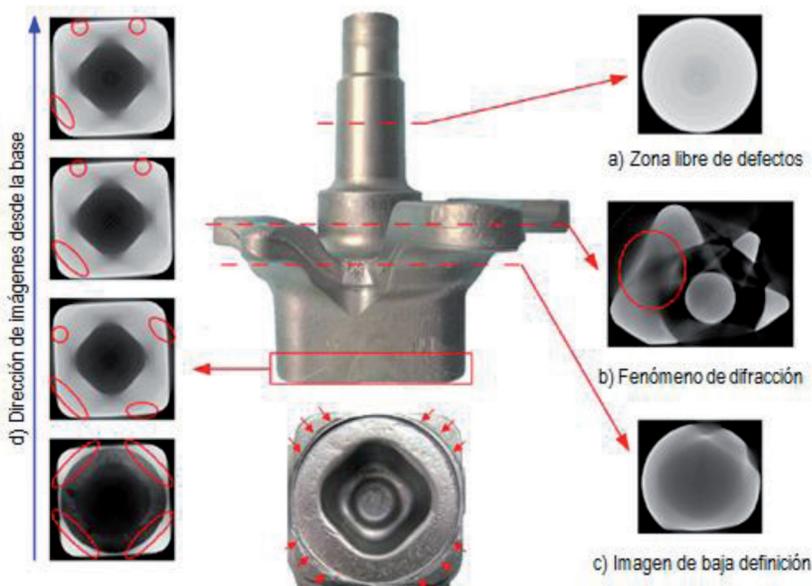


Fig. 7: Imágenes tomográficas del componente de LTT C45

3.3. ANALISIS DE LOS MOLDES

Los moldes de 1.2344 con dureza HRC 48-50 fallaron después de 72 ciclos de conformado, fabricando una pieza por ciclo. Todo apunta a que el fallo ocurrió debido a la proximidad entre el circuito de aceite para el atemperamiento del molde y la superficie. Además de los esfuerzos mecánicos, también es importante tener en cuenta el número de veces que se ha calentado y enfriado el molde. En el proceso de forja semisólida se ha realizado dicho ciclo de precalentamiento más de veinte veces, con la consiguiente fatiga térmica inducida en el utillaje, debido al carácter experimental de este trabajo. En la siguiente imagen se puede observar el molde agrietado (Fig. 8).

Además del agrietamiento, también son visibles los fenómenos de abrasión y adhesión en áreas donde el flujo del material semisólido ha sido mayor. Para analizar éstas áreas se ha cortado el molde por electroerosión y examinado en un microscopio SEM (Scanning Electron Microscope) (Fig. 9).

En la figura (Fig. 9) se muestra el área de transición entre la superficie del molde y la capa de óxido de hierro junto con el espectro de composición. La parte izquierda y arriba de la imagen SEM corresponde a la superficie del molde, mientras que la parte de abajo y a la derecha corresponde a la capa de óxido. En cuanto a los moldes nitrurados, se han realizado 200 ciclos de conformado y aún no presentan un daño significativo.

4. CONCLUSIONES

Basándonos en los resultados, se demuestra la capacidad de fabricar componentes sanos mediante la forja semisólida reduciendo las etapas de conformado de 3 a 1, reduciendo 6 veces los esfuerzos necesarios para deformar el material y ahorrando



Fig. 8: Grietas del molde inferior

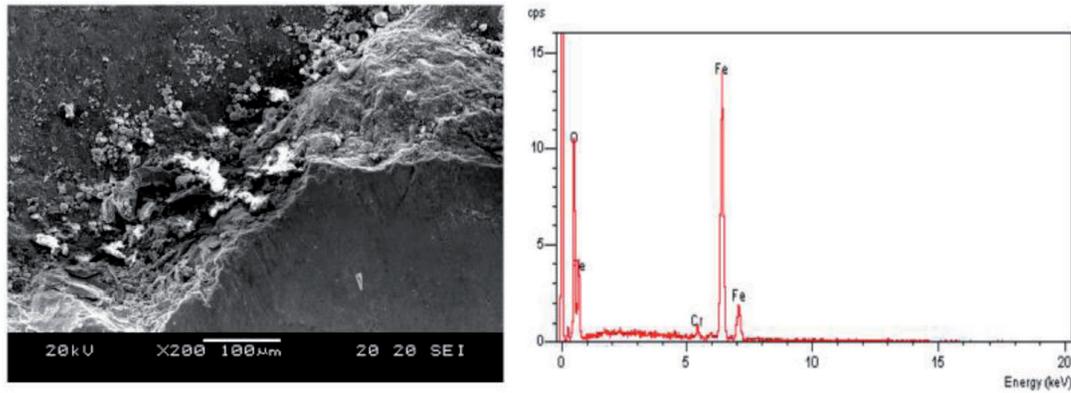


Fig. 9: Área de adhesión y espectro de capa

un 20% en materia prima, lo que supondría un gran efecto en el precio final del componente debido a que entre el 30 y 50% de su coste total reside en el coste de la materia prima. El siguiente paso es alcanzar las propiedades mecánicas exigidas. Para ello es importante seleccionar aceros que puedan alcanzar dichas propiedades mecánicas y sean válidos para el proceso. Además, habría que estudiar la aplicación de un tratamiento térmico acorde al material y necesidades finales, ya que el aplicado en este trabajo no ha sido diseñado para el material utilizado, lo que ha resultado en una elongación casi nula y baja reproducibilidad. Para analizar la idoneidad del material, entre otros aspectos, se propone diseñar un método de caracterización de los materiales como trabajo futuro.

En cuanto a los moldes, parece que para definir el mejor material con el cual fabricar los utillajes para el conformado semisólido se requiere, aún, de más estudios al respecto. En este caso en concreto, el material que mejor resultado ha dado ha sido el acero 1.2344 tratado térmicamente y nitrurado. En este ámbito, se propone como trabajo futuro la investigación de diferentes recubrimientos con el objetivo de alargar la vida útil del utillaje. Para ello, se proponen dos tipos de recubrimientos superficiales: WC-Co, que se aplica mediante HVOF (High Velocity Oxygen Fuel), y el MEX6000, aplicado mediante PVD (Physical Vapour Deposition). El primero tiene una buena combinación de propiedades (fuerte adhesión, gran resistencia cohesiva, altas tensiones residuales, resistencia al desgaste y a la erosión) que pueden verse mejoradas si se utilizan polvos nanoestructurados. Por otra parte, el MEX6000 es un revestimiento multicapa nanoestructurado con alta dureza, gran espesor y bajo coeficiente de fricción que puede trabajar bien a 1100 °C.

Finalmente, cabe destacar que la inexistencia de un modelo matemático que permita simular correctamente el proceso de conformado semisólido a altas fracciones sólidas tiene, también, una gran influencia en la industrialización de esta tecnología. La importancia de poder caracterizar el comportamiento del material y de diseñar una expresión matemática que sea capaz de estimar con suficiente exactitud los cambios que se producen en él durante el proceso es un apartado de alto interés y objeto de estudio. A pesar de que diversos investigadores han diseñado diferentes modelos [10–12], ninguno es capaz de predecir completamente el comportamiento de los materiales semi-sólidos a altas fracciones sólidas, lo que dificulta enormemente la transferencia a la industria de esta tecnología que, a día de hoy, trabaja a modo de "prueba y error". Por ello, también se marca como trabajo futuro la necesidad de analizar qué ocurre en el material a nivel microestructural y plasmarlo en una expresión numérica.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Spencer DB, Mehrabian R, Flemings MC. "Rheological behaviour of Sn-15pct Pb in the crystallization range". *Metallurgical Transactions*, 1972. Vol.3 p.1925-1932. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02642580>
- [2] Kapranos P, Kirkwood DH, Sellars CM. "Semi-solid processing of tool steel". *Journal de Physique*, 1993. Vol.4 p.835-840. DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/jp4:19937131>
- [3] Hirt G, Kopp R. *Thixoforming, Semi-solid Metal Processing*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009. 450p. ISBN: 978-3-527-32204-6
- [4] Kapranos P. "Semi-Solid Metal Processing – Thixoforming". *Explorer*, 2001. p. 1-6.
- [5] Muenstermann S, Tonnesen TV, Telle R. "Functional ceramic and refractory parts in advanced metal forming processes". En: *Proceeding Unified International Technical Conference on Refractories*, 2007. p.367.
- [6] Lozares J, Azpilgain Z, Hurtado I, et al. "Thixo Lateral Forging of a Commercial Automotive Spindle from LTT C45 Steel Grade". *Key Engineering Materials*, 2012. Vol.504-506, p.357-360. DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.504-506.357>
- [7] Mohammed MN, Omar MZ, Salleh MS, et al. "Semisolid metal processing techniques for nondendritic feedstock production". *The Scientific World Journal*. Vol.2013, p.1-16. DOI: <http://dx.doi.org/10.1155/2013/752175>
- [8] Robelet M. *Acier pur construction mécanique, procédé de mise en forme à chaud d'une pièce de cet acier, et pièce ainsi obtenue*. EP 1 426 460 A1. 2004.
- [9] Lozares J, Azpilgain Z, Hurtado I, et al. "Analysis of a Thixo-Lateral Forged Spindle from LTT C45, LTT C38 and LTT 100Cr6 Steel Grades". *Solid State Phenomena*, 2014, Vol.217-218, p.347-354. DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.217-218.347>
- [10] Atkinson HV. "Modelling the semisolid processing of metallic alloys". *Progress in Materials Science*, 2005. Vol.50, p.341-412. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2004.04.003
- [11] Favier V, Rouff C, Bigot R, et al. "Micro-Macro Modeling of the Isothermal Steady-State Behaviour of Semi-Solids". *International Journal of Forming Processes*, 2004. Vol. 7, p.177-94. DOI: <http://dx.doi.org/10.3166/ijfp.7.177-194>.
- [12] Koeune R, Ponthot JP. "A one-phase thermomechanical constitutive model for the numerical simulation of semi-solid thixoforming". *International Journal of Material Forming*, 2008. Vol.1. p.1007-1010. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s12289-008-0228-4>.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer sinceramente a CIE Automotiva, al Departamento de Industria, Innovación, Comercio y Turismo del Gobierno Vasco y al Ministerio de Industria, Turismo y Comercio del Gobierno de España por su aporte económico.