ANÁLISIS EXPERIMENTAL Y NUMÉRICO DEL ENSAYO DE TRACCIÓN USANDO PROBETAS PLANAS DE ALUMINIO 7075 T7351

Eduardo Cabezas*, Diego Celentano*, Alberto Monsalve** y Alfredo Artigas**

*Departamento de Ingeniería Mecánica
**Departamento de Ingeniería Metalúrgica
Universidad de Santiago – CHILE
e-mail: amonsalv@lauca.usach.cl

Resumen. En este trabajo se propone analizar experimental y numéricamente el comportamiento mecánico de la aleación de aluminio 7075 T7351 en el ensayo de tracción usando probetas planas. Para tal fin se llevaron a cabo un conjunto de experimentos y se ha simulado en forma tridimensional el proceso de deformación durante el ensayo por medio de una formulación elastoplástica de grandes deformaciones discretizada en el contexto del método de elementos finitos. Se presenta la validación experimental de los resultados numéricos obtenidos comparando curvas de tensión-deformación y relaciones de estricción en función del alargamiento.

Abstract. In this work an experimental and numerical study of the mechanical behaviour of the 7075 T7351 aluminium alloy in the tensile test using flat samples is proposed. For this purpose a set of experiences were carried out and a three-dimensional simulation of the deformation process during the test by means of an elastoplastic formulation of large deformations, discretised in the finite element method context was carried out. The experimental validation of the numerical results is presented comparing stress-strain curves and necking relationships as a function of the elongation.

1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se describe la caracterización experimental y numérica del comportamiento mecánico de la aleación de aluminio 7075 T7351 muy utilizada en la industria aeronáutica [1]. Para tal fin se realizaron una serie de ensayos de tracción en probetas planas a velocidad de celda (cruceta) constante de acuerdo con la norma ASTM E-646 [2]. Además, se ha simulado el proceso de deformación que tiene lugar en dicho ensayo hasta la fractura del material. Es bien sabido que la interpretación de las mediciones que surgen de este ensayo, las cuales permiten caracterizar el comportamiento mecánico del material, es dificultosa debido al desarrollo de una zona de estricción o cuello que se produce para altos niveles de alargamiento [3,4,5]. Otro aspecto que complica dicho análisis es la forma geométrica de la probeta ya que de ella dependen fuertemente los estados de tensiones que se generan en la zona del cuello. Por lo tanto, es importante tener en cuenta estos efectos para una adecuada caracterización experimental y numérica del comportamiento mecánico del material. Debe destacarse que el presente análisis es una extensión para el caso de probetas planas de la metodología descrita y validada satisfactoriamente en [6] para probetas cilíndricas. De manera análoga, los resultados numéricos obtenidos en el presente trabajo se validan con las correspondientes mediciones experimentales.

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El procedimiento experimental adoptado en este trabajo para la caracterización del comportamiento mecánico de un material consistió en los siguientes pasos:

1) Selección del material y las probetas a ensayar. El material elegido para el ensayo fue la aleación de aluminio 7075 T7351 considerando, de acuerdo a la norma ASTM E-646, probetas planas de 12.5 mm y 6 mm de ancho y espesor respectivamente; ver Figura 1. Las marcas "+" indican la distancia extensométrica inicial (50 mm). Según la norma ASTM, la formación del cuello y posterior fractura debe ocurrir dentro del tercio medio de la distancia extensométrica. Para lograr este efecto, se realiza una variación gradual del ancho de la probeta a lo largo de dicha distancia de tal manera de tener una pendiente gradual de los extremos hacia el centro dentro de un rango de 1 % permitido por la norma ASTM.

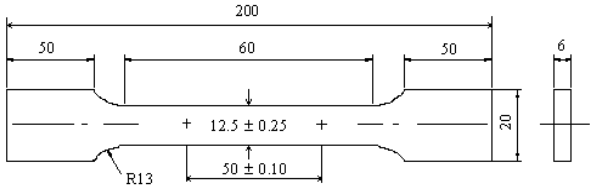


Figura 1. Análisis de una probeta plana de tracción: geometría.

2) Caracterización química de la aleación estudiada. Esta tarea se llevó a cabo mediante un espectrómetro de emisión óptica. La composición promedio de tales materiales se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Análisis de una probeta plana de tracción: composición química (% en peso) de la aleación estudiada.

% Al	%Cu	%Mg	%Zn	%Cr
90.07	1.6	2.5	5.6	0.23

3) Ensayo de tracción. En la Figura 2 se presenta la curva promedio de tensión ingenieril en función de la deformación ingenieril obtenida experimentalmente para la aleación de aluminio 7075 T7351 al ensayar cinco probetas. De esta curva podría inferirse que el material no presenta gran endurecimiento por deformación plástica. Sin embargo, tal como se comenta más adelante, un hecho que no se ve reflejado en la Figura 2 es el gran endurecimiento que experimenta el material en la zona del cuello para altos niveles de elongación. El alargamiento correspondiente a la carga máxima es de 9% aproximadamente. A partir de dicha deformación comienza la estricción que se desarrolla hasta la rotura de la probeta. Los valores medidos medios de algunas de las propiedades del material y sus dimensiones finales se resumen en la Tabla 2.

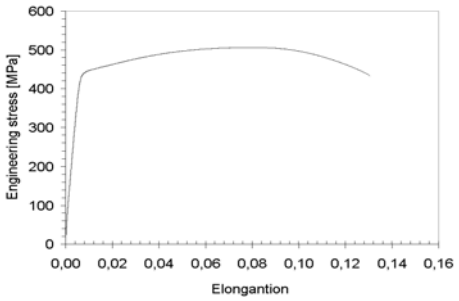
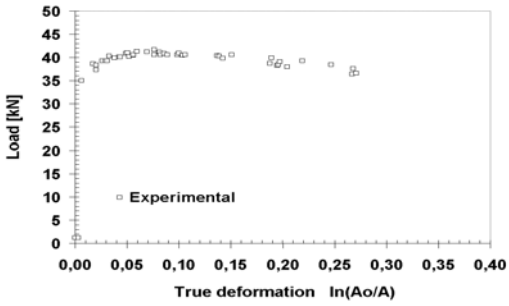


Figura 2. Análisis de una probeta plana de tracción: curva experimental promedio de la relación tensión-deformación ingenieril.

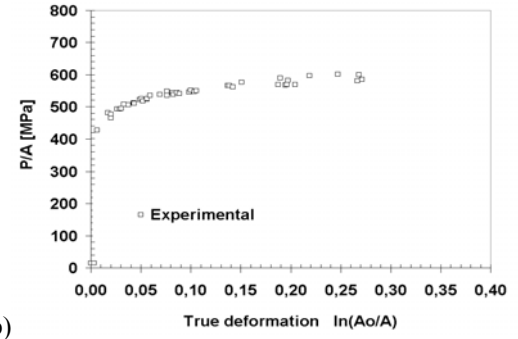
Tabla 2. Análisis de una probeta plana de tracción: propiedades del material (valores medidos medios) y dimensiones finales.

Módulo de Young E	73000 MPa
Límite elástico (alargamiento: 0.2%)	450 MPa
Tensión ingenieril máxima	516 MPa
Alargamiento en carga máxima	9.0 %
Alargamiento en fractura	13.0 %
Coeficiente de endurecimiento A^p	700 MPa
Exponente de endurecimiento n^p	0.0935
Distancia extensométrica final	56.3 mm
Ancho inicial y final de cuello	12.6 – 10.8 mm
Espesor inicial y final de cuello	6.25 - 5.8 mm

4) Caracterización del comportamiento plástico. Para grandes niveles de alargamiento, la distribución de deformaciones y tensiones deja de ser uniforme a lo largo de la probeta debido a la formación de un cuello en su tercio medio. Por lo tanto, las curvas de la Figura 2 no proveen una adecuada descripción de este fenómeno físico. De acuerdo con la metodología propuesta por Bridgman [4] y extendida por Cabezas [7] para probetas planas, la respuesta mecánica de un material puede ser representada adecuadamente a través de una curva tensión-deformación alternativa definida en función de la tensión equivalente media $\overline{\sigma}_{eq}$ y de la deformación equivalente ε_{eq}. Estas variables se definen como: $\overline{\sigma}_{eq}=f_B P/A$ y $\varepsilon_{eq}=\overline{\sigma}_{eq}/E+\varepsilon_p$, donde $f_B(\varepsilon_p)\leq 1$ es un factor de corrección conocido aplicado a la tensión verdadera media axial P/A; $A=wt$ es el área transversal instantánea en la zona del cuello, $\varepsilon_p=ln(A_0/A)$ es la deformación logarítmica o verdadera. Para probetas planas, $A=wt$, donde w y t son, respectivamente, el ancho y espesor instantáneo de la probeta en la zona del cuello. Puede apreciarse que w y t son variables adicionales que deben ser medidas para obtener ε_p y, consecuentemente, dicha relación tensión-deformación. También es importante comentar que el factor de corrección correspondiente a probetas planas es diferente del de probetas cilíndricas [7]. En la Figura 3 se presentan medidas experimentales de la carga y tensión verdadera media axial ambas en función de la deformación verdadera. Dichas curvas permiten, tal como se muestra en la Figura 4, obtener las medidas experimentales de la relación $\overline{\sigma}_{eq}$-ε_{eq} y la correlación potencial $\overline{\sigma}_{eq}=A^p\varepsilon_{eq}^{n^p}$ que surge de la misma donde A^p y n^p son los parámetros de endurecimiento (ver Tabla 2) que describen el comportamiento del material en su rango plástico.



(a)



(b)

Figura 3. Análisis de una probeta plana de tracción: mediciones experimentales de a) carga en función de la deformación verdadera y b) tensión verdadera media axial en función de la deformación verdadera.

Debe destacarse que los parámetros de endurecimiento obtenidos con la presente metodología son prácticamente coincidentes con los derivados a través de los ensayos utilizando probetas cilíndricas [6], es decir, el procedimiento experimental descrito brinda una adecuada interpretación física del ensayo.

La propiedades mecánicas obtenidas en el presente procedimiento experimental son los datos fundamentales a tener en cuenta en la simulación y validación del modelo.

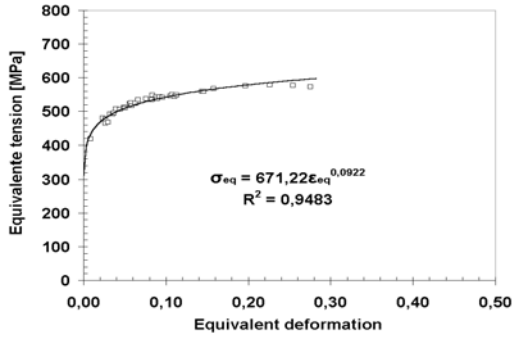


Figura 4. Análisis de una probeta plana de tracción: mediciones experimentales de la tensión equivalente media en función de la deformación equivalente y la correlación potencial que se deriva de las mismas.

3. MODELO MATEMÁTICO

El modelo matemático considerado en este trabajo se enmarca en el contexto de las ecuaciones de la mecánica de medios continuos [8]. El modelo constitutivo usado para describir el comportamiento del material se basa en la teoría de la plasticidad con grandes deformaciones [9]. Detalles del mismo así como de su correspondiente formulación discretizada realizada en el marco del método de elementos finitos pueden consultarse en [10].

4. SIMULACIÓN NUMÉRICA Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

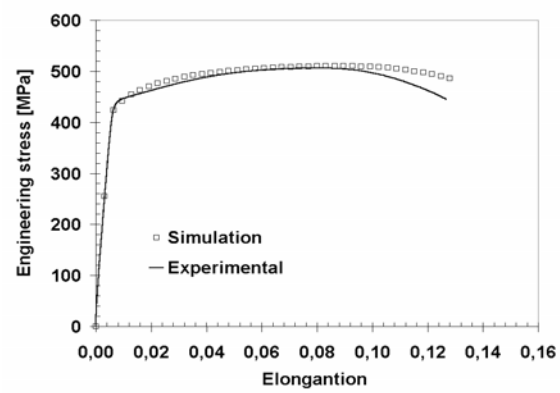
El objetivo principal del presente análisis numérico es validar los resultados del modelo sucintamente descrito con las mediciones experimentales presentadas para, de esta manera, describir de forma adecuada el comportamiento mecánico de la aleación estudiada.
Por razones de espacio, se omiten detalles propios de la simulación como malla utilizada, condiciones de contorno, etc.

En la Figura 5 se muestra una comparación experimental-numérica de la relación tensión-deformación ingenieril y algunos resultados en la sección del cuello: relaciones de ancho y espesor instantáneo con respecto a los valores iniciales en función del alargamiento axial, carga en función de la deformación logarítmica y tensión verdadera media axial en función de la deformación logarítmica.

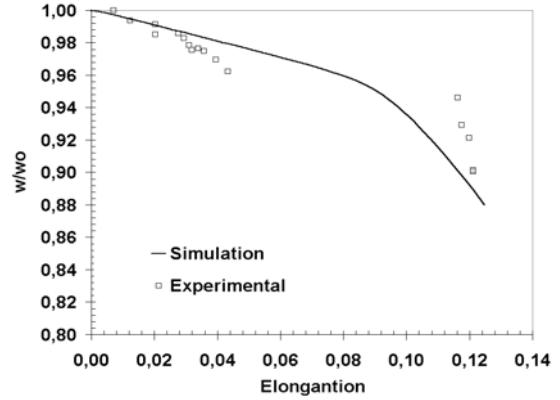
Puede observarse en estas curvas un buen ajuste global de los resultados numéricos a las mediciones experimentales. En particular, el modelo describe en forma realista el comportamiento de la zona elástica y el inicio del proceso de endurecimiento. Si bien existen algunas pequeñas discrepancias para altos niveles de alargamiento en las curvas de tensión ingenieril, carga y tensión verdadera media axial, debe notarse que tales diferencias se encuentran dentro del intervalo experimental de incertidumbre. La carga medida experimentalmente decrece a partir de un alargamiento de 9.0 % el cual es equivalente a una deformación logarítmica de 10.0 % (dichos valores se aproximan de buena manera a las respectivas deformaciones obtenidas de la simulación). Tal como ocurre en el ensayo utilizando probetas cilíndricas [6], en las probetas planas también se produce el hecho que la tensión verdadera media axial continúa creciendo hasta la fractura, estado para el cual puede apreciarse una gran cantidad de endurecimiento por deformación. Este hecho confirma nuevamente la ocurrencia de una inestabilidad geométrica (en vez de una constitutiva) ya que el efecto sobre las tensiones causado por la disminución del área transversal en la zona del cuello prepondera sobre el endurecimiento del material. Para altos niveles de alargamiento, las regiones de la probeta fuera de la zona de estricción se descargan elásticamente. Debe notarse, además, que la conocida condición simplificada que enuncia que la deformación logarítmica en el punto de carga máxima es igual al exponente de endurecimiento [5], se verifica en este caso (ver Tabla 2).

Las curvas de relación de ancho y espesor en función del alargamiento son al principio rectas, lo cual refleja una distribución uniforme de tensiones y deformaciones a lo largo de la probeta, ambas con una pendiente aproximada de 0.5 debido a la naturaleza incompresible del flujo plástico. Esta misma situación se mantiene hasta un alargamiento de 9.0 % que corresponde, tal como se mencionó anteriormente, al punto de carga máxima. Luego, se produce la reducción repentina del ancho y espesor que da lugar a la formación del cuello o estricción y, por lo tanto, las distribuciones de tensiones y deformaciones a lo largo de la probeta son a partir de este momento no homogéneas. Puede verse que las mediciones experimentales para estas dos relaciones presentan una gran dispersión reflejando lo dificultoso que resulta medir w y t durante todo el ensayo debido, principalmente, a la precisión de los equipos de medición y a la indeterminación en la localización de la zona de estricción. Se aprecia que los resultados numéricos se ajustan sólo cualitativamente a dichos datos experimentales a lo largo de todo el ensayo.

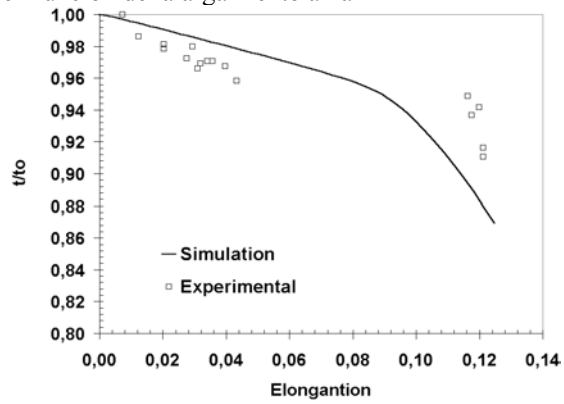
Por último, la Figura 6 muestra contornos de las distintas componentes del tensor de tensiones y de la deformación plástica efectiva correspondientes a un alargamiento de 13% (fractura). Tal como fuera comentado, la distribución no uniforme de dichas



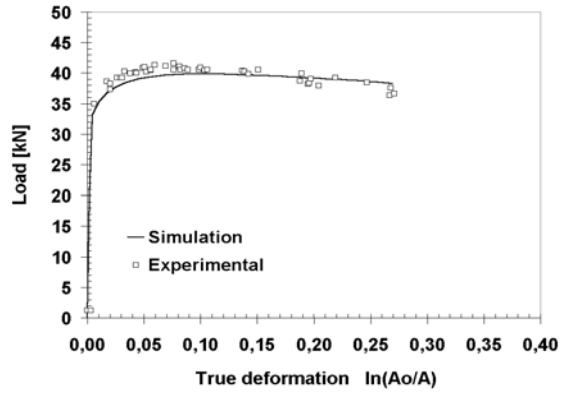
(a) .Relación tensión-deformación ingenieril. Resultados en la sección del cuello.



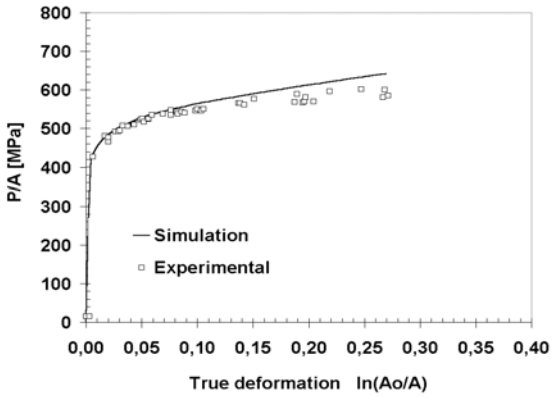
(b) Relación de ancho instantáneo con respecto al inicial en función del alargamiento axial



(c) Relación de espesor instantáneo con respecto al inicial en función del alargamiento axial



(d) Carga en función de la deformación logarítmica.



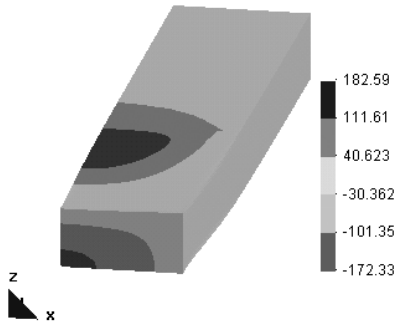
(e) Tensión verdadera media axial en función de la deformación logarítmica.

Figura 5. Análisis de una probeta plana de tracción de la aleación de aluminio 7075 T7351

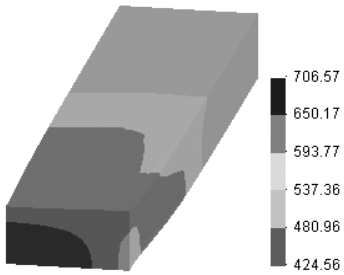
variables se debe a la formación del cuello para elongaciones cercanas a la de la rotura.

5. CONCLUSIONES

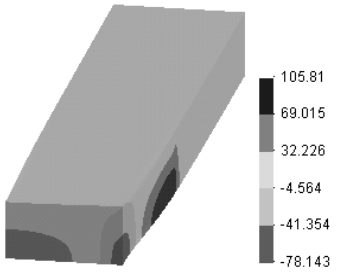
En este trabajo se ha presentado un análisis experimental y numérico del comportamiento mecánico de la aleación de aluminio 7075 T7351 a través del ensayo de tracción usando probetas planas. En primera instancia se realizó una caracterización de la respuesta del material con la finalidad de obtener la curva tensión-deformación y, a partir de la misma, derivar los parámetros elásticos y de endurecimiento a través de una metodología bien establecida para probetas cilíndricas y extendida recientemente al caso de probetas planas. El ensayo se simuló por medio de una formulación elastoplástica con grandes deformaciones discretizada en el contexto del método de elementos finitos. Por último, los resultados numéricos obtenidos con dicho modelo han sido validados experimentalmente de manera satisfactoria.



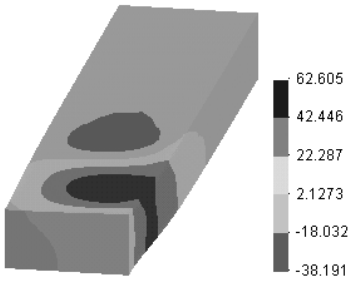
σ_{xx}



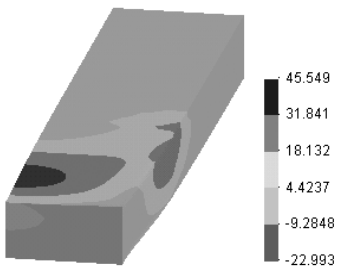
σ_{yy}



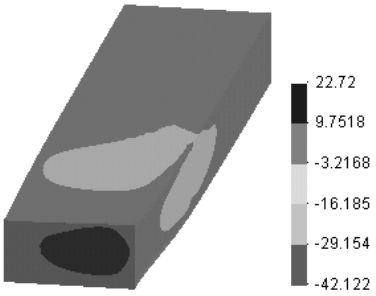
σ_{xy}



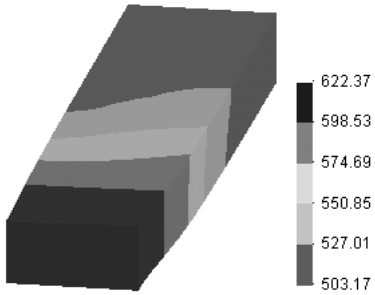
σ_{zz}



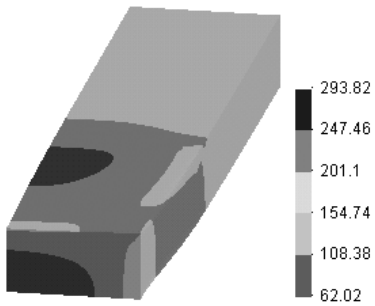
σ_{xz}



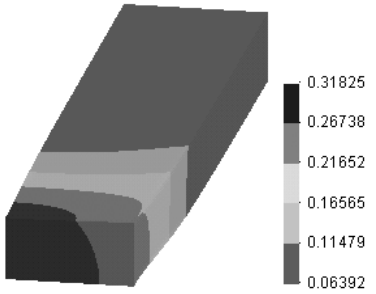
σ_{yz}



σ_{eq}



p



ε_p

Figura 6. Análisis de una probeta plana de tracción de la aleación de aluminio 7075 T7351. Contornos de las componentes del tensor de tensiones (en MPa) y de deformación plástica efectiva correspondientes al alargamiento de rotura de 13.0% (la terna x,y,z está orientada según el ancho, largo y espesor de la probeta, respectivamente; p es la presión (MPa).

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen los apoyos brindados por la Academia Politécnica Aeronáutica, DICYT-USACH y CONICYT (Proyecto 1020026) para el desarrollo de este trabajo.

7. REFERENCIAS

[1] Aluminium and Aluminium Alloys. The materials information society, ASM International, 499-502. (1993).

[2] ASTM E-646. Standard test methods for tensile strain-hardening exponents (n-value) of metallic sheet materials, Annual Book of ASTM Standards, Section 3: Metals Test Methods and Analytical Procedures. (2000).

[3] Nádai A. *Theory of Flow and Fracture of Solids*, McGraw-Hill Book Company, London. (1950).

[4] Bridgman P. *Studies in Large Plastic Flow and Fracture*, McGraw-Hill Book Company, London. (1952).

[5] Dieter G. *Mechanical Metallurgy - SI Metric Edition*, McGraw-Hill Book Company, London. (1988).

[6] Celentano D., Monsalve A., Artigas A., "Caracterización del comportamiento mecánico de aleaciones de aluminio utilizadas en la industria aeronáutica", Décimo Congreso Chileno de Ingenieria Mecánica, COCIM (2002).

[7] Cabezas E. "Análisis del comportamiento mecánico de materiales en el ensayo de tracción", Memoria de Magister, Universidad de Santiago de Chile, (2002).

[8] Malvern L. *Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs. (1969).

[9] Lubliner J. *Plasticity Theory*, Macmillan Publishing. (1990).

[10] Celentano D. A large strain thermoviscoplastic formulation for solidification of S.G. cast iron in a green sand mould, *International Journal of Plasticity* **17**, 1623-1658.(2001).