

## **ANÁLISIS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN: ASPECTOS EXPERIMENTALES Y NUMÉRICOS**

**Diego Celentano y Ángel Royo**

Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Santiago de Chile  
Av. Bdo. O'Higgins 3363, Santiago, CHILE - e-mail: dcelenta@lauca.usach.cl

### **RESUMEN**

En este trabajo se presenta un análisis experimental y numérico del comportamiento termomecánico de una probeta cilíndrica utilizada en el ensayo de tracción. Para ello se realizaron una serie de ensayos en probetas de acero SAE 1020. El modelo matemático considerado en este estudio se enmarca en el contexto de la mecánica de medios continuos sometidos a grandes deformaciones utilizando para la discretización de las correspondientes ecuaciones el método de los elementos finitos. Por último, se realiza una validación experimental de dicho modelo a través de las curvas características del ensayo.

### **ABSTRACT**

An experimental and numerical analysis of the thermomechanical behaviour of a cylindrical specimen used in the tensile test is presented in this work. To this end, several experiments have been conducted on SAE 1020 steel specimens. The mathematical model considered in the present study is defined in the continuum mechanics framework of solids subjected to large strains where the corresponding discretized formulation is written in the context of the finite element method. Finally, an experimental validation of this model is presented by using the tensile characteristic curves of the test.

### **INTRODUCCIÓN**

El estudio de sólidos sometidos a grandes deformaciones posee sin duda un gran interés. La fabricación de una importante cantidad de piezas se realiza en la actualidad por algún método que implique someter a un sólido a grandes deformaciones, ya sea por conformado, embutición, impacto, etc. Una de las maneras de analizar el comportamiento de sólidos sometidos a grandes deformaciones es a través del ensayo de tracción. Este ensayo es uno de los experimentos más usados en la evaluación de las propiedades de los materiales metálicos, tanto elásticas como de endurecimiento por deformación plástica, y su análisis completo es únicamente válido en el contexto de las grandes deformaciones debido a la fuerte estricción que se produce para altos niveles de deformación axial. Gracias a este ensayo es posible caracterizar el comportamiento mecánico del material y así poder plantear un modelo matemático que lo describa adecuadamente.

La simulación numérica del ensayo de tracción aplicado a diferentes materiales ha sido objeto de continuos desarrollos en las últimas décadas (ver Goicolea et al. (1996) y referencias allí citadas). Entre los diversos aspectos abordados se destacan la formulación de modelos constitutivos adecuados, la utilización de elementos que no presenten un grado de bloqueo inaceptable en su respuesta numérica en presencia de deformaciones plásticas incompresibles y la discusión de los resultados al compararlos con mediciones de laboratorio. Si bien en la mayoría de estos estudios se han adoptado bajas velocidades de celda de carga que conducen a la suposición de condiciones isotérmicas durante el ensayo, es importante mencionar que también se han realizado análisis termomecánicos a tasas de deformación suficientemente

altas con el fin de provocar condiciones adiabáticas y, de este modo, evitar la estimación de la pérdida de calor ambiente. En esta última situación, sin embargo, la validación experimental de los modelos es una tarea compleja debido a las dificultades asociadas a las mediciones para ensayos de corta duración.

En este trabajo se presenta un análisis experimental y numérico del comportamiento termomecánico de una probeta cilíndrica utilizada en el ensayo de tracción. Para ello se realizaron una serie de ensayos en probetas de acero SAE 1020 sujetos algunos de ellos a las condiciones establecidas por la norma ASTM (E 8M). El modelo matemático considerado en este estudio se enmarca en el contexto de la mecánica de medios continuos sometidos a grandes deformaciones utilizando para la discretización de las correspondientes ecuaciones el método de los elementos finitos. El comportamiento irreversible del material se describe a través de un modelo de plasticidad asociada con una función de fluencia de Von Mises que incluye efectos de endurecimiento isótropo por deformación plástica.

Los resultados que se obtuvieron experimentalmente fueron excelentes ya que se pudo observar una muy baja dispersión en las mediciones efectuadas. Es importante mencionar que fue necesario interpretar, siguiendo la metodología descrita en Goicolea et al. (1996), las mediciones experimentales para tener en cuenta la falta de uniformidad de las tensiones y deformaciones en la zona del cuello. Por otro lado, la validación experimental de los resultados de la simulación numérica ha sido satisfactoria (Royo, 2000, Royo et al., 2000). En particular, en este trabajo se comparan curvas de evolución de la temperatura para un ensayo a alta velocidad de carga.

### DESARROLLO EXPERIMENTAL

Con el fin de caracterizar el comportamiento mecánico del acero SAE 1020 a través de la simulación numérica del ensayo de tracción se realiza, en primera instancia, un procedimiento experimental que consiste en obtener las propiedades mecánicas de dicho material de composición química conocida para un tipo de probeta previamente definido (Royo, 2000; Royo et al., 2000). La configuración geométrica de la probeta de tracción utilizada en este trabajo obedece a la norma internacional ASTM (E 8M). La misma se presenta en la figura 1 (dimensiones en mm).

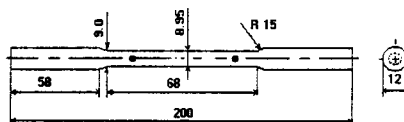


Figura 1: Configuración geométrica de la probeta utilizada en el ensayo de tracción.

Los puntos negros indican la ubicación del extensómetro. La distancia que los separa se ha escogido igual a 50 mm. La diferencia de diámetro que presenta la probeta tiene por objetivo localizar la formación del cuello en el tercio medio de la misma. Dicha diferencia se encuentra dentro del rango permitido por la norma citada. El diámetro mayor del sector correspondiente a la zona de fijación obedece al tipo de mordazas de la máquina Instron 4482 utilizada para el ensayo.

El comportamiento mecánico de este material ha sido extensivamente analizado en Royo (2000) y Royo et al. (2000) y, por lo tanto, no se repetirá en este trabajo cuyo objetivo es presentar algunos aspectos relevantes del análisis termomecánico del ensayo.

En el fenómeno físico de deformación plástica ocurre una transformación de energía en donde parte del trabajo mecánico necesario para deformar la probeta se transforma en calor que provoca un aumento de la temperatura principalmente en la zona del cuello. La tasa de

generación de calor adquiere relevancia para altas velocidades de deformación ya que esta situación puede considerarse como una condición adiabática debido a la pequeña transferencia de calor al ambiente por convección. En el presente estudio, la medición de la evolución de la temperatura en distintos puntos de la probeta durante el ensayo de tracción se realizó considerando una velocidad de celda de carga de 100 mm/min. Los detalles experimentales del ensayo pueden consultarse en Royo (2000). La condición inicial de temperatura fue de 20°C. Las figuras 2, 3 y 4 muestran la evolución de las temperaturas registradas para cuatro termopares situados a lo largo de la probeta a 5 mm (T1), -5 mm (T3), 15 mm (T2) y 25 mm (T4) del centro de la misma respectivamente. El tiempo correspondiente a la fractura del material es de aproximadamente 12 s. Se logra apreciar un rápido incremento de la temperatura para todos los termopares. También se observa que la temperatura sigue subiendo aún cuando la probeta ya ha fracturado debido a que el tiempo de respuesta de los termopares en comparación con la tasa de cambio de temperatura es grande. Como era de esperar, las mayores temperaturas se presentan en las zonas más cercanas al cuello. Se debe comentar asimismo que la probeta no se fracturó exactamente en la mitad de la distancia extensométrica hecho que, dado los altos gradientes de temperatura existentes, provocó la diferencia entre la lecturas de los termopares T1 y T3. Es importante mencionar que en este tipo de ensayo no ha sido posible registrar la tensión ingenieril en función de la deformación ingenieril ya que no se ha utilizado el extensómetro por el riesgo de ocasionarle un daño dada la rapidez con que se alcanza la fractura. Por lo tanto, sólo se obtuvieron la carga máxima y la tensión máxima. Además, debe destacarse que la magnitud de la tensión máxima obtenida se encuentra dentro de la banda experimental de los correspondientes valores obtenidos para un ensayo a bajas velocidades de carga debido a que, tal como se describe en Royo (2000), este material no presentó un claro comportamiento viscoso para altas velocidades de deformación. Bajo estas consideraciones, es válido suponer un comportamiento mecánico muy similar para ambas velocidades de celda de carga ensayadas.

### **SIMULACIÓN NUMÉRICA Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL**

El modelo matemático considerado en este trabajo se enmarca en el contexto general de la termomecánica de los medios continuos de sólidos sometidos a grandes deformaciones (Malvern, 1969). La función de energía libre adoptada se supone definida en términos de las deformaciones total y plástica de Almansi, de la deformación plástica efectiva que caracteriza al endurecimiento y de la temperatura. Los detalles de este modelo así como algunos aspectos relevantes de su discretización en el marco del método de los elementos finitos se encuentran en Celentano (1999).

Debido a la condición de incompresibilidad de las deformaciones plásticas normalmente aceptada para el análisis de problemas que involucren metales, es importante destacar que el grado de bloqueo que exhibe la solución numérica del presente modelo ha sido previamente evaluado para diferentes tipos de elementos bi y tridimensionales encontrándose, con los algoritmos desarrollados a la fecha, una respuesta satisfactoria para elementos cuadriláteros en 2D y hexaedros en 3D (García et al., 2000).

Los detalles de la discretización espacial utilizada en la simulación del ensayo pueden consultarse en Royo (2000). La variación temporal del desplazamiento en la parte superior de la probeta considerada en la simulación se obtiene, con el fin de reproducir en forma realista las condiciones del ensayo, de las mediciones experimentales descritas en el apartado anterior para una velocidad de celda de carga de 100 mm/min. La historia del desplazamiento medido puede interpolarse mediante dos rectas (Royo, 2000). Debe destacarse que, a pesar de imponer una velocidad de celda de carga constante durante el ensayo, la velocidad experimentada por

las marcas extensométricas no alcanza dicho valor en casi toda la duración del ensayo ya que sólo fue posible apreciar una velocidad cercana a 100 mm/min para los tiempos finales asociados a la descarga producto de la evolución severa de la estricción. Se observa, incluso, una muy baja velocidad de deformación en los instantes iniciales del ensayo que corresponden a la carga en el rango elástico del material.

Dada la rapidez del ensayo, se supone que no hay intercambio de calor en la cara vertical externa de la probeta con el medio ambiente que la rodea. La validez de esta suposición ha sido verificada por García (1999). También se adoptan condiciones adiabáticas en el borde superior de la malla. Para el resto de los contornos, se aplican condiciones de simetría.

Al igual que lo observado por García (1999) para probetas de aluminio, en diversas simulaciones llevadas a cabo en el presente trabajo se pudo comprobar que el comportamiento mecánico prácticamente no se ve afectado por la variación de temperatura que experimenta la probeta producto de la deformación, es decir, las deformaciones de origen térmico tienen una incidencia despreciable en la evolución del estado tensional de la probeta. La consideración de este efecto sumado al escaso comportamiento viscoso del material ya comentado permiten comparar los resultados numéricos obtenidos para diferentes velocidades de celda de carga (Royo, 2000).

A continuación se presentan en las figuras 2, 3 y 4 los resultados experimentales y numéricos de la evolución de temperaturas para cada una de las posiciones correspondientes a la ubicación de los termopares en el ensayo.

En la figura 2 se observan los resultados de la simulación y las mediciones experimentales para dos posiciones simétricamente situadas a 5 mm a partir del eje horizontal localizado en la mitad de la distancia extensométrica de la probeta. En esta zona es posible apreciar un aumento notable de la temperatura causado por la alta tasa de deformación plástica que se produce a altos niveles de alargamiento. Puede notarse una tendencia similar ascendente entre los resultados experimentales y numéricos. La discrepancia entre ellos es atribuible, tal como se comentó anteriormente, a que la rotura no fue perfectamente simétrica hecho que sí se logra en la simulación.

En las figuras 3 y 4 se presentan similares resultados a los mostrados en la figura 2 para posiciones de 15 mm y 25 mm, respectivamente. Se observan una vez más incrementos importantes de la temperatura cuyos máximos van disminuyendo para ubicaciones más alejadas de la zona de formación del cuello. También se aprecia en estas figuras una disparidad entre los resultados experimentales y numéricos. Dichas diferencias se deben al hecho de considerar adiabática a la cara superior de la probeta ya que el salto de temperatura de aproximadamente 20°C existente entre dicha zona y los hombros de la probeta no puede ser despreciado. Una mejor suposición para la simulación hubiera consistido en imponer en esa cara una condición de conducción con un coeficiente de transferencia de calor equivalente al efecto de enfriamiento que provoca el resto del metal de la probeta no tenido en cuenta en la modelización. Además, es interesante destacar el quiebre de estas curvas (a 10s y 8s para los resultados experimentales y numéricos, respectivamente) que se produce debido a la descarga de la probeta en estas zonas que provoca, a su vez, un detenimiento en la generación de calor. No se debe dejar de lado el hecho de que mientras la probeta se deforma el termopar debe presentar un buen contacto con la misma durante todo el ensayo. Este efecto tiene su importancia debido a las grandes deformaciones que sufre la probeta.

En la figura 5 se muestra la distribución de temperaturas en la probeta para un nivel de deformación de  $e_{zz} \approx 0.95$  que, como se mencionó anteriormente, corresponde a la deformación de rotura. Puede notarse el notable incremento de temperatura que se produce en las zonas cercanas al cuello debido a la existencia de una gran magnitud del trabajo plástico en

dichos sectores. Como es de esperar, este hecho se hace menos notorio para las regiones más alejadas del cuello.

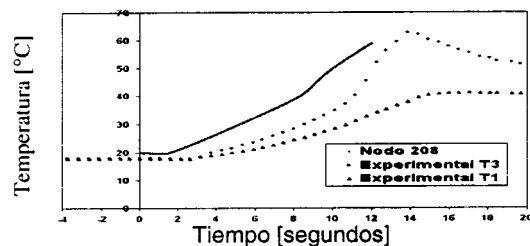


Figura 2: Temperatura en función del tiempo para el caso numérico y experimental.

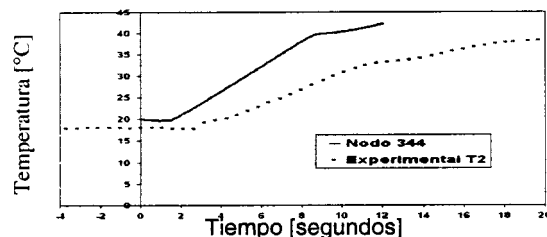


Figura 3: Temperatura en función del tiempo para el caso numérico y experimental.

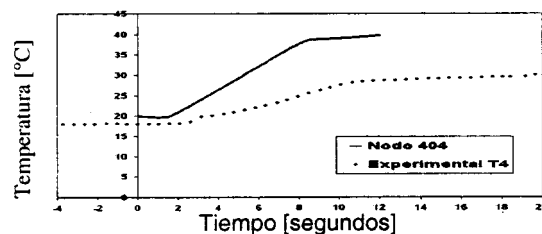


Figura 4: Temperatura en función del tiempo para el caso numérico y experimental.

## CONCLUSIONES

Se ha presentado un análisis experimental y numérico del comportamiento termomecánico de una probeta cilíndrica de acero SAE1020 utilizada en el ensayo de tracción. A través de dicho ensayo se han podido determinar las propiedades mecánicas del material, tanto las elásticas como las relacionadas con la ley constitutiva de endurecimiento por deformación plástica. Para la obtención de estos últimos parámetros se ha tenido en cuenta la falta de uniformidad de las tensiones en la zona del cuello a altos niveles de alargamiento. Cabe destacar que los resultados que se obtuvieron experimentalmente fueron excelentes ya que se ha logrado una marcada reincidencia en ellos.

La validación experimental de los resultados de la simulación ha sido satisfactoria ya que fue posible obtener, dentro de las dispersiones propias de todo ensayo, una muy buena aproximación entre las mediciones y la solución numérica. En particular, en trabajos previos de los autores se han comparado curvas de carga-deformación logarítmica y tensión-

deformación logarítmica en la zona del cuello y, además, en el presente trabajo, se realizó un análisis de la evolución de la temperatura en diferentes puntos de la probeta para el ensayo a alta velocidad de carga.

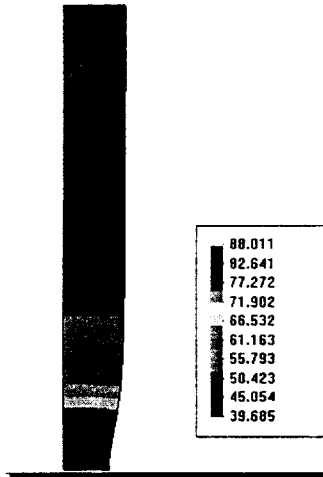


Figura 5: Distribución de temperaturas para un nivel de deformación  $e_{zz} \approx 0.95$  (fractura).

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen los soportes brindados por CONICYT (Proyecto FONDECYT N° 1990588) y DICYT-USACH.

#### REFERENCIAS

- Annual book of ASTM standards (1988). Section 3: Metals Test Methods and Analytical Procedures.
- Celentano D. (1999). A finite element formulation for nonlinear coupled thermomechanical problems. *Proceedings of CanCNSM*, Victoria, Canada.
- García C. (1999). Análisis numérico de sólidos sometidos a grandes deformaciones. *Memoria de Ingeniería de Ejecución en Mecánica*, Universidad de Santiago de Chile.
- García C., Celentano D. y Royo Á. (2000). Análisis de diferentes tipos de elementos finitos sometidos a grandes deformaciones elastoplásticas. *Actas del IX Congreso chileno de ingeniería mecánica y IV congreso nacional de energía*.
- Goicolea J., Gabaldón F. y García Garino C. (1996). Interpretación de la estricción en el ensayo de tracción empleando modelos hipoeelásticos e hiperelásticos. *Actas del III Congreso de Métodos Numéricos en Ingeniería*, SEMNI, 875-885.
- Malvern L. (1969). *Introduction to the mechanics of a continuous medium*. Prentice-Hall Inc.
- Royo Á. (2000). Caracterización experimental y numérica del comportamiento mecánico de materiales. *Memoria de Ingeniería de Ejecución en Mecánica*, Universidad de Santiago de Chile.
- Royo Á., Celentano D., García C. y Monsalve A. (2000). Estudio experimental y numérico de una probeta cilíndrica utilizada en el ensayo de tracción. *Actas del IX Congreso chileno de ingeniería mecánica y IV congreso nacional de energía*.