

ENSAYOS MECÁNICOS EN MATERIALES A ELEVADA VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN Y ALTA TEMPERATURA

F. Gálvez, D. Cendón y V. Sánchez-Gálvez

Departamento de Ciencia de Materiales, ETSI de Caminos Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, c/ Profesor Aranguren s/n, 28040 Madrid, España.

Resumen. En el presente trabajo se presenta el dispositivo de ensayos mecánicos, diseñado por los autores, para caracterización de materiales a altas velocidades de deformación y elevada temperatura. El dispositivo está basado en la técnica de la barra Hopkinson junto con un horno, permitiendo ensayar materiales a velocidades de deformación de 10^3 s^{-1} y a temperaturas de hasta 1000°C . El dispositivo está preparado para obtener fotografías durante el ensayo mediante fotografía ultrarrápida, para lo cual se ha diseñado un original sistema de apertura del horno en el instante del ensayo. Se presentan los diferentes mecanismos y los sincronismos utilizados que se emplean en esta técnica. Para validar el procedimiento del ensayo se han realizado simulaciones numéricas mediante el código Autodyn3D. Los resultados de la simulación muestran que esta técnica es válida para caracterizar materiales a altas temperaturas y a altas velocidades de deformación. En este trabajo se presentan los resultados obtenidos mediante este dispositivo para un acero inoxidable en compresión.

Abstract. In this work the authors present a testing device designed at the Department of Materials Science of the Polytechnic University of Madrid for materials characterization. The method allows testing at high strain rates up to 10^3 s^{-1} and at high temperatures up to 1000°C . The apparatus also is capable to take pictures of the specimens during the mechanical tests, taking images of the deformation and failure of the tested samples thanks to high speed photography techniques. In this paper the experimental set-up is explained, showing the measurement system, the temperature control system and the different synchronisms used. To validate the experimental method the procedure has been simulated using Autodyn3D. The results show that this technique is valid to obtain the strain stress curve of materials at high strain rate with high temperature while taking images of the deformation and failure of the samples. The work shows the results obtained for a stainless steel tested in compression.

1. INTRODUCCIÓN

Es bien sabido que las propiedades de los materiales son función de la velocidad de deformación y de la temperatura. Es por ello por lo que para un correcto conocimiento del comportamiento del material es necesario disponer de ensayos mecánicos que permitan ensayar los materiales a diferentes temperaturas y velocidades de deformación. Actualmente existen técnicas que permiten ensayar materiales a diferentes temperaturas. Por otro lado existen diferentes técnicas que permiten ensayar a diferentes velocidades de deformación. Sin embargo, aunque se han propuesto diferentes soluciones [1-4], no existe una técnica establecida para ensayar materiales a alta velocidad de deformación conjuntamente con altas temperaturas. En el presente trabajo se presenta el dispositivo de ensayos mecánicos, diseñado por los autores, para caracterización de materiales a altas velocidades de deformación y elevada temperatura. Con el se pretende cubrir el hueco existente para caracterizar materiales en estas condiciones.

2. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

El equipo experimental está basado en el dispositivo de la barra Hopkinson, sobre el cual se ha acoplado un

horno y un sistema de fotografía ultrarrápida. La descripción del equipo de la barra Hopkinson puede encontrarse en numerosos trabajos [5], por lo que aquí no se entra en detalle.

El dispositivo consta de dos barras, generalmente de acero o aluminio, entre las que se coloca la probeta a ensayar. Se impacta con una tercera barra en la dirección longitudinal y se genera un estado tensional que se propaga longitudinalmente por las barras y la probeta. Mediante un estudio adecuado de las ondas de tensión que se propagan sobre las barras y la probeta es posible obtener la totalidad de la curva tensión-deformación de la probeta, obteniéndose velocidades de deformación en el entorno de 10^3 s^{-1} y constantes durante el ensayo.

Para extender el ensayo a altas temperaturas se ha acoplado un horno que cubre la probeta y parte de las barras. En la figura 1 se muestra un esquema de la disposición del horno en la barra. El horno puede desplazarse longitudinalmente sobre las barras mediante un sistema neumático gracias a un pistón de doble efecto, de forma rápida y reversible para permitir la fotografía. En la situación inicial, durante el calentamiento y hasta la estabilización de la temperatura de ensayo, la probeta se encuentra centrada en el interior del horno.

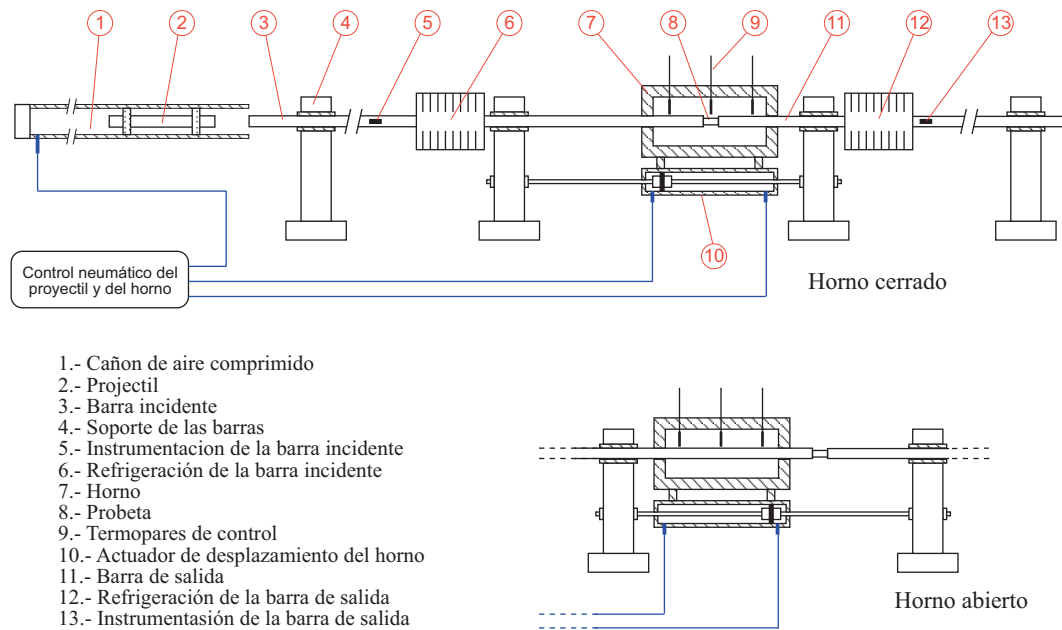


Fig. 1. Representación esquemática del dispositivo experimental

Para realizar el ensayo se abre una válvula que suministra presión al cañón, de forma que se acelera el proyectil, y simultáneamente suministra presión al pistón para que el horno se desplace. En el instante en que el proyectil choca con la barra incidente, el horno ya se encuentra totalmente desplazado y en posición de abierto. En ese instante, si es necesario, las cámaras de fotografía pueden tomar imágenes del proceso de deformación y rotura de la probeta. Una vez realizado el ensayo, el horno vuelve rápidamente a su posición original para disminuir el choque térmico sobre las barras y no reducir su vida útil. Modificando los caudales de aire que actúan sobre el pistón, es posible controlar la velocidad de desplazamiento del horno. Esto puede hacerse de forma independiente para cada uno de los sentidos de movimiento del horno, apertura o cierre. Este proceso de desplazamiento del horno puede regularse por tanto a voluntad, controlando los tiempos de ambos movimientos así como el tiempo en que el horno está en posición de abierto.

Para conseguir la temperatura más alta posible durante el ensayo, se ha elegido un material para las barras que se comporte de forma elástica incluso a altas temperaturas, tanto a compresión como a tracción. Para cumplir estos requisitos, las barras que forman el sistema de ensayos se han fabricado con la superaleación de Níquel, Rene41, con un diámetro de 19mm y una longitud de 1000mm. Este material es capaz de mantener un límite elástico por encima de 500MPa hasta 1000°C de temperatura.

El tiempo entre la apertura del horno y el instante del ensayo debe ser el menor posible para evitar el descenso de temperatura de la probeta. De igual forma, el tiempo entre la apertura del horno y su cierre debe ser pequeño

para disminuir el choque térmico sobre las barras y aumentar su longevidad.

Todo el proceso de movimiento del horno es monitorizado mediante un transductor de desplazamiento que proporciona la posición del horno en cada instante. En la figura 2 puede observarse la posición del horno a lo largo del tiempo junto con las medidas procedentes de las barras incidente y transmitida. En esta figura se muestra el tiempo transcurrido desde el instante en que se abre la válvula de disparo. El horno puede considerarse en posición de abierto cuando el desplazamiento del mismo es superior a 140mm, esto es cuando el tiempo transcurrido está entre los 200ms y los 470ms. El proyectil tarda en impactar la barra incidente 260ms, y la duración de un ensayo en barra Hopkinson incluyendo los tiempos de propagación de las ondas en las barras está por debajo de 1ms, por lo que puede asegurarse que en el instante del ensayo el horno se encuentra totalmente abierto.

Es importante tener en cuenta que en el momento en el que se realiza el ensayo mecánico, a los 260ms después del disparo del proyectil, el horno lleva únicamente abierto 60ms, por lo que la probeta aún no ha tenido tiempo de reducir su temperatura, o su reducción ha sido mínima. Esto quiere decir que la temperatura de la probeta en el instante del ensayo puede considerarse igual a la temperatura inicial a la que se encontraba en el horno. Este aspecto se ha comprobado mediante el calor que emite un cuerpo negro y despreciando los efectos de convección y conducción. Para un cuerpo negro, de las dimensiones de la probeta a ensayar, a los 60ms el descenso de temperatura es únicamente unas décimas de grado. Esto quiere decir que se puede considerar que la temperatura de la probeta es la temperatura del horno.

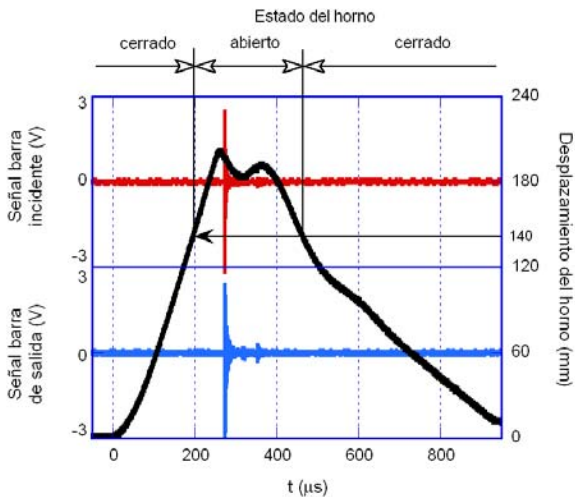


Fig 2. Posición del horno comparada con las señales de la barra incidente y de la barra de salida.

En primer lugar, el conseguir una temperatura en la posición de la instrumentación de las barras similar a la temperatura ambiente es fundamental, pues la temperatura afecta directamente al comportamiento de las bandas extensométricas y a la medida que estas proporcionan. Para ello se ha diseñado un sistema de enfriamiento para las barras mediante refrigeración por agua. El sistema de refrigeración logra que la temperatura de las barras en la posición de las bandas extensométricas sea precisamente la temperatura ambiente, cualquiera que sea la temperatura en el horno. Gracias a ello no es necesario corregir la medida que proporciona la instrumentación.

En segundo lugar, el perfil de temperaturas en las barras afecta directamente a la propagación de las ondas elásticas en las barras, lo que implica que puedan ser necesarias correcciones adicionales de las señales para obtener la curva tensión deformación real. La correcta determinación del perfil de temperaturas en las barras es un factor clave para obtener un resultado adecuado en la medida de las tensiones y deformaciones en la probeta. El análisis de este efecto se ha realizado mediante simulaciones numéricas presentadas posteriormente.

El perfil de temperaturas en las barras se ha determinado mediante 8 termopares situados entre la probeta y el sistema de refrigeración. Además de estos termopares se ha utilizado uno adicional para medir la temperatura en la posición de la instrumentación de las barras, cuya lectura siempre ha coincidido con la temperatura ambiente, con temperaturas en el horno desde el ambiente hasta 1000°C. El perfil de temperaturas se ha obtenido para diferentes temperaturas de control del horno, desde 300°C hasta 1000°C, y se representan en la figura 3.

Con objeto de simular adecuadamente la evolución de las ondas en las barras en la simulación numérica, el

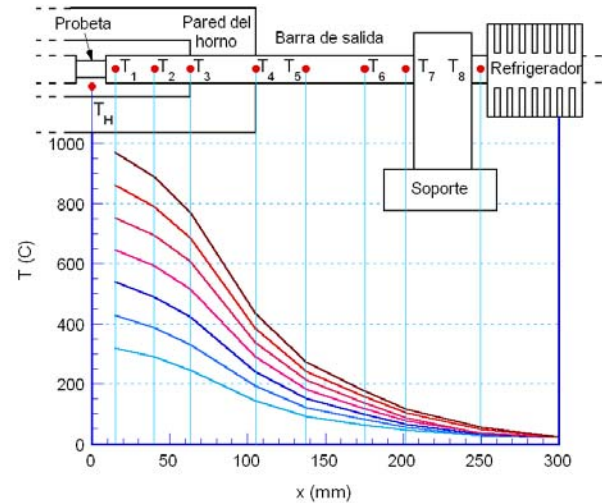


Fig.3. Perfil de temperatura en la barra de salida medido para diferentes temperaturas de control del horno

perfil de temperatura en las barras se ha ajustado mediante una expresión potencial de cuarto orden:

$$T(x) = T_c(1 + Ax + Bx^2 + Cx^3 + Dx^4) \quad (1)$$

donde T_c es la temperatura de control del horno y las constantes son las siguientes: $A = 4.18 \cdot 10^{-3} \text{mm}^{-1}$, $B = 1.74 \cdot 10^{-4} \text{mm}^{-2}$, $C = 1.01 \cdot 10^{-6} \text{mm}^{-3}$ y $D = 1.77 \cdot 10^{-9} \text{mm}^{-4}$

3. SIMULACIÓN NUMÉRICA

Para determinar la influencia del perfil de temperatura medido en las barras, en las medidas obtenidas de las bandas extensométricas, se realizaron simulaciones numéricas mediante el programa Autodyn3D. El propósito de estas simulaciones numéricas es comprobar y analizar si las tensiones y deformaciones que sufre el material que se ensaya son las mismas que las que se obtienen de las medidas de la instrumentación de la barra Hopkinson.

La simulación se realizó simulando completamente las barras, de 1m de longitud y 19mm de diámetro, entre las cuales se colocó una probeta cilíndrica de 10mm de diámetro y 10mm de longitud. El tamaño de los elementos modelizados es de 1mm en la dirección longitudinal y variable, aunque del mismo orden, en la dirección transversal.

Las condiciones de contorno impuestas al problema fueron de dos tipos, en velocidades y en temperaturas. La primera consiste en un perfil de velocidades en el extremo de la barra incidente de acuerdo con el que se obtiene experimentalmente por el proyectil. El perfil de temperaturas introducido es el que se obtiene experimentalmente en las barras, según la expresión polinomial (Eq. 1), introduciendo la temperatura del horno T_c como parámetro de cálculo.

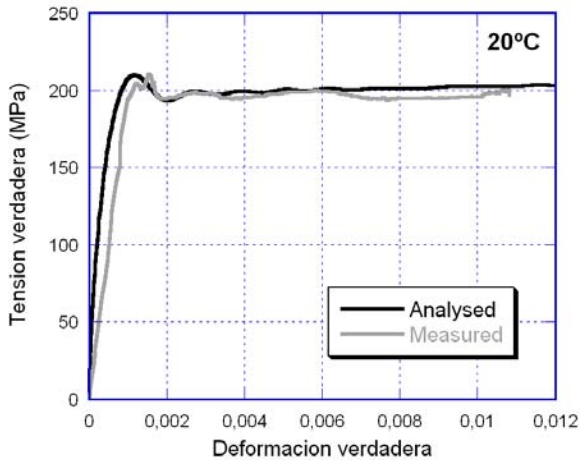


Fig.4. Resultados de la simulación numérica para una temperatura de 20°C

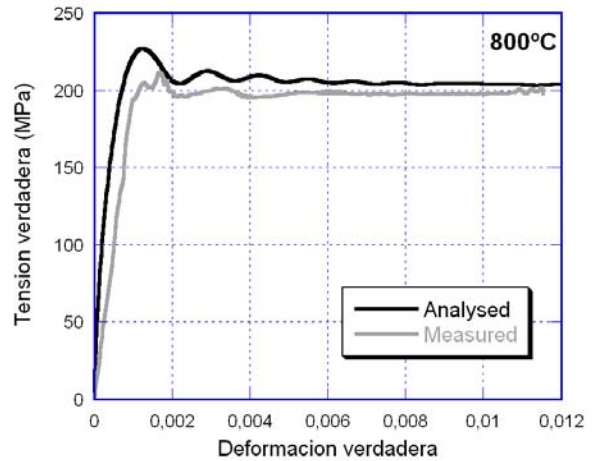


Fig.5. Resultados de la simulación numérica para una temperatura de 800°C

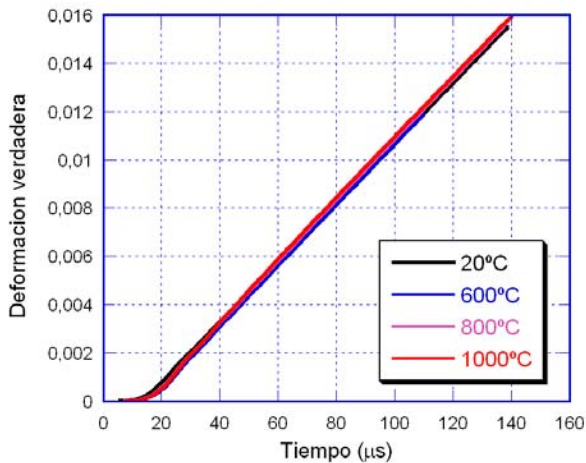


Fig.6. Resultados de la simulación numérica. Efecto de la temperatura en la medida de la deformación.

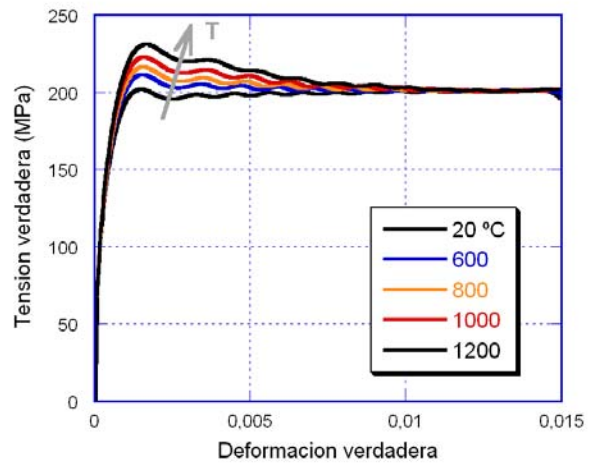


Fig.7. Resultados de la simulación numérica. Efecto de la temperatura en la medida de la tensión.

El material empleado en las barras fue el correspondiente a la aleación de níquel, con un modelo elástico y lineal. La variación del módulo elástico con la temperatura, para incluir el efecto térmico, se introdujo a través de una subrutina de usuario programando una función polinomial correspondiente a dicho material.

El material empleado en la probeta fue un material elastoplástico sin endurecimiento por deformación. Las constantes elásticas corresponden al acero $E=203\text{GPa}$, $\nu=0.3$, y el límite elástico es de 200MPa . Este material simulado no tiene variación con la temperatura, puesto que se persigue comparar su comportamiento predeterminado con las medidas de la instrumentación de la barra Hopkinson.

Para el análisis de los resultados se ha medido la tensión y la deformación sufrida por la probeta en su centro,

directamente sobre ella en un punto de integración. Por otro lado la tensión y la deformación se han obtenido de las deformaciones de las barras mediante la teoría clásica de la barra Hopkinson. La comparación entre ambas se muestra en la figura 4 para una temperatura de 24°C y en la figura 5 para 800°C . Se ha rotulado como “measured” las deformaciones reales medidas directamente en la probeta y como “analysed” las obtenidas a través de la teoría de la barra Hopkinson.

En la figura 6 se muestran las deformaciones obtenidas mediante la teoría de la barra Hopkinson para diferentes temperaturas, y se observa que la temperatura no influye en los valores de deformación medidos. En la figura 7 se muestra la tensión medida para diferentes temperaturas, obteniéndose una sobre valoración en la tensión creciente con la temperatura pero únicamente a deformaciones bajas.

Los resultados muestran que la medida de las deformaciones no está afectada por el perfil de temperaturas, y puede obtenerse directamente sin hacer ninguna corrección. Sin embargo las tensiones que proporciona la teoría de la barra Hopkinson mediante su análisis sobrevaloran ligeramente las tensiones reales que sufre la probeta, de forma más acusada cuanto más elevada sea la temperatura. Esta sobre valoración se produce únicamente a deformaciones bajas, siendo prácticamente despreciable cuando la deformación crece por encima del 1%. Este efecto no parece ser significativo hasta temperaturas superiores a 600°C. El error cometido a 800°C al utilizar la teoría clásica es del 7% a bajas deformaciones, y menor del 3% cuando la deformación en la probeta supera el 0.4%. Cuando la temperatura del horno se eleva hasta 1000°C el error que se comete está acotado por el 12%, siendo menor del 5% para deformaciones mayores del 0.5%.

Como conclusión puede afirmarse que para el material de las barras y con el perfil de temperaturas obtenido en el equipo experimental, los errores que se cometen al utilizar la teoría clásica de la barra Hopkinson son únicamente notables a temperaturas mayores a 800°C y solo son importantes a deformaciones menores del 0.5% en la probeta.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

El equipo experimental se ha empleado para determinar el comportamiento mecánico del acero inoxidable FV535. Los ensayos se hicieron en compresión sobre probetas cilíndricas de 6.25mm de longitud y 4mm de diámetro. Para determinar el ablandamiento del material se realizaron ensayos desde 400 hasta 800°C en intervalos de 100°C. Además de realizaron tres ensayos a 20°C y el límite elástico medio obtenido se definió como la tensión de referencia σ_0 . La velocidad de deformación media obtenida en todos los ensayos fue de 1400 s^{-1} .

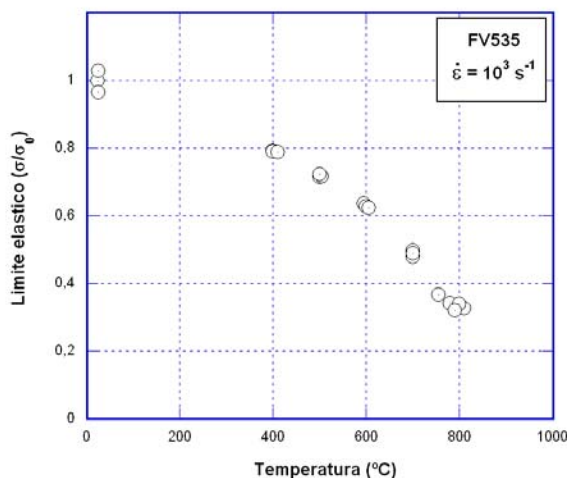


Fig.8. Reducción del límite elástico en función de la temperatura para el acero FV535 a velocidad de deformación de 10^3 s^{-1} .

Los resultados del límite elástico obtenido se muestran en la figura 8. Se aprecia una disminución del límite elástico del 20% a 400°C, y va disminuyendo paulatinamente con la temperatura hasta alcanzar una reducción del 65% a 800°C.

Los resultados de los ensayos muestran una disminución de la curva tensión deformación con la temperatura tal y como se representa en la figura 9. En ella se aprecia que el comportamiento del material puede aproximarse a un comportamiento elasto-plástico perfecto para todas las temperaturas estudiadas. El ablandamiento que se observa debido al incremento de temperatura es claro.

Al analizar estas curvas hay que tener en cuenta que debido a la alta velocidad de deformación obtenida el ensayo no es isoterma sino adiabático. Eso implica que la temperatura de la probeta crece con la deformación durante el ensayo, ya que el trabajo plástico se transforma en calor produciendo un incremento térmico en la probeta. Esa aumento de temperatura puede calcularse suponiendo que una fracción β del calor generado proviene de la deformación plástica mediante la siguiente expresión:

$$\Delta T = \frac{\beta}{\rho C_p} \int \sigma d\varepsilon \quad (2)$$

mediante la que se ha obtenido que para el ensayo a 400°C el aumento de temperatura en la probeta es de 28°C cuando la deformación alcanza el 10% y de un aumento de 54°C cuando la deformación llega al 20%. En el ensayo a 800°C, el aumento térmico es menor, debido a que el trabajo plástico es menor ya que el área encerrada en la curva tensión deformación es más pequeña, siendo el aumento térmico de 12°C para deformaciones del 10% y de 24°C cuando la deformación llega al 20%.

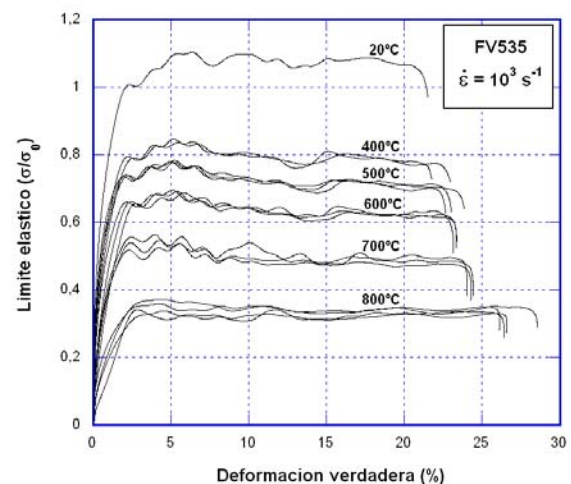


Fig.9. Reducción de la curva tensión - deformación en función de la temperatura para el acero FV535 a velocidad de deformación de 10^3 s^{-1} .

5. CONCLUSIONES

Hasta ahora la comunidad científica no ha reconocido ninguna técnica experimental completamente adoptada para ensayar materiales a alta velocidad de deformación y alta temperatura conjuntamente. El equipo experimental descrito en este trabajo permite rellenar el hueco existente para obtener las propiedades mecánicas de materiales a velocidades de deformación de 10^3 s^{-1} y hasta temperaturas de $1000 \text{ }^\circ\text{C}$.

Las simulaciones numéricas muestran que el procedimiento de ensayo es válido y no son necesarias correcciones en deformaciones obtenidas mediante la teoría de la Barra Hopkinson. Las tensiones obtenidas por el mismo método son válidas y tampoco necesitan correcciones para temperaturas de hasta 800°C . Sin embargo pueden ser necesarias pequeñas correcciones en las tensiones cuando las deformaciones son pequeñas, o cuando la temperatura se eleva hasta los 1000°C . Las correcciones a aplicar pueden ser las sugeridas por diferentes autores en la modelización de propagación de ondas para barras de impedancia variable. [6-7].

Los ensayos mecánicos realizados sobre el acero FV535 muestran que el procedimiento del ensayo es viable y permite obtener la curva tensión deformación para alta velocidad de deformación y alta temperatura.

Los resultados del mencionado acero muestran un ablandamiento debido a la temperatura de hasta un 65% a 800°C , manteniendo un comportamiento que puede aproximarse a un material elasto-plástico perfecto.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Comunidad Autónoma de Madrid por la financiación recibida a través del proyecto 07N/0120/2002 y al Ministerio de Ciencia y Tecnología mediante el proyecto MAT2002-3538.

REFERENCIAS

- [1] Rosenberg, Z., Dawicke, D., Strader, E. and Bless, S.J. A new technique for heating specimens in Split-Hopkinson-Bar experiments using induction coil heaters. *Exper. Mech.* 26, 275-278, 1986
- [2] Gilat, A. and Wu, X. Elevated temperature testing with the torsional split Hopkinson bar. *Exper. Mech.* 34, 166-170, 1994
- [3] Lennon A.M., Ramesh K.T. A technique for measuring the dynamic behaviour of materials at high temperatures" *International Journal of Plasticity*, Vol. 14, No. 12 1279-1292, 1998
- [4] Apostol M., Vuoristo T., Kuokkala V.T., "High temperature high strain rate testing with a compressive SHPB" *Journal de Physique IV* 110, 459-464, 2000
- [5] Nicholas T. "Material behaviour at high strain rates" *Impact Dynamics*, Ed. John Wiley & Sons. New York, USA, Wiley-Interscience Publication, 277-332, 1982
- [6] Bacon C., Carlsson J. Lataillade J.L. "Evaluation of force and particle velocity at the heated end of a rod subjected to impact loading" *Journal de Physique IV* C3, 395-402, 1991
- [7] Bacon C. "Numerical prediction of the propagation of elastic waves in longitudinally impacted rods: applications to Hopkinson testing" *International Journal of Impact Engineering* 13, Vol 4, 527-539, 1993