

## Comprobación de la uniformidad de resultados de un equipo de ensayos simultáneos de termofluencia

### Checking of the uniformity of results of simultaneous creep testing equipment

René Molina<sup>1</sup>, Gerardo Pender<sup>1</sup>,  
Gabriel González<sup>1</sup>, Lilián Moro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Estudios de Materiales (GEMAT), Facultad Regional Bahía Blanca. Universidad Tecnológica Nacional. 11 de Abril 465, Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina. e-mail: lmoro@frbb.utn.edu.ar

---

#### RESUMEN

El fenómeno de termofluencia o creep se presenta en materiales que son sometidos a condiciones complejas donde se combinan los efectos de una alta temperatura mantenida constante con las sollicitaciones provocadas con los esfuerzos también constantes. Esta situación provoca deformaciones progresivas en el tiempo lo cual eventualmente puede conducir a fallas catastróficas. La caracterización de este fenómeno se debe efectuar con máquinas de ensayos apropiadas, las cuales suelen ser de tecnología dependiente de patentes costosas. Es por este motivo que el desarrollo de tecnologías propias, reviste gran importancia para poder efectuar las determinaciones experimentales que requieren los materiales.

En este trabajo se presenta la descripción del diseño y construcción de un equipo para ensayos simultáneos de termofluencia por tracción, que se llevó a cabo en el Laboratorio de Ingeniería Mecánica de la Facultad Regional Bahía Blanca de la Universidad Tecnológica Nacional. Se desarrolló un sistema de tres máquinas, de igual diseño, que someten al material bajo ensayo a tensión y temperatura constantes, manteniendo la independencia de funcionamiento de cada una de ellas con la particularidad de estar controlado por un único sistema de adquisición y software. Para comparar y validar los resultados obtenidos se realizaron ensayos simultáneos sobre un mismo material sometido a idénticas condiciones de tensión y temperatura. De esta manera se cotejaron entre sí las curvas de ensayo respectivas y los parámetros característicos obtenidos. Al mismo tiempo se realizó un contraste de los sistemas de medición y control, haciendo uso de equipos certificados por laboratorios acreditados [1,2]. Se obtuvieron resultados que indican la uniformidad del funcionamiento de las tres máquinas y su concordancia no sólo entre sí, sino con datos obtenidos en la literatura actual y presentados por otros autores.

**Palabras clave:** Termofluencia, ensayo por tracción, diseño, estado de tensión.

---

#### ABSTRACT

The phenomenon of creep occurs in materials that operate under high temperatures and mechanical stresses, causing changes in their structures; such changes are evidenced by a progressive loss of mechanical strength. The characterization of this phenomenon should be performed with appropriate test machines, which are usually dependent on expensive technology patents. The development of these own technologies, is very important to make experimental determinations that require materials.

In this paper the description of the design and construction of equipment for simultaneous tensile creep tests, carried out at the Laboratory of Mechanical Engineering Bahia Blanca Regional Faculty of the National Technological University is presented. The system consists of three machines of the same design, which subject the material under test at constant tension and temperature, maintaining the independence of operation of each with the particularity of being controlled by a single acquisition system and software. To compare the results obtained on the same, simultaneous tests under identical conditions materials tension and temperature were performed and were compared to each test curves and characteristic parameters obtained. At the same time a contrast of measurement and control systems was performed, using equipment certified by accredited laboratories. Results indicating the uniformity of operation of the three machines and their concordance with data obtained in the current literature and presented by other authors were obtained.

**Keywords:** Creep, Tensile creep tests, Design, Mechanical strength.

## 1. INTRODUCCIÓN

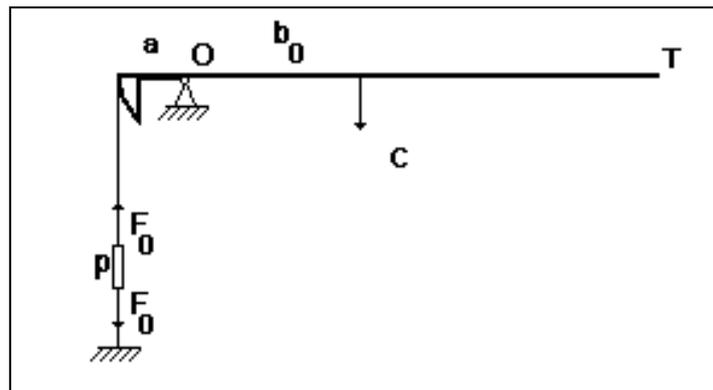
Los materiales, que operan en servicio a temperaturas elevadas y sometidos a esfuerzos mecánicos, sufren un proceso de fluencia lenta o creep, que provoca transformaciones en sus estructuras. La caracterización de este fenómeno se debe efectuar con máquinas de ensayos apropiadas, las cuales suelen ser de tecnología dependiente de patentes costosas [1].

Por lo general, los laboratorios de ensayos mecánicos de las universidades o de los institutos de investigación de la Argentina, no tienen garantizado un flujo continuo de fondos para la adquisición de las máquinas de ensayos de este tipo. Por otra parte este tipo de estudio implica largos períodos de tiempo para cada experimento, a lo largo del cual se mantiene el equipo en uso. Para subsanar esta limitación, se presenta como una alternativa, efectuar el desarrollo del equipo, con tecnología propia ya probada, pero con la posibilidad de realizar tres ensayos a la vez, con independencia entre ellos, evitando la erogación de dinero que representa adquirir tres equipos individuales de marcas registradas.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

En general en los ensayos de termofluencia se mantiene a una probeta del material en estudio, sometida a una carga y temperatura constante, se mide la deformación y se grafica ésta en función del tiempo [2,3].

En esta propuesta se plantea mantener la tensión y temperatura constantes basándonos en la invariabilidad de volumen de la zona calibrada de la probeta ( $p$ ) y el equilibrio de momentos de una barra  $T$  con centro de rotación en  $O$  según se indica en la figura 1. Luego se controla la variación de distancia de la carga  $C$  al pivote  $O$  y se mide la deformación de la probeta.



**Figura 1:** Esquema del sistema de carga en la posición inicial

En el instante inicial, aplicando la ley de equilibrio de momentos de las fuerzas en la barra  $T$ , se cumple que

$$C \cdot b_0 = a \cdot F_0 \quad (1)$$

donde  $a$  es el radio de una leva circular, por lo que se mantiene constante. Si se considera una probeta cilíndrica de longitud inicial  $l_0$  y área  $A_0$ , se calcula su volumen  $V$  como:

$$V = A_0 \cdot l_0 \quad (2)$$

Se supone que la deformación se realiza en forma macroscópicamente uniforme y que el volumen se mantiene constante:

$$V = A_0 \cdot l_0 = A \cdot l \quad (3)$$

siendo la longitud de la probeta al alargarse  $l$  y el área  $A$ . Al aplicar una fuerza  $F$ , por medio de un esfuerzo de tracción uniaxial, se produce un alargamiento de la probeta y como consecuencia la disminución del área inicial  $A_0$ . La tensión axial  $\sigma_0$  en el instante inicial, se calcula como:

$$\sigma_0 = \frac{F}{A_0} \quad (4)$$

Si se despeja  $F_0$  de la ecuación (1) se obtiene que:

$$F_0 = \frac{C}{a} b_0 \quad (5)$$

donde  $R = C/a$ , es la relación entre la carga y el radio de la leva circular (factor constante). Entonces:

$$F_0 = R \cdot b_0 \quad (6)$$

despejando  $A_0$  de la ecuación (3) y reemplazando las ecuaciones (5) y (6) en la ecuación (4)

$$A_0 = V / l_0 \quad (7)$$

$$\sigma = (R/V) \cdot l_0 \cdot b_0 \quad \text{y} \quad \sigma \cdot V/R = l_0 \cdot b_0 \quad (8)$$

En la ecuación (8) el primer miembro es constante mientras en el segundo tenemos las variables. Designando como  $E$  al primer miembro

$$E = l_0 \cdot b_0 \quad (9)$$

Cuando se produce una deformación tendremos que:

$$E = (l_0 + \Delta l) \cdot (b_0 - \Delta b) \quad (10)$$

Donde  $\Delta l$  es la variable medida y  $\Delta b$  es la variable controlada (variación de distancia de la carga al centro de rotación) a través de la función de control (según la ecuación 10)

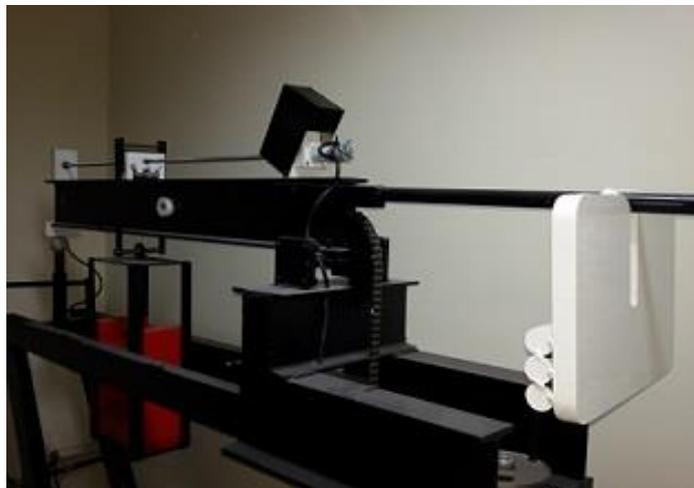
### 3. SISTEMA MECÁNICO

El sistema mecánico está constituido por tres subsistemas idénticos. Cada equipo presentado en esta propuesta (subsistema), está formado por una barra principal apoyada en un extremo a un amortiguador regulable y en el otro extremo posee una leva circular de radio constante, como se puede observar en la figura 2.



**Figura 2:** Las tres máquinas de creep con su sistema adquisidor.

De la barra principal cuelga un peso variable, de trazabilidad controlada, que se desplaza a lo largo de la misma, permitiendo modificar la distancia al centro de rotación y así poder lograr la tensión elegida. El peso está ubicado en un carro con rodamientos que permiten el desplazamiento del mismo a lo largo de la barra. El movimiento se realiza mediante un tornillo patrón impulsado por un motor reductor de corriente continua (12 volt, 47rpm) que se controla mediante una interfase y un software específico (Figura 3).



**Figura 3:** Sistema de control del desplazamiento de la carga.

Para obtener la tensión constante, se selecciona para cada subsistema la pesa adecuada a la tensión a la que se realizará el ensayo, teniendo en cuenta que el fundamento del método es trabajar a tensión constante pero también se debe mantener constante el volumen de la zona calibrada de la probeta. Como para cada ensayo se predetermina el área de la zona calibrada de probeta, los pesos, las distancias de desplazamiento y de la leva de radio constante, el equipo diseñado permite trabajar con distintos rangos los cuales se indican en la Tabla 1.

**Tabla 1:** Rangos de trabajo de acuerdo a las dimensiones del equipo

PESO SELECCIONADO [Kg]	ÁREA CALIBRADA [mm <sup>2</sup> ]	TENSIÓN MÍNIMA [MPa]	TENSIÓN MÁXIMA [MPa]
10	12,56	8	72
20	12,56	16	144
30	12,56	24	216
40	12,56	32	288
50	12,56	40	360
60	12,56	48	432

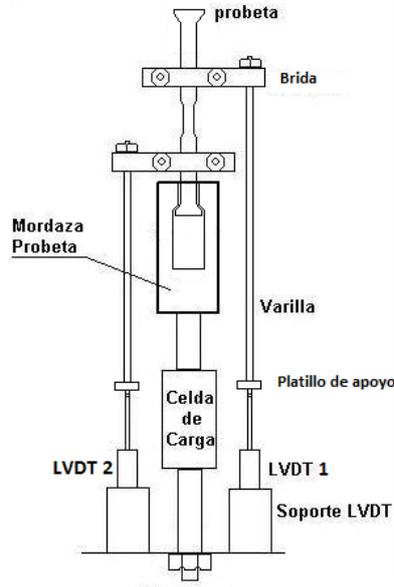
El equipo tiene anexo un horno eléctrico, donde el control de la temperatura se efectúa por medio de una termocupla de cromel-alumel, cuyo extremo caliente se ubica sobre la superficie de la zona central calibrada de la probeta. El equipo mide la deformación de la zona calibrada de la probeta por medio de dos transformadores diferenciales de variación lineal (LVDT) Marca Solartron, que producen una salida de corriente continua con una amplitud proporcional al desplazamiento de un núcleo móvil. La señal de salida de los LVDT posee diferencia de potencial variable de  $\pm 10V$  y la señal de los sensores es adquirida por un sistema analógico- digital [4].

El sistema de adquisición de datos se caracteriza por la unificación de los 3 subsistemas mecánicos adquiriendo los siguientes datos de medición:

- Deformación de la probeta a partir de la salida en voltaje de los LVDT, 2 por cada subsistema.
- Fuerza en la barra de tracción de cada subsistema por medio de una celda de carga.
- Tensión aplicada a la probeta a partir de la modificación de la distancia del pivot a la carga constante C.

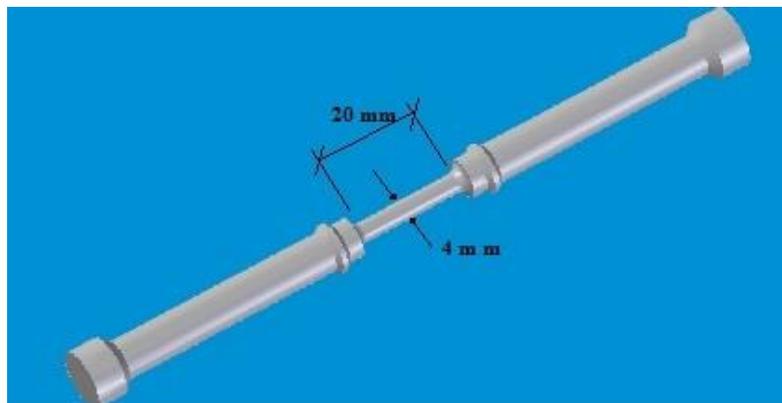
- El corte del ensayo por señal de un fin de carrera ubicado en el amortiguador de apoyo.

En la figura 4 se indica la ubicación del sistema de medición de la deformación y la ubicación de la celda de carga.



**Figura 4:** Esquema de la ubicación del sistema de medición de la deformación y la celda de carga.

Los estudios se realizan usando probetas cilíndricas, cuyas dimensiones y forma se indican en la figura 5, se observa que la probeta tiene dos salientes al finalizar la zona calibrada, donde se sujetan los elementos de medición.



**Figura 5:** Esquema de la probeta.

Por medio del estudio del estado de tensión en la misma, se determinó que la presencia de los elementos de sujeción y referencia, no produce modificaciones relevantes en la distribución de tensiones del área calibrada. Para confirmar esta uniformidad se han elaborado modelos estructurales con el método de cálculo numérico de Elementos Finitos para poder estimar la opción más adecuada; con este fin se han empleado plataformas CAE (Computer Aided Engineering) disponibles bajo licencia en la Facultad Regional Bahía Blanca (Figura 6) [6]

El núcleo del sistema lo constituye una placa adquisidora (National Instruments) con múltiples entradas de conversión analógica digital de 18 bits de resolución, como así también contadores digitales. Mediante un software apropiado se realiza el proceso de medición y control en forma independiente de cada subsistema mecánico, esto significa que es posible establecer el funcionamiento de uno a tres ensayos en momentos di-

ferentes, seleccionando los parámetros de tensión y temperatura en forma individual. En la figura 5 se aprecia el circuito del sistema de adquisición de datos.

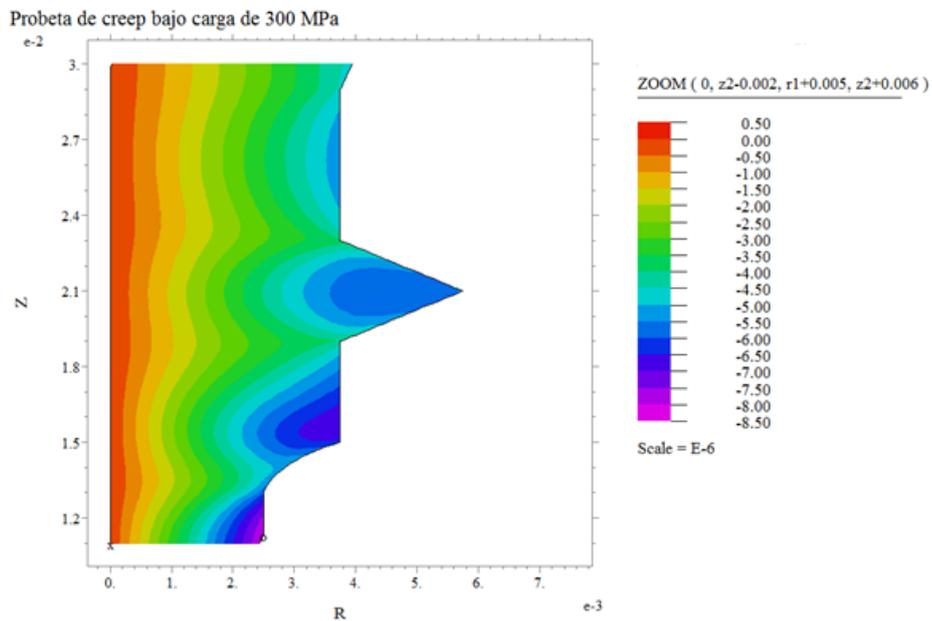


Figura 6: Estado de tensiones en la saliente de la probeta sometida a una tensión de 300MPa

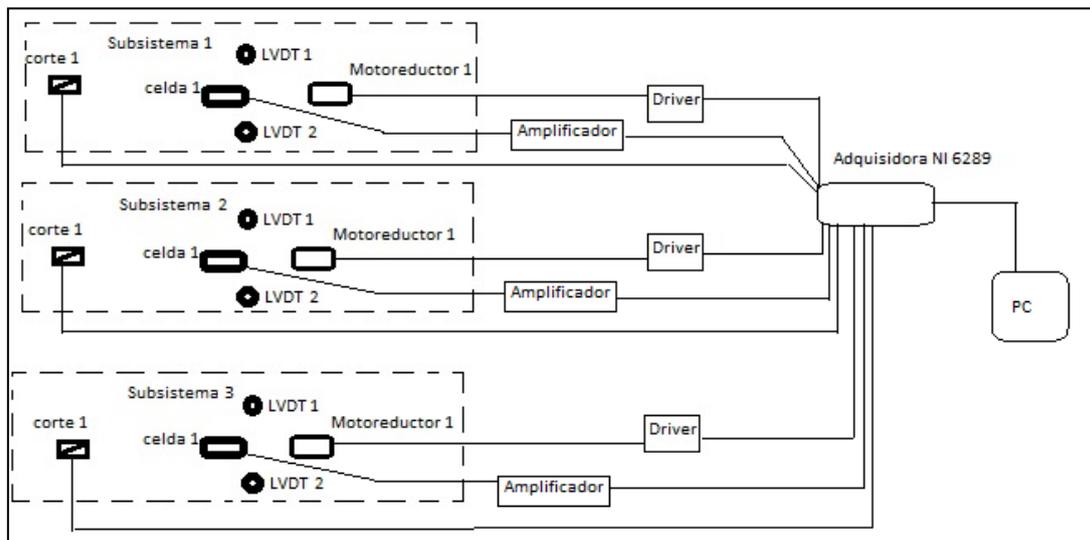


Figura 7: Esquema simplificado del circuito de adquisición

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para obtener la tensión constante en cada subsistema se selecciona la pesa adecuada a la tensión a la que se realizará el ensayo, teniendo en cuenta que el fundamento del método pretende trabajar a tensión constante pero también manteniendo invariable el volumen de la zona calibrada de la probeta. Durante el proceso de medición se mantendrá con valores fijos el área de la zona calibrada de probeta, los pesos, las distancias de desplazamiento y de la leva de radio constante, de acuerdo a los distintos rangos de trabajo con que cuenta el equipo.

Teniendo en cuenta previamente la estabilización de la temperatura de trabajo, se inicia el proceso de ensayo registrando cada incremento de deformación igual a la resolución del sistema de medición (0,01mm).

Para cada aumento de la deformación en el valor indicado, se produce una disminución del área de la probeta, y como se debe mantener la tensión constante, se disminuye en forma continua la carga en función de la disminución del área; para esto se va variando la distancia del peso seleccionado al centro de rotación de la barra.

Se realizaron ensayos de creep, en los tres equipos, sobre acero 1 Cr 0.5 Mo a tensiones de 168 MPa y 205 MPa y temperaturas de 813K y 853 K respectivamente. En todos los casos se obtuvieron resultados concordantes en los tres equipos, [5].

En las tablas 2 y 3 se indican las velocidades de deformación medidas en la etapa secundaria en los distintos ensayos realizados. Se observa que los valores son en todos los casos del mismo orden de magnitud.

**Tabla 2:** Velocidad de deformación de los ensayos a una tensión de 205MPa

TEMPERATURA	MÁQUINA 1	MÁQUINA 2	MÁQUINA 3
813 K	$2,9258 \cdot 10^{-9}$	$2,2025 \cdot 10^{-9}$	$3,71 \cdot 10^{-9}$
853 K	$5,7109 \cdot 10^{-6}$	$2,8571 \cdot 10^{-6}$	$1,90 \cdot 10^{-6}$

**Tabla 3:** Velocidad de deformación de los ensayos a una temperatura de 813 K

TENSIÓN	MÁQUINA 1	MÁQUINA 2	MÁQUINA 3
168 MPa	$2,5465 \cdot 10^{-9}$	$4,2667 \cdot 10^{-10}$	$6,8681 \cdot 10^{-10}$
205 MPa	$2,9258 \cdot 10^{-9}$	$2,2025 \cdot 10^{-9}$	$3,7147 \cdot 10^{-9}$

El tiempo de rotura del material en cada ensayo se produjo prácticamente en forma simultánea en los tres equipos y se determinó que el material rompe a un valor de deformación muy similar en todos los casos. En la Tabla 4 se indican los valores de deformación a la rotura cuando el material fue ensayado a una temperatura de 813K y una tensión de 205 MPa, se observa que el material se fractura a aproximadamente a una deformación del 3 %. Este valor coincide con la indicada por la bibliografía, como la deformación que experimenta un material cuando se fractura por creep.[3]

**Tabla 4:** Deformación en el instante de rotura de los ensayos realizados a 813 K y 205 MPa.

MAQUINA 1	MAQUINA 2	MAQUINA 3
0.0306	0.0314	0.0308

## 5. CONCLUSIONES

El equipo propuesto presenta un diseño muy simple que permite realizar mediciones a tensión constante. Se presenta un original sistema de control electrónico que consiente en forma sencilla y económica variar las condiciones del ensayo, trabajando con los tres equipos en forma simultánea y en distintas condiciones de tensión y temperatura.

A partir de los ensayos realizados en forma simultánea en un mismo material se determinó la concordancia de los resultados obtenidos.

En todos los casos el material se fracturó con una deformación del 3 %.

El modelo propuesto permite el desarrollo de una tecnología propia que no solo evita la erogación de dinero que representa adquirir un equipo de una marca comercial, sino que presenta numerosas ventajas respecto a las sugeridas por la bibliografía.

## 6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Tecnológica Nacional y a la Fundación Hnos. Agustín y Enrique Rocca quienes han financiado el presente trabajo de investigación.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] WISHWANATHAN R., PATERSON S., GRUNLOH H., *et al.*, “Life Assessment of Superheater Reheater Tubes in Fossil Boilers”, *Journal Pressure Vessel Technol*, v. 116, pp. 85 – 96, 1994.
- [2] EVANS R. W., WILSHIRE B., *Introduction to Creep*, 1º Ed., The Institute of Metals, London. 1993.
- [3] ASM, *Metals Handbook*, 9 ed., 8: Metals Park, Ohio, Mechanical Testing, 2001.
- [4] FIGLIOLA – BEASLEY, *Mediciones Mecánicas*, Ed. Alfa Omega, Mejico. 2003.
- [5] ASTM, Specifications *E8, E21 and E-139*, ASTM Internacional, West Conshohocken, PA, USA, 1994.
- [6] CHANDRUPATLA T., BELENGUNDU A., *Introducción al método de los elementos finitos.*, Ed. Prentice Hall, 1998.