

Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas  
Facultad de Ingeniería Mecánica



Trabajo de Diploma en opción del título  
de Ingeniería Mecánica

Titulo: Análisis de la micro y macrodeformación en probetas  
de acero 1.25Cr 0.5Mo sometidas a fluencia lenta

Autor: Ernesto Cruz Cárdenas.  
Tutor: Dr. Rafael Fernández Fuentes.

Santa Clara 2014

## **Dedicatoria**

A mis padres, que han deseado este momento tanto como yo, que me han acompañado en el camino de la vida de forma incondicional, como solo ellos saben hacerlo.

A mi hermana por brindarme su apoyo incondicionalmente siempre.

A mis sobrinos Marcos Adrián y Brián Misael para que la misma le sirva de ejemplo y motivación para su vida futura.

A mi abuelo güije

A toda mi familia, por confiar y creer siempre en mí.

A mi novia por darme su amor y su apoyo en momentos difíciles.

A mis amigos: Luis Miquel, Ramón, Ariel, Javiel, William, Jorgito, Carlos Alberto, Carlos Peña, Supervia, Alejandro y los demás que siempre han estado en las buenas y las malas.

A mis primos Ramón y Félix Antonio.

## **Agradecimientos**

A mis padres, que sin ellos este sueño no se hubiese podido hacer realidad.

A mi hermana y mi cuñado por apoyarme siempre en todo.

A mi novia por prestarme su laptop y darme fuerzas cuando creía que no podía.

A mis tías y tíos en especial a Rosita y María Elena.

A mi abuelo güije y mis demás abuelos.

A todos mis amigos.

A mi tutor Rafael Fernández.

A Gustavo, Alexander y otros que ayudaron en la misma.

Y finalmente a todo el que pensó que yo no podía, al final, salió.

## **Resumen**

Se presenta un análisis del comportamiento de la deformación plástica a nivel macro y microestructural en acero 1.25Cr 0.5Mo expuesto a condiciones de trabajo de 480 °C por 20 años y sometido a tratamiento térmico (700 °C, 1.5h). Se aplican ensayos de fluencia lenta con una matriz que comprende temperaturas entre 525 y 600 °C y tensiones entre 100 y 175 MPa. Para evaluar la macrodeformación se analizan las curvas de fluencia lenta; mientras que la microdeformación se estudia sobre la base del grado de deformación microestructural. La reducción del área para el material envejecido en servicio fue entre 71 y 88%; la cual se reduce a 82 y 91% por efecto del tratamiento térmico. Mientras que para el alargamiento los rangos fueron de 19 y 57% y 46 y 61% respectivamente. Se verifica un comportamiento lineal entre el alargamiento y la temperatura; así como entre el grado de orientación microestructural y los parámetros de ductilidad.

## **Summary**

It is presented an analysis of the behavior of the plastic level deformation macro and microstructural in steel 1.25Cr 0.5Mo exposed to working conditions of 480 °C for 20 years and submitted to heat treatment ( 700 °C, 1.5h ). The essays of creep with a womb that comprises temperatures between 525 and 600 °C and tensions between 100 and 175 MPa are applicable themselves. In order to evaluate the macrodeformation they analyze the curves of creep; while the microdeformation is studied on the basis of the degree of deformation microstructural itself. The reduction of the area for the aged material in use was between 71 and 88 %; which shortens 82 and 91 % for the effect of heat treatment itself. While for the lengthening the status belonged to 19 and 57 % and 46 and 61 % respectively. A linear behavior between the lengthening and the temperature is verified; and also between the degree of orientation microstructural and the parameters of ductility.

# Índice

## **Contenido**

Introducción.....	1
Capítulo I: Revisión de la literatura.....	3
1.1 Definición de fluencia lenta .....	3
1.2. Componentes fundamentales de la fluencia lenta .....	4
1.3 Curva deformación vs tiempo .....	5
1.4 Etapa de fluencia lenta primaria .....	6
1.5 Etapa de fluencia lenta secundaria.....	7
1.6 Etapa de fluencia lenta terciaria.....	8
1.7 Propiedades de los metales bajo la fluencia lenta.....	8
1.8 Predicción de la resistencia a fluencia lenta.....	9
Capitulo II: MATERIALES Y MÉTODOS .....	14
2.1 Material .....	14
2.2 Secuencia Experimental .....	14
Capitulo III :Resultados y discusión.....	17
3.1 Evaluación de la macrodeformación por fluencia lenta.....	17
3.1.1 Análisis de las curvas de fluencia lenta.....	17
3.1.2 Análisis del comportamiento de la ductilidad en el ensayo de fluencia lenta .....	20
3.2 Análisis de la microdeformación por fluencia lenta .....	24
3.3 Relación entre macro y microdeformación por fluencia lenta .....	26
Conclusiones.....	28
Recomendaciones.....	29
Bibliografía .....	30
Anexo 1 .....	32
Anexo 2 .....	33
Anexo 3 .....	56
Anexo 4 .....	59
Anexo 5 .....	60

## **Introducción**

La evaluación de la deformación y la rotura por fluencia lenta se basa en el desarrollo de los ensayos en muestras que se someten a condiciones de tracción a carga o tensión constante en diferentes temperaturas. En la mayoría de los casos las muestras se conforman de una microestructura homogénea con dimensiones establecidas por normas [1]. Sobre la base de los referidos ensayos es posible determinar un conjunto de parámetros que caracterizan el comportamiento del material en condiciones de fluencia lenta (velocidad de deformación, tiempo de rotura, etc.) y permite estimar o predecir la vida útil o residual [2].

En determinadas circunstancias, sin embargo, se requiere evaluar el comportamiento en condiciones de fluencia lenta en secciones de material heterogéneo con relación a la microestructura; tal es el caso de las uniones soldadas sometidas o no a tratamiento térmico posterior. En este caso el componente (por ejemplo una tubería de conducto de vapor de agua) existe una región del material base no afectada, una afectada por el ciclo térmico del tratamiento térmico posterior a la soldadura [3].

El empleo de muestras que incluyan la unión soldada hace muy compleja la interpretación de los resultados por el nivel de heterogeneidad microestructural que se establece en las mismas. Por tal motivo se ha recomendado el estudio de las diferentes regiones por separado [4].

Dentro del análisis de los resultados del ensayo de fluencia se acostumbra a evaluar el comportamiento en la deformación plástica con el tiempo, mediante el ajuste de los resultados a diferentes modelos recomendados en la literatura que incluyen un enfoque macroscópico del fenómeno [5].

Otra tendencia, aunque menos recurrente, busca asociar la deformación plástica macroscópica con el comportamiento de la misma expresado a nivel microscópico, mediante la evaluación del grado de deformación de los granos que conforman las diferentes constituyentes microestructurales presente en el material [5]. Esta

tendencia puede convertirse en una importante herramienta para el seguimiento y pronóstico del comportamiento del material a fluencia lenta, derivado de las rutinas del mantenimiento predictivo.

**Problema:**

Con fines de argumentar soluciones propias del manteniendo industrial de componentes sometidos a fluencia lenta se requiere estudios que brinden información que relacione el comportamiento macro y microestructural del material expuesto a referido fenómeno.

**Hipótesis:**

El comportamiento de la deformación plástica a nivel macroscópico y microscópico puede ser definido por modelos estadísticos que reflejan la relación entre las variables que definen dicho comportamiento.

**Objetivo principal:**

Asociar el comportamiento de la micro y macro estructura en materiales sometidos a fluencia lenta por la condiciones de servicio.

**Objetivos específicos:**

- Analizar las curvas de fluencia de aceros 1.25Cr 0.5Mo obtenidas para cada muestra.
- Evaluar el comportamiento de la ductilidad del acero 1.25Cr 0.5Mo mediante los resultados de los ensayos.
- Establecer el grado de orientación microestructural resultante de la fluencia lenta en aceros 1.25Cr 0.5Mo con y sin tratamiento térmico.
- Correlacionar la macro y microdeformación resultante de la fluencia lenta en aceros 1.25Cr 0.5Mo con tratamiento térmico posterior y sin él.

**Tarea:**

- Análisis de la literatura sobre fluencia lenta.
- Interpretar y caracterizarlas curvas de fluencia lenta de aceros 1.25Cr 0.5Mo.
- Determinar el grado de orientación microestructural al acero 1.25Cr 0.5Mo expuesto a fluencia lenta.

# **Capítulo I: Revisión de la literatura**

## **1.1 Definición de fluencia lenta**

En muchas aplicaciones los componentes industriales se ven sometidos a cargas constantes, e incluso variables, durante tiempos prolongados bajo la acción de la temperatura, como por ejemplo álabes de rotor de turbina, calderas y tuberías de vapor, etc. En tales circunstancias el material puede deformarse hasta que su utilidad se ve seriamente perjudicada. Estas deformaciones dependientes del tiempo pueden ser casi imperceptibles, pero crecen durante toda la vida útil de la pieza y llevan a la rotura, aún sin que la carga haya aumentado.

Con cargas aplicadas por corto tiempo, como en un ensayo de tracción estático, hay una deformación inicial que aumenta simultáneamente con la carga. Si, bajo cualquier circunstancia, la deformación continúa mientras la carga se mantiene constante bajo la acción de la temperatura, a esta deformación adicional se la conoce como fluencia lenta [6], la cual se caracteriza precisamente porque evoluciona con el tiempo a tensión constante una vez aplicada la carga.

En materiales metálicos y cerámicos la deformación por fluencia lenta es significativa a partir de temperaturas en el rango de un 30 a 60 % de la temperatura de fusión del material. De manera que mientras los metales en general no sufrirán efectos de fluencia lenta a temperatura ambiente, muchos vidrios y polímeros lo harán. La adecuada selección de materiales para servicio a alta temperatura es un factor esencial en el diseño resistente a la fluencia lenta. En general, las aleaciones metálicas empleadas contienen elementos tales como Mo, Cr, Ni, y Co en distintas proporciones según las características específicas buscadas [7].

## 1.2. Componentes fundamentales de la fluencia lenta

La figura 1 representa una curva convencional de fluencia lenta, la misma se obtiene aplicando una tensión o carga constante a la pieza y midiendo las deformaciones que se van produciendo con el tiempo, manteniendo la temperatura constante.

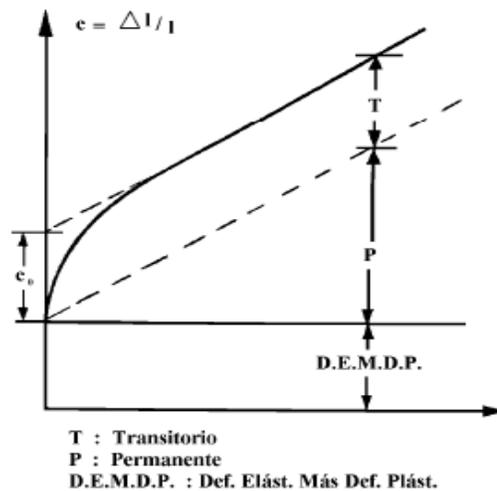


Figura 1.1 curva de deformación de fluencia lenta (a tensión y temperatura constante) vs tiempo.

Las deformaciones representadas por las ordenadas pueden asociarse a tres tipos distintos de mecanismos, que pueden visualizarse dividiendo la deformación en las tres partes indicadas en la figura 1. La primera parte es la deformación elástica (más la deformación plástica si la tensión es suficientemente alta) y ocurre casi instantáneamente, bajo la acción de la tensión aplicada: es la deformación ordinaria dada por el diagrama de tensión-deformación. Si la expansión térmica que la temperatura produce es significativa, puede ser incluida en este componente. La segunda es la componente transitoria cuya característica principal es que tiene velocidad decreciente. La deformación es rápida al comienzo pero

gradualmente se hace más lenta a medida que se aproxima a un valor fijo determinado. La tercera es la componente permanente que aumenta continuamente, a tasa constante bajo tensión constante. Por tratarse de un movimiento similar al flujo viscoso, se lo conoce a veces como fluencia lenta viscosa.

### 1.3 Curva deformación vs tiempo

En la ilustración de la figura 2 en particular se aprecia que la deformación instantánea se ha omitido, para que la deformación mostrada sea enteramente la que resulta de la fluencia lenta.

Durante la etapa I o de fluencia lenta primaria, la velocidad de deformación  $d\varepsilon/dt$  disminuye progresivamente hasta alcanzar un valor constante que marca el comienzo de la etapa II de fluencia lenta secundaria también llamada de fluencia lenta estacionaria donde la deformación continúa aumentando a una velocidad de deformación más o menos constante. Finalizada esta etapa se observa un aumento de la velocidad de deformación que conduce a fenómenos de estricción y rotura (etapa III) o fluencia terciaria. [2]

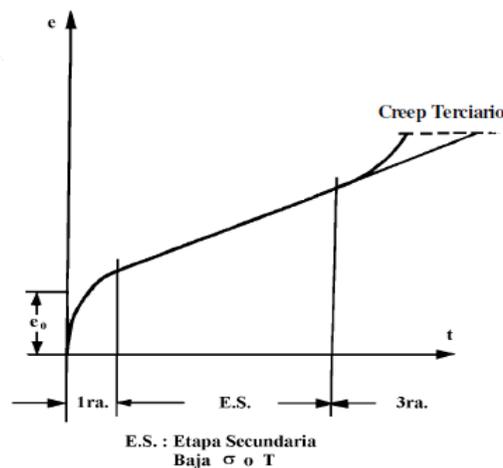


Figura 1.2 Etapas de deformación de la fluencia lenta.

No siempre aparecen las tres etapas. Si la fractura es frágil, la tercera etapa puede desaparecer completamente. La segunda etapa se hace cada vez menos importante a medida que la tensión o la temperatura aumentan. Si la tensión o temperatura son lo suficientemente bajas, la segunda etapa se transforma en horizontal y se extiende indefinidamente.

Como en otros procesos térmicos, la teoría básica de la fluencia lenta se construye alrededor de la ecuación de Arrhenius

$$\Phi = Ae^{-Ea/kT} \quad (1.1)$$

Dado que la fluencia lenta no es un proceso termodinámico simple, esta ecuación no puede aplicarse sin modificaciones. Si consideramos  $\Phi$  como la tasa de fluencia lenta,  $\varepsilon_{cr}$  es posible que las "constantes" A y Ea varíen con la temperatura y tensión, así como también con otros factores. Numerosas expresiones se han propuesto para Ea, y A, pero ninguna se ha verificado completamente.

#### 1.4 Etapa de fluencia lenta primaria

En esta etapa, la velocidad de deformación disminuye desde un valor grande hasta un valor constante. Esta disminución es ocasionada principalmente por un aumento en la energía de activación requerida, Ea (o una disminución en los mecanismos atómicos que pueden activarse). Para una dada tensión, la variación de la velocidad de deformación con el tiempo puede ser expresada por:

$$\varepsilon_{cr} = C_1 t^{-n} \quad (1.2)$$

donde C1 es una constante y n puede valer entre 0 y 1. Para  $n = 2/3$ , esta expresión puede integrarse para obtener la deformación, que estará dada por:

$$\varepsilon_{cr} = C_2 t^{1/3} \quad (1.3)$$

que es la ley de Andrade para la fluencia lenta transitoria. Para  $n = 0$  se llega al caso límite de fluencia lenta. Timoshenko dedujo una expresión empírica diferente:

$$\varepsilon_{cr} = C_3 e^{at} \quad (1.4)$$

donde  $C_3$  y  $a$  son constantes. De esta ecuación, la deformación por fluencia lenta resulta:

$$\varepsilon_{cr} = C_4(1 - e^{at}) \quad (1.5)$$

(Para la condición inicial  $\varepsilon_{cr} = 0$  para  $t = 0$ )

De hecho, se sabe relativamente poco sobre la fluencia lenta transitoria. No se ha estudiado tan extensivamente como la fluencia lenta viscosa porque no es ordinariamente un factor crítico en el diseño. Un problema en que la fluencia lenta transitoria es de importancia considerable es la relajación de tensiones.

### 1.5 Etapa de fluencia lenta secundaria

Al final de la primera etapa la fluencia lenta transitoria es prácticamente nula, y el remanente es casi enteramente viscoso. En este caso, la ecuación para la segunda etapa responde a:

$$\varepsilon_{cr} = e_0 + v_0 * t \quad (1.6)$$

donde  $e_0$  es la intercepción marcada en las Figuras 1 y 2, y  $v_0$  es la velocidad de deformación. De la curva puede deducirse que se trata de la velocidad mínima de fluencia lenta (tmc) (\*). Se expresa en cm/cm/h, o más comúnmente en  $h^{-1}$ .

(\*)La tasa mínima de fluencia lenta aumenta con el incremento de la tensión. Esta variación se expresa comúnmente por:

$$v_0 = B * \sigma^n \quad (1.7)$$

donde  $n$  (que es mayor que 1) y  $B$  son constantes. La tensión aplicada es  $\sigma$ .

### 1.6 Etapa de fluencia lenta terciaria

Se trata del incremento de la velocidad de deformación que precede a la fractura. Hay dos razones para este incremento: (i) si el ensayo tiene lugar bajo carga constante, la disminución de la sección transversal provoca el aumento de la tensión verdadera, lo cual a su vez incrementa la velocidad de fluencia lenta (ver ecuación 1.7). Este incremento pasa a menudo desapercibido hasta que se forma un cuello; a partir de este instante la velocidad de fluencia lenta aumenta rápidamente produciendo la fluencia lenta terciaria. Este tipo de fluencia lenta terciaria puede ser prevenido completamente manteniendo la tensión constante (en vez de la carga); en principio esto puede hacerse disminuyendo la carga en proporción directa a la reducción de área. En tal caso seguiría la fluencia lenta secundaria hasta la fractura, como se señala en la curva de la figura 2. (ii) La otra causa de fluencia lenta terciaria es la acción térmica ya mencionada.

\* No hay expresiones para la fluencia lenta terciaria.

### 1.7 Propiedades de los metales bajo la fluencia lenta

Las dos propiedades más importantes son:

**a) Resistencia a la fluencia lenta:** la tensión que un material puede soportar durante un período especificado de tiempo sin deformación excesiva, también se le denomina "límite de fluencia lenta".

**b) Resistencia a la rotura por fluencia lenta:** la tensión que un material puede soportar durante un período especificado de tiempo sin romper, también se le llama "resistencia a la rotura".

Como estas propiedades varían con la temperatura, la misma debe especificarse y mantenerse constante. Por ejemplo: la resistencia a la fluencia lenta requerida por un álabe de turbina de vapor puede ser aquella tensión que produzca 0.20% de deformación en 100.000 hs. a 800°C. La tensión mencionada en la precedente

definición es generalmente la tensión inicial. Si está involucrada una carga constante, en tracción, la tensión final verdadera será un poco mayor que la tensión inicial.

El tiempo es de mayor interés en la determinación de la resistencia de la fluencia lenta o a la rotura por fluencia lenta en la vida de servicio, medida en miles de horas (a veces también en años). La deformación permitida es la deformación total, es decir, la instantánea más la deformación por fluencia lenta (se mide en por ciento). El monto de la deformación permisible depende de la aplicación. Así, para una turbina de reacción sólo una muy pequeña deformación se permite debido a las estrechas tolerancias involucradas, algo así como 0.01% en 2000 hs. En cambio, hasta 2% puede aceptarse en un recipiente a presión.

### 1.8 Predicción de la resistencia a fluencia lenta

La Resistencia a la fluencia lenta es determinada experimentalmente en varias formas. Uno de los procedimientos más simples consiste en ensayar simultáneamente varias probetas a la temperatura de servicio esperada, pero cada una bajo una tensión diferente. Se mide el tiempo requerido para producir la deformación permisible en cada probeta, y se traza una curva de tensión vs. tiempo, tal como la mostrada en la figura 3.

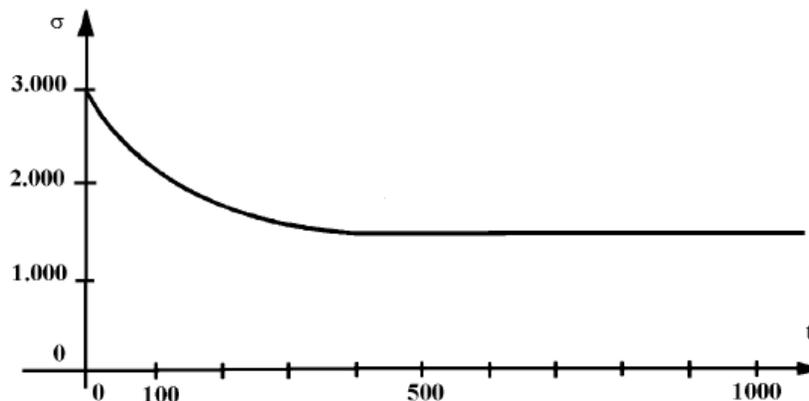


Figura 3. Curva de tensión vs tiempo, tiempo requerido para la deformación permisible.

Estos tipos de ensayos se limitan usualmente a 1.000 hs. (ocasionalmente son llevados a 10.000 hs). De los resultados alcanzados, puede tabularse las resistencias a la fluencia lenta, sobre la base de una cantidad especificada de deformación por fluencia lenta para diversas temperaturas [8].

Cuando los tiempos o los datos disponibles de las pruebas se limitan a 1000 horas, las propiedades de la fluencia lenta usadas en el diseño para tiempos más largos deben basarse en la extrapolación. Lo obvio sería extender la curva de la figura 1 al tiempo requerido. Puesto que es más fácil extender una curva si es recta, un intento es hacer el dibujo de los datos semejante a una recta o aproximadamente. Para obtener este tipo de datos, se encuentra frecuentemente que los puntos caen cerca de líneas rectas cuando las curvas son dibujadas en gráficos logarítmicos de Tensión (s) vs. Tiempo (t). Puede verse en la figura 4 que la linealidad es solo aproximada, y por lo tanto deben limitarse a tiempos cortos.

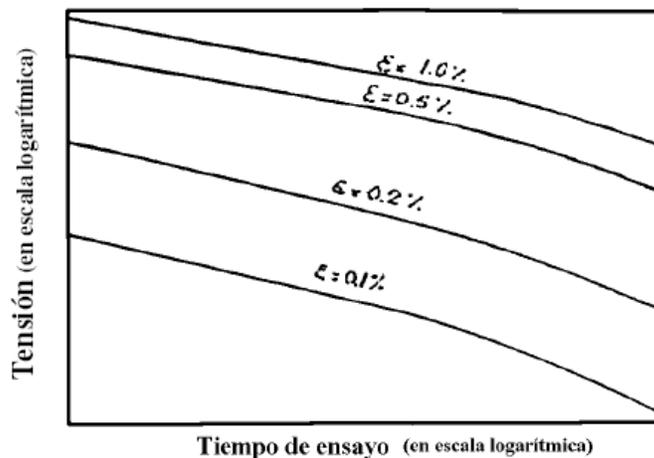


Figura 4 Gráfico logarítmico de tensión (s) vs. tiempo (t).

Debe aclararse que el uso de una escala logarítmica de tiempos en gráficos del tipo de la figura 4 puede inducir errores. La extrapolación más allá del tiempo de ensayo pareciera ser una extrapolación pequeña, pero por el contrario, realmente

extiende el tiempo en *diez veces el tiempo más largo*. Los efectos de la acción térmica y cambios estructurales en el material pueden inducir errores desastrosos en extrapolaciones. Otro método que tiene alguna fundamentación teórica, está basado en la velocidad de fluencia lenta y en la ecuación:

$$\varepsilon_{cr} = \varepsilon_0 + V_0 * t \quad (1.8)$$

Si se asume que la ecuación (1.8) se cumple, la deformación permitida,  $\varepsilon_1$ , y la vida en servicio,  $t_1$ , pueden ser combinadas para dar una velocidad de fluencia lenta mínima aceptable, [6]

$$V_0 = \varepsilon_1 / t_1 \quad (1.9)$$

El parámetro usualmente empleado para caracterizar la resistencia a la fluencia lenta de materiales metálicos en ensayos de corta duración (1000 hs o menos) es el **tiempo a ruptura  $t_r$** , para una dada tensión ingenieril y temperatura.

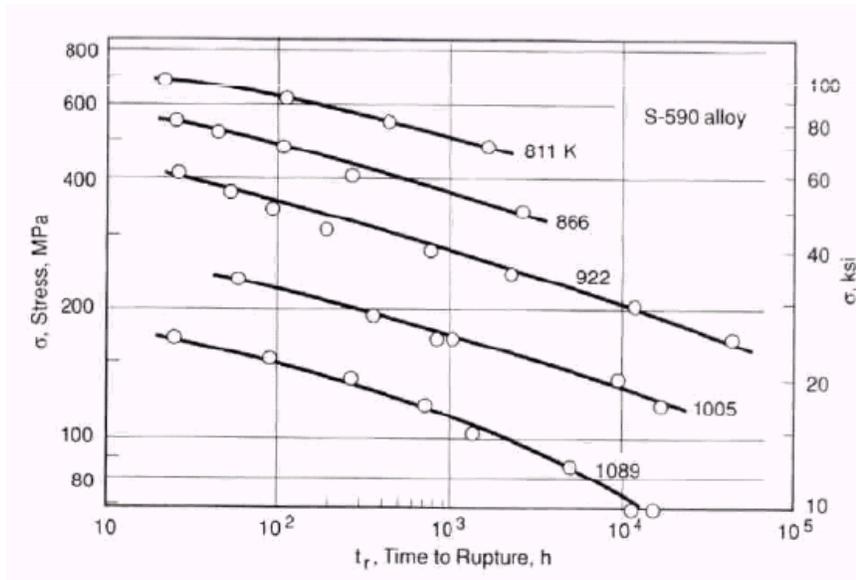


Figura 5 Grafico tensión vs tiempo de ruptura ( $t_r$ ).

En un ensayo de tensión verdadera constante la etapa III difiere notablemente respecto de un ensayo a carga constante, pudiendo prolongarse hasta unas 2000-

10000 hs, o más. En estos ensayos el parámetro más importante es la velocidad de deformación estacionaria mínima  $d_{\epsilon^s}/d_t$  [9].

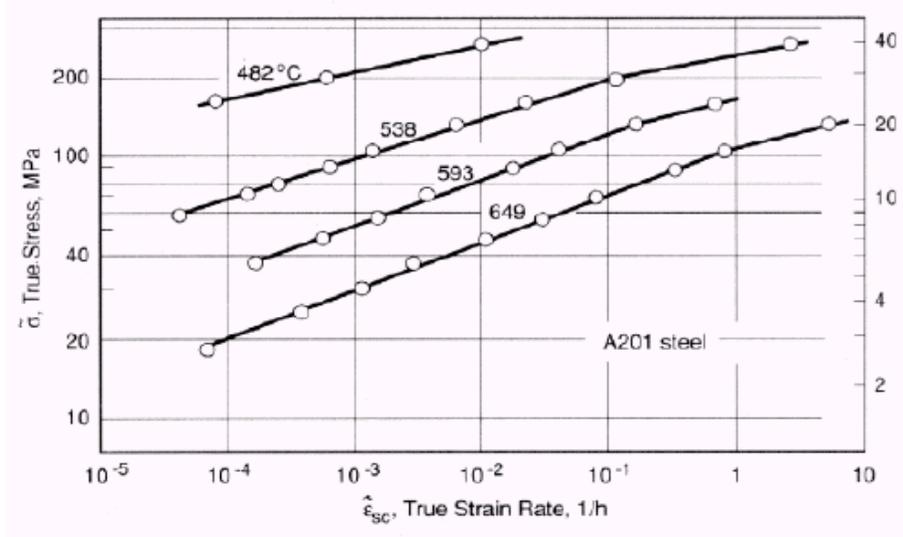


Figura 6. Grafica de velocidad de deformación estacionaria mínima  $d_{\epsilon^s}/d_t$ .

Dado que los ensayos de corta y larga duración son esencialmente similares aunque difieran en el rango de tensiones y de temperaturas, es razonable esperar que exista algún tipo de relación que permita vincular los resultados de ambos tipos de ensayos. Por ejemplo, Monkman y Grant [10] identificaron la siguiente relación empírica entre el tiempo de ruptura ( $t_r$ ) medido en un ensayo de corta duración, y la velocidad de fluencia lenta estacionaria  $d\epsilon/dt$  medida en un ensayo de larga duración

$$\log t_r + m \log \dot{\epsilon}_s = B \quad (1.10)$$

Donde  $m$  y  $B$  son constantes que dependen del material. Se ha determinado que para diversas aleaciones de aluminio, cobre, titanio, base níquel y base hierro, es  $0.77 < m < 0.93$  y  $0.48 < B < 1.3$ .

Se han desarrollado un número de otras relaciones para vincular la deformación en la fluencia lenta primaria con el tiempo bajo carga y temperatura. Por ejemplo, definiendo al Temperatura Homóloga  $T^h$  como el cociente  $T/T^f$ , resulta que para  $0.05 < T^h < 0.3$  y para pequeñas deformaciones, muchos materiales exhiben un comportamiento de fluencia lenta logarítmica [11].

$$\varepsilon \propto \ln t \quad (1.11)$$

En el rango  $0.2 < T^h < 0.7$  se ha empleado la relación

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \beta t^m \quad (1.12)$$

Donde  $\varepsilon_0$  es la deformación instantánea que acompaña a la carga y  $\beta$ ,  $m$  constante del material. La ecuación (1.12) describe los que se denominan fluencia lenta parabólica. Dado que durante la fluencia lenta primaria es  $0 < m < 1$ , tanto la ecuación (1.11) como la ecuación (1.12) reflejan una velocidad decreciente de deformación con el tiempo. De la ecuación (1.12) surge inmediatamente por derivación

$$\dot{\varepsilon} \propto t^{-n} \quad (1.13)$$

Donde  $-n = m - 1$ , o bien  $m = 1 - n$

Se ha establecido que en general  $n$  disminuye con el aumento de la tensión y de la temperatura. Es así como a bajas temperaturas homologas cuando  $n = 1$ , la ecuación (1.13) describe la fluencia lenta logarítmica. A mayores temperaturas, en el régimen de fluencia lenta parabólica, es  $m = 1 - n$ .

Para proveer la transición de la etapa I a la II, se adiciona otro término que tiene en cuenta la contribución de la fluencia lenta estacionaria a la deformación total.

[7]

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \beta t^m + \varepsilon_s t \quad (1.14)$$

## Capítulo II: MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Material

Se usaron secciones (de 150 mm de longitud) retiradas de una tubería de la línea de salida de una caldera de vapor. Esta línea de vapor estuvo en funcionamiento durante aproximadamente 20 años a la temperatura de 480 °C. La composición química del material de la tubería (con 300 mm de diámetro y 12 mm espesor de pared) se corresponde a la del acero 1,25Cr0.5 Mo clasificado como SA335 Grado P11, según la norma ASTM A387-79b. [12]

### 2.2 Secuencia Experimental

Las secciones de la referida tubería fueron sometidas a tratamiento térmico, de manera similar al procedimiento de reparación por soldadura realizada en condiciones industriales. Así, quedaron establecidas dos condiciones de ensayo:

- Material Envejecido en Servicio (**MES**). Se refiere al material directamente retirado de la tubería.

- Material Envejecido en Servicio y Tratado Térmicamente (**MESTT**). Se refiere a la región afectada solamente por el tratamiento térmico posterior a la soldadura.

El tratamiento térmico posterior a la soldadura se realizó en el horno mufla marca EDG FI-IS/5P, con velocidad de calentamiento de 200 °C /h y duración de 1.5 h a 700 °C.

En los ensayos de fluencia lenta (con carga constante), se emplearon máquinas del tipo STM (modelo MF-1000), las cuales permiten la ejecución de los ensayos de acuerdo con la norma ASTM E-139. [13]

La matriz de ensayos (conjunto de pares de valores de temperatura y tensión nominal) fue seleccionada de manera que garantizara tiempos de ruptura entre 10 y 10.000 h; con valores mínimos de la tensión nominal y de la temperatura próximos a los de servicio (480 °C y 94 MPa). Se usaron probetas cilíndricas con diámetro de 6 mm y longitud útil de 36 mm.

Tabla 1. Condiciones de tensión ( $\sigma$ ) y temperatura (T) aplicadas en el ensayo de fluencia lenta en las diferentes muestras.

Condición del material	Muestra	$\sigma$ (MPa)	T (°C)
MES	N-3	150	575
	N-4	125	600
	N-6	125	550
	N-8	100	600
	N-9	150	600
	0	125	575
	S-2	100	575
	S-3	150	550
	S-9	100	550
MESTT	1	100	625
	2	125	600
	4	175	575
	5	100	610
	6	150	575
	7	125	575

Para la preparación de la superficie de las probetas, para la toma de las imágenes, se realizó un desbaste con papel esmeril de diferentes numeraciones (240, 500, 600 y 800) luego se pasó al posterior pulido con un paño de fieltro y pasta abrasiva de óxido de cromo, de acuerdo con las recomendaciones de la norma ASTM E3-01. [14]

Para la Microscopía Óptica (MO) fue utilizado un microscopio marca Neo Phot 32 con sistema de la microfotografía digital. Las muestras para el análisis a

través de MO se prepararon usando la técnica convencional. Para el ataque químico aplicó inmersión en una solución de NITAL 1%.

Después de haber realizado el ensayo, a las probetas se le tomaron 10 imágenes a cada una en el extremo estrecho o cuello figura 1.1 del anexo 1, luego se hizo un análisis en el programa ImagenJ que consistía en realiza un mallado elaborando cuadros de 25800 píxeles cuadrados, con el mismo se logran tres líneas horizontales y cuatro verticales, como se muestra en la figura 1.2 del anexo 1, con el objetivo de medir la cantidad de granos por píxeles lineales [15].

Una vez realizado el conteo se tomó la fórmula:

$$\Omega = \frac{N_{\perp} - N_{\parallel}}{N_{\perp} + 0.273N_{\parallel}} \quad (2.1)$$

Tomando  $\Omega$  como el grado de orientación,  $N_{\perp}$  como la cantidad de granos que inciden en las tres líneas horizontales y  $N_{\parallel}$  como la cantidad de granos que inciden en las cuatro líneas verticales quedando como  $\text{granos} / \text{píxeles}$ .

## Capítulo III :Resultados y discusión

### 3.1 Evaluación de la macrodeformación por fluencia lenta

#### 3.1.1 Análisis de las curvas de fluencia lenta

Las curvas de fluencia lenta se muestran en el Anexo 2; según las mismas en todas las condiciones de tensión y temperatura de ensayo para las dos condiciones del material analizadas (**MES** y **MESTT**) se pueden evidenciar las tres etapas características de este fenómeno: primaria (con velocidad de deformación plástica paulatinamente decreciente), secundaria con velocidad de deformación plástica constante) y terciaria (con velocidad de deformación plástica paulatinamente creciente). La identificación de estas etapas, en cuanto al tiempo y la deformación plástica que las caracteriza, se muestra en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Identificación de las etapas que caracterizan el intervalo primario, secundario y terciario de la fluencia lenta, en cuanto al tiempo y la deformación plástica.

Etapas de fluencia lenta por muestras						
	1ra etapa		3ra etapa			
	Tiempo final (h)	Deformación (%).	Tiempo inicial (h).	Deformación (%).	Tiempo final (h)	Deformación (%).
N3	70	10.6	117	19.0	141	37.6
N4	2	2.7	34	21.2	46	46.6
N6	16	0.9	1914	22.9	1991	36.6
N8	12	0.03	108	0.2	148	0.5
N9	3	6.9	14	19.7	22	47.5
O	33	3.8	156	14.0	235	45.9
S2	22	0.6	1464	23.7	1617	46.1
S3	76	2.7	980	14.2	1123	29.2
S9	45	0.7	9602	18.5	9689	19.9
TT1	3	1.3	53	17.4	68	50.2
TT2	7	4.4	52	26.8	70	60.3
TT4	5	6.2	21	21.3	32	47.7
TT5	22	3.4	180	26.2	211	51.4
TT6	2	0.9	77	23.4	95	47.3
TT7	19	1.5	414	31.1	458	54.2

Los resultados obtenidos de los ensayos de fluencia lenta permiten considerar que en todos los casos existe un período de tiempo donde la deformación plástica ocurre con una velocidad constante, dicho período se identifica por un valor constante de la primera derivada de la deformación plástica respecto al tiempo, así como un valor igual a cero de su segunda derivada, tal como se puede apreciar en las correspondientes figuras B del Anexo 2.

Desde el punto de vista estadístico, este periodo con velocidad de deformación plástica constante se evidencia por un adecuado ajuste de regresión lineal entre la deformación plástica y el tiempo, el cual se caracteriza, en todos los casos, por un coeficiente de regresión lineal con valor entre 0.95 y 0.99, así como un valor inferior a 0.0001 de la probabilidad en el análisis de varianza para la prueba del estadígrafo F (ver tablas Anexo 2).

A partir de las curvas de fluencia lenta obtenidas se pudieron determinar los parámetros que caracterizan la resistencia a la fluencia lenta: velocidad de deformación plástica en el estadio secundario y tiempo de rotura (tabla 3.2).

Tabla 3.2 Parámetros que caracterizan la resistencia a la fluencia lenta: velocidad de deformación plástica en el estadio secundario y tiempo de rotura.

Condición del material	Muestras	Condición del ensayo		$\varepsilon_{min}$ (%/h)	$T_r$ (h)
		$\sigma$ (mpa)	T (°C)		
MES	<b>N-3</b>	150	575	0.12881	141
	<b>N-4</b>	125	600	0.54875	46
	<b>N-6</b>	125	550	0.01018	1991
	<b>N-8</b>	100	600	0.00152	148
	<b>N-9</b>	150	600	1.1256	22
	<b>0</b>	125	575	0.08382	235
	<b>S-2</b>	100	575	0.01428	1617
	<b>S-3</b>	150	550	0.01185	1123
	<b>S-9</b>	100	550	0.00164	9689
MESTT	<b>1</b>	100	625	0.30298	68
	<b>2</b>	125	600	0.47836	70
	<b>4</b>	175	575	0.85887	32
	<b>5</b>	100	610	0.13527	211
	<b>6</b>	150	575	0.28425	95
	<b>7</b>	125	575	0.06992	458

Dietter [ok 16], asegura que esta consideración sobre un intervalo de tiempo con velocidad de deformación constante es válida cuando es tratada debidamente; de acuerdo con Dietter [ok 16], la velocidad constante de deformación plástica es considerada como un valor medio de la velocidad de deformación en el intervalo de tiempo donde su variación es prácticamente imperceptible; por tanto convencionalmente, este valor medio es determinado mediante el análisis de regresión lineal simple. No obstante se debe señalar que, según Campanelli [17], este tipo de consideración debe ser tratado con prudencia, pues desde el punto de vista teórico no existen fundamentos suficientes que lo justifiquen, indicando que el mismo depende del nivel de resolución del equipo utilizado en la medición de la deformación.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo coinciden con estas consideraciones reflejadas en la literatura, por cuanto, como se puede apreciar en los gráficos que muestran el comportamiento de la primera y segunda derivadas de la deformación plástica con respecto al tiempo (Anexo 2), no existe un valor constante de las mismas en el intervalo considerado, aunque sí su variación es pequeña.

Resulta peculiar el caso de las muestras S2 y S9 de la condición MES (figuras A1.12 y A1.2 del Anexo 2, respectivamente) por la existencia de dos intervalos aparentes con velocidad de deformación plástica constante durante un tiempo notable, este tipo de comportamiento ya fue descrito por Baird y Jamieson [18] y por Klueh [19] en el acero 2.25Cr1Mo. De acuerdo con estos autores, estas curvas atípicas se caracterizan por un primer intervalo con velocidad de deformación menor en un orden de magnitud con respecto al segundo y, las mismas, pueden ocurrir en los aceros resistentes a altas temperaturas (aleados con Mo, Cr, o CrMo) en condiciones específicas de tensión y temperatura. Desde el punto de vista fenomenológico, este comportamiento ocurre como resultado de la existencia de átomos de soluto en la matriz capaces de formar nubes entorno a las cuales se generan atmosferas de dislocaciones que incrementan la resistencia a la fluencia lenta.

Sobre la base de los trabajos referenciados anteriormente se puede plantear que el material en la condición MES presentó un comportamiento de doble estadio de velocidad de deformación plástica constante, como resultado de la presencia de elementos de aleación en la matriz.

### **3.1.2 Análisis del comportamiento de la ductilidad en el ensayo de fluencia lenta**

Como indicadores del comportamiento de ductilidad, durante el ensayo de fluencia lenta, fueron considerados la reducción de área ( $A_r$ ) y el alargamiento ( $\epsilon_r$ ), cuyos valores se muestran en la tabla 3.3.

El rango de variación de la reducción del área para la condición MES del material fue entre 71 y 88 %, observándose un punto experimental fuera del comportamiento general (35,7% muestra S9); mientras que para la condición MESTT el rango de variación de la reducción del área fue entre 82 y 91 %. Un comportamiento cualitativamente similar se observó para el alargamiento; aunque en este caso el rango de variación fue más amplio para la condición MES (entre 19 y 57 %), cuando se compara con la condición MESTT (entre 46 y 61 %). Parker e Stratford [20], observaron un comportamiento similar en el acero 1.25Cr0.5Mo tratado térmicamente pos soldadura a la temperatura de 750 °C durante un tiempo de 1 h.

Tabla 3.3 Indicadores de la ductilidad: reducción de área ( $A_r$ ) y el alargamiento ( $\epsilon_r$ ).

Condición del material	Muestras	Condición del ensayo		$A_r$ (%)	$\epsilon_r$ (%)
		$\sigma$ (Mpa)	T (°C)		
<b>MES</b>	<b>N-3</b>	150	575	36.8	78.4
	<b>N-4</b>	125	600	46.7	85.2
	<b>N-6</b>	125	550	35.3	76.8
	<b>N-8</b>	100	600	56.8	85.1
	<b>N-9</b>	150	600	50.3	87.6
	<b>0</b>	125	575	46.6	79.1
	<b>S-2</b>	100	575	45.9	73.2
	<b>S-3</b>	150	550	28.2	71.4
	<b>S-9</b>	100	550	19	35.7
<b>MESTT</b>	<b>1</b>	100	625	50.2	90.8
	<b>2</b>	125	600	60.6	88.8
	<b>4</b>	175	575	45.9	87.3
	<b>5</b>	100	610	48.5	87.5
	<b>6</b>	150	575	45.7	82.3
	<b>7</b>	125	575	53.3	86.5

De acuerdo con Dietter [16], el alargamiento y la reducción del área se asocian a fenómenos diferentes; el primero es influenciado por la deformación plástica uniforme mientras que el segundo por la rotura. La deformación plástica y la rotura generalmente están interconectadas y frecuentemente muestran comportamientos similares, sin embargo, existen casos como el presente trabajo donde pueden aparecer diferencias entre ambas.

De acuerdo con este punto de vista la ductilidad puede ser analizada con enfoques diferentes para el alargamiento y la reducción del área. Siendo así, los altos valores observados para la reducción del área indican que prevaleció una rotura tipo dúctil en ambas condiciones del material, excepto en la muestra S9 de la condición MES. En el caso del alargamiento para condiciones similares de tensión y temperatura la condición MESTT presentó valores superiores en relación a la condición MES, lo cual puede estar indicando que hay una pérdida de la resistencia a la deformación plástica por efecto del tratamiento térmico.

En el caso de la reducción del área se puede observar aumento de la misma con el incremento de la temperatura (figura 3.1); sin embargo no es posible distinguir algún tipo de comportamiento evidente con la tensión (figura 3.2).

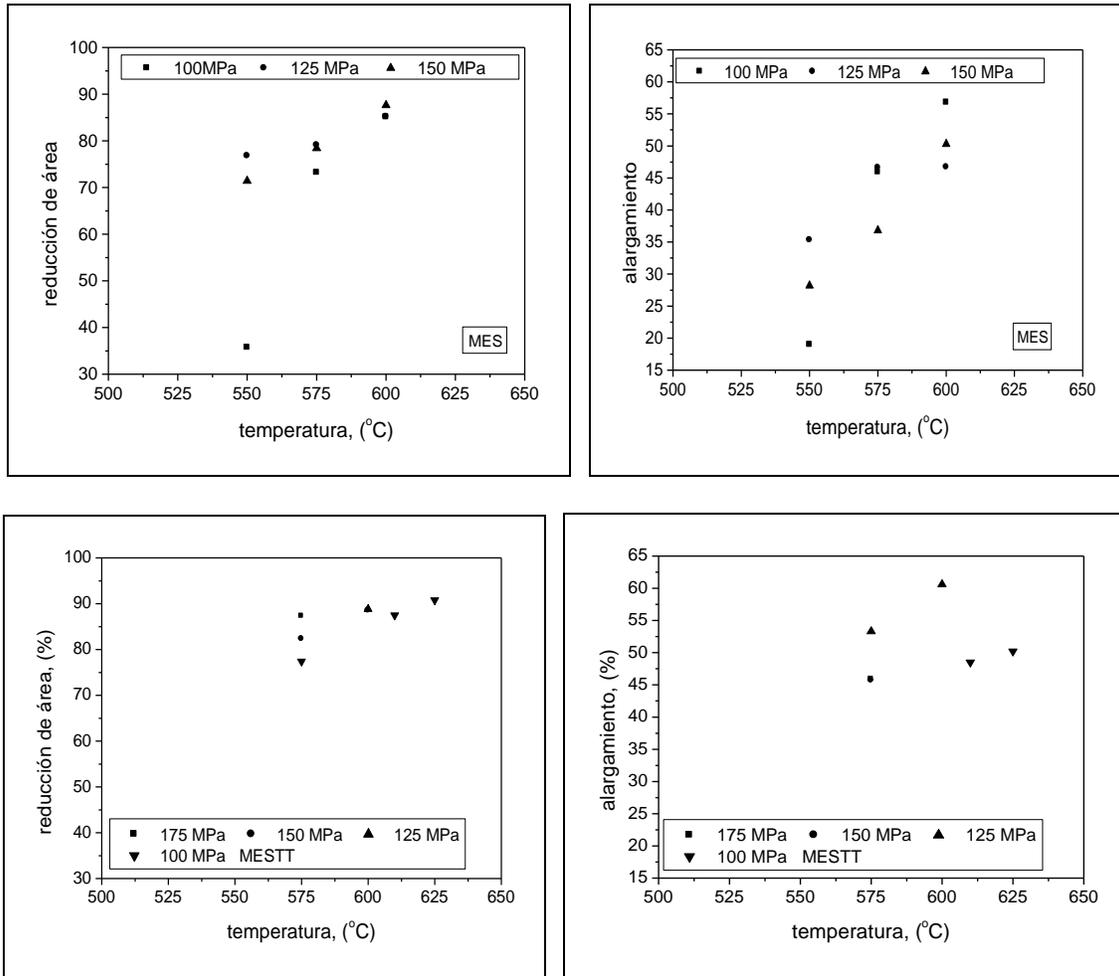


Figura 3.1 Variación de la reducción de área y el alargamiento con la temperatura para las condiciones del material **MES** y **MESTT**.

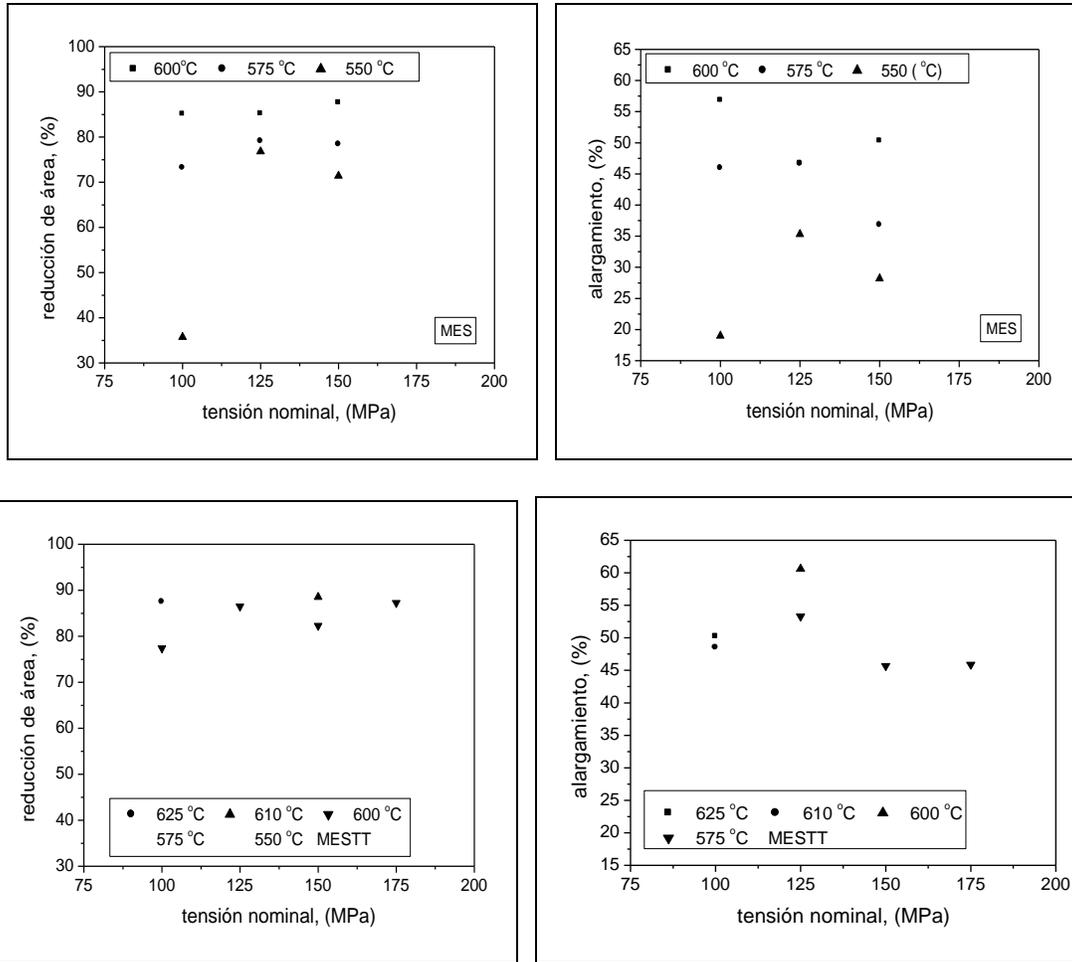


Figura 3.2 Variación de la reducción de área y el alargamiento con la tensión para las condiciones del material **MES** y **MESTT**.

Aplicando el análisis de regresión lineal simple se obtienen sendos modelos estadísticos para describir el comportamiento del alargamiento con la temperatura para cada una de las condiciones del material estudiadas (Anexo 5): **MES**, ecuación 3.1 y **MESTT**, ecuación 3.2.

$$\varepsilon_r = -233 + 0.475 \cdot T \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_r = 38 + 0.08 \cdot T \quad (3.2)$$

Donde  $\varepsilon_r$  es alargamiento y T la temperatura.

El análisis de la calidad del ajuste lineal obtenido indica que para el caso de la condición **MES**, puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05,

existe una relación estadísticamente significativa entre alargamiento y la temperatura con un nivel de confianza del 95,0%. El estadístico  $R^2$  indica que el modelo ajustado explica 75,6% de la variabilidad en el alargamiento, mientras que el coeficiente de correlación es igual a 0,869, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables.

Para el caso de la condición MESTT, puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre el alargamiento y la temperatura con un nivel de confianza del 95,0%. El estadístico  $R^2$  indica que el modelo ajustado explica 67.5% de la variabilidad en el alargamiento, mientras que el coeficiente de correlación es igual a 0,822, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables.

### **3.2 Análisis de la microdeformación por fluencia lenta**

Como exponente de la microdeformación se toma el grado de orientación de la microestructura (**G.O**), reflejado en la forma alargada que adoptan los granos en la dirección de la deformación plástica como resultado de la fluencia lenta, este parámetro también ha sido utilizado por Parker y Stratford [5] y Xin et al. [21] para el estudio del alargamiento de los granos, por efecto de la fluencia lenta y del campo magnético respectivamente. Los resultados de la determinación del grado de orientación de la microestructura se muestran en la tabla 3.4.

Tabla 3.4 Valores del grado de orientación de la microestructura (G.O), su intervalo de confianza (IC) y error relativo (Er), para las diferentes condiciones de ensayo y del material.

Condiciones del material	muestra	Condiciones de ensayo		G.O prom	IC	Er
		$\sigma$ (MPa)	T (°C)			
MES	N-3	150	575	0.45	0.06	12.8
	N-4	125	600	0.51	0.04	7.1
	N-6	125	550	0.44	0.04	9.1
	N-8	100	600	0.53	0.05	9.1
	N-9	150	600	0.56	0.04	6.8
	0	125	575	0.52	0.04	8.5
	S-2	100	575	0.54	0.04	6.9
	S-3	150	550	0.51	0.05	10.0
	S-9	100	550	0.32	0.04	12.4
MESTT	1	100	625	0.57	0.03	5.4
	2	125	600	0.49	0.05	10.1
	4	175	575	0.41	0.06	14.6
	5	100	610	0.53	0.03	6.4
	6	150	575	0.44	0.04	8.4
	7	125	575	0.57	0.02	4.0

De acuerdo con el análisis estadístico mostrado en el Anexo 3, se puede plantear que en el existen diferencias entre los valores de la media del grado de orientación (**GO**) para las distintas condiciones de ensayo en cada una de las condiciones del material (**MES** y **MESTT**, respectivamente), expresada por un valor de la probabilidad de la prueba-F menor que 0,05 en la tabla ANOVA. El análisis par a par de igualdad de medias, muestra que para la condición **MES** el 55% de los pares comparados se diferencian con un nivel de confianza estadística del 95%, mientras que para la condición **MESTT** se alcanza un 60% de pares diferentes.

### 3.3 Relación entre macro y microdeformación por fluencia lenta

Para evaluar la posible relación entre macro y microdeformación plástica para cada condición del material (**MES** y **MESTT**, respectivamente) se presentan los correspondientes gráficos "grado de deformación vs alargamiento" y "grado de deformación vs reducción de área" (figuras 3.3 y 3.4) y el análisis estadístico de regresión lineal (Anexo 4).

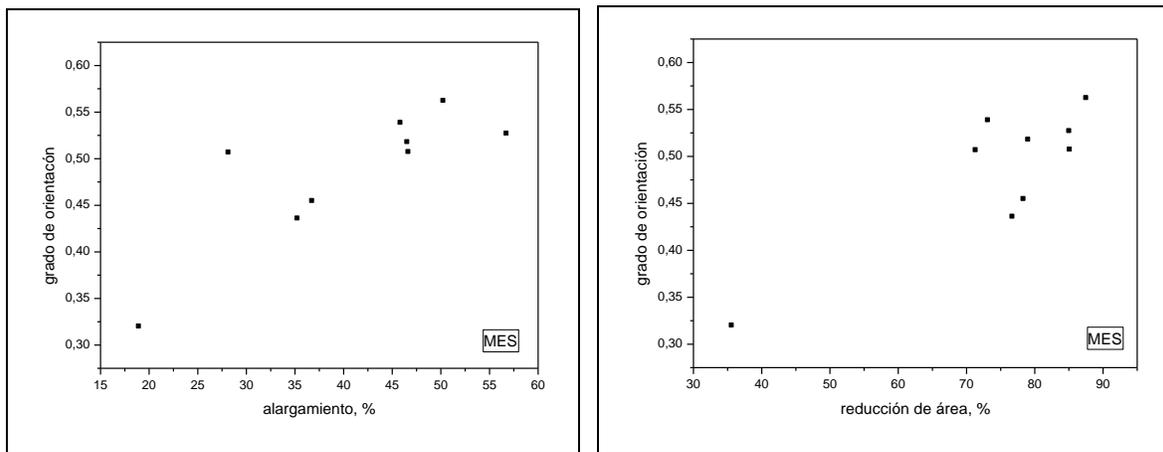


Figura 3.3 Relación entre macro y microdeformación plástica para la condición del material **MES**, representada por los correspondientes gráficos "grado de deformación vs alargamiento" y "grado de deformación vs reducción de área".

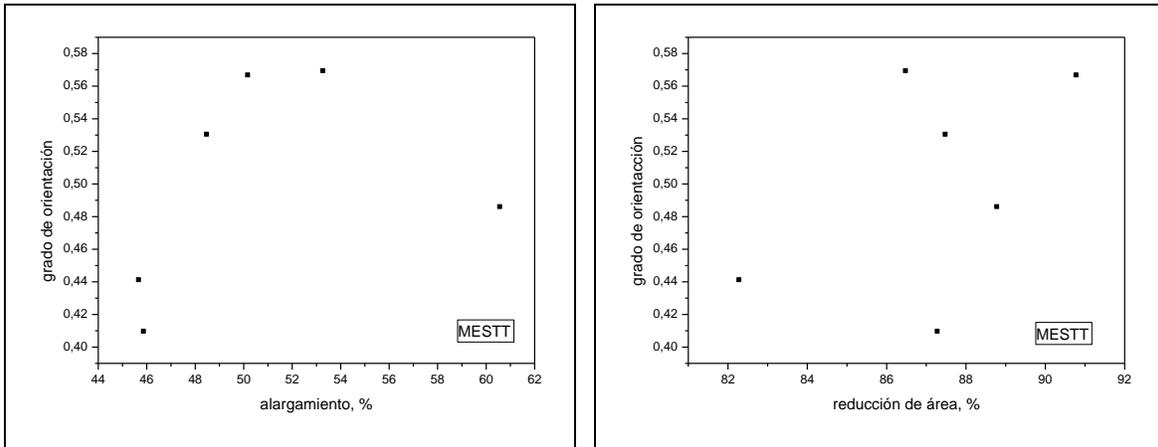


Figura 3.4 Relación entre macro y microdeformación plástica para la condición del material **MESTT**, representada por los correspondientes gráficos "grado de deformación vs alargamiento" y "grado de deformación vs reducción de área".

De la observación de los gráficos de las figura 3.3 y 3.4 se define una clara tendencia entre macro y microdeformación plástica para la condición del material **MES**, no siendo así para la condición **MESTT**. Este comportamiento queda constatado en el Anexo 4 donde se muestra para la condición del material **MES** el análisis de regresión lineal simple, que conduce a un adecuado ajuste entre los resultados del grado de orientación y el alargamiento y la reducción de área, llegando al modelo estadístico correspondiente a las ecuaciones 3.3 y 3.4.

$$GO = 0.278 + 0.005 * \epsilon_r \quad (3.3)$$

$$GO = 0.184 + 0.004 * A_r \quad (3.4)$$

Donde GO es el grado de orientación de los granos y  $A_r$  es la reducción de área. En ambos casos, puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 95,0%. El estadístico  $R^2$  indica que el modelo ajustado explica 75,6% de la variabilidad en el alargamiento, mientras que el coeficiente de correlación es igual a 0,869, indicando una relación moderadamente fuerte entre las variables.

## Conclusiones

1. Para las dos condiciones del material analizadas en las diferentes condiciones de ensayo de fluencia lenta (tensión y temperatura) se evidenciaron las tres etapas características de este fenómeno, siendo que en dos casos se observó un comportamiento con doble estadio de velocidad de deformación constante.
2. El rango de variación de la reducción del área para la situación MES del material fue entre 71 y 88 %, observándose un punto experimental fuera del comportamiento general (35,7% muestra S9); mientras que para la condición MESTT el rango de variación de la reducción del área fue entre 82 y 91 %. Una conducta cualitativamente similar se observó para el alargamiento; aunque en este caso el rango de variación fue más extenso para la condición MES (entre 19 y 57 %), cuando se compara con la condición MESTT (entre 46 y 61 %).
3. Aplicando el análisis de regresión lineal simple se obtienen respectivos modelos estadísticos para describir el comportamiento del alargamiento con la temperatura para cada una de las condiciones del material estudiadas: para la condición **MES** tenemos la ecuación  $\epsilon_r = -233 + 0.475 \cdot T$  y para la condición **MESTT**, la ecuación  $\epsilon_r = -209 + 0.493 \cdot T$ .
4. Existen diferencias entre los valores de la media del grado de orientación (**GO**) para las distintas condiciones de ensayo en cada una de las condiciones del material (**MES** y **MESTT**, respectivamente).
5. El análisis par a par de igualdad de medias muestra que para la condición **MES** el 55% de los pares comparados se diferencian con un nivel de confianza estadística del 95%, mientras que para la condición **MESTT** se alcanza un 60% de pares diferentes.
6. Existe una relación directa entre la macro y microdeformación en fluencia lenta expresada (para el acero estudiado) por los siguientes modelos de ecuaciones:  $GO = 0.278 + 0.005 \cdot \epsilon_r$  y  $GO = 0.184 + 0.004 \cdot A_r$ .

## **Recomendaciones**

Profundizar en la evaluación de la microdeformación del acero estudiado, analizando regiones alejadas de la zona de formación del cuello y secciones transversales de las probetas.

## **Bibliografía**

1. Creep and rupture testing of metals .British Standard.BS 3500.1990.
2. Parker, J D. prediction of creep deformation and failure for 0.5Cr0.5Mo0.25V and 2.25Cr1Mo Steel. Journal of pressure vessel technology v107.1985.
3. Paeker J D,Parsons WJ.high Temperature deformation and fracture processes in 2 1/2Cr1Mo-1/2Cr1/2Mo1/4V weldments. International Journal of Pressure vessels. And piping.v63.1995.
4. Inarsson B Gand Sandstrom R. Creep of butt welded tubes. Proceeding of International conference on Creep and Fracture of Engineering Materials and structures. Ed.Wilshire, Swansea.1981.
5. Parker JD and Stratford GC.Strain location in creep testing of samples with heterogeneous microstructures. International journal of pressure of pressure vessel and piping.v68.1996.
6. Materiales II Creep (fluencia lenta) disponible en: <http://www.ing.unlp.edu.ar/aeron/catedras/archivos/Creep.pdf>.
7. INTRODUCCION AL CREEP Comportamiento mecánico de materiales a altas temperaturas disponible en: <http://materias.fi.uba.ar/6716/creepintrod.pdf>.
8. CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4358/fichero/Volumen1%252Fcapitulo4.pdf> .
9. WILLIAM SMITH Ciencia e Ing de los Materiales.2004.
- 10.F.C. Monkman and N.J. Grant, An Empirical Relationship Between Rupture Life and Minimum Creep Rate in Creep-Rupture Tests, *Proc. ASTM*, Vol 56, 1956, p 593–605.
- 11.A.P. Guliáev Metalografía tomo II.1978.
- 12.Standars ABoA. Standard specification for pressure vessel plates, alloy steel, chromium-molybdenum.A387-79b.United States:ASTM;1982.
- 13.Standars ABoA. Standard practice for creep, creep-rupture, and stress-rupture tests of metallic materials. E-139. United States:ASTM;1990.

14. Standards ACo. Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. E 3 – 01. United States: ASTM Committee E04 on Metallography and Subcommittee E04.01 on Sampling, Specimen Preparation, and Photography; 2001. p. 1-12.
15. Manual del usuario del Software imagenJ . disponible en <http://www.imagej.com>.
16. DIETER, E. **Mechanical Metallurgy**. Mc. Graw-Hill. 1976. 653 p.
17. CAMPANELLI, J. Efeito de variações de tensão e temperatura em parâmetros do comportamento em fluência do aço inoxidável austenítico AIS 310. Dissertação. Ufscar, 1991.
18. BAIRD, J., JAIMAESON, A. Creep strength of some synthesized iron alloys containing manganese, molybdenum and chromium. **Journal of the Iron and Steel Institute**. November, p. 847-856, 1972.
19. KLUEH, L. Interaction solid solution hardening in 2.25Cr1Mo steel. **Materials Science and Engineering**. V. 35, p. 239-253, 1978.
20. PARKER, J., STRATFORD, G. Effect of heat treatment on creep and fracture behavior of 1,25Cr0,5Mo steel. **Materials Science and Technology**. V. 11, n. 12, p. 1267-1273, 1995.
21. Xin J, Hideyuki O and Hitoshi W. Structural Elongation and Alignment in Fe-0.4C Alloy by Isothermal Ferrite Transformation in High Magnetic Fields. *Materials Transactions*, 44, No. 12 (2003) pp. 2532 to 2536.

## Anexo 1

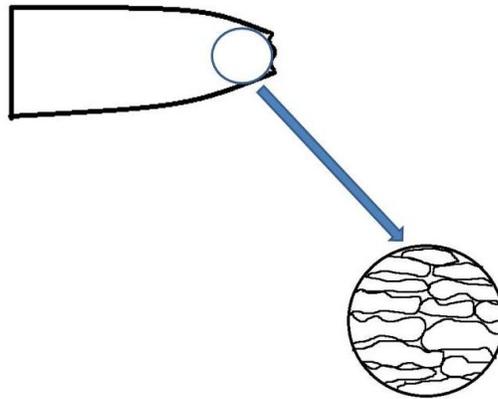


Figura 1.1. Forma de los granos en el extremo de la fractura en las muestras.

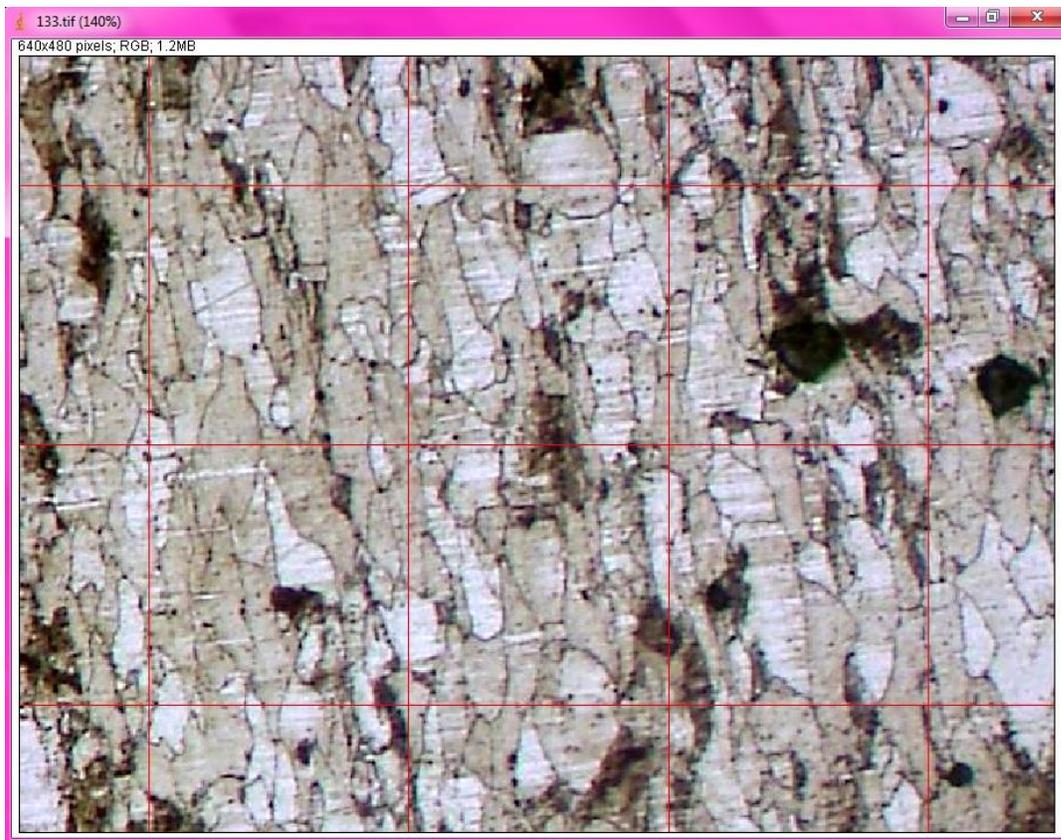


Figura 1.2 Mayado realizado a las imágenes del extremo de la fractura en las muestras.

## Anexo 2

Muestra O

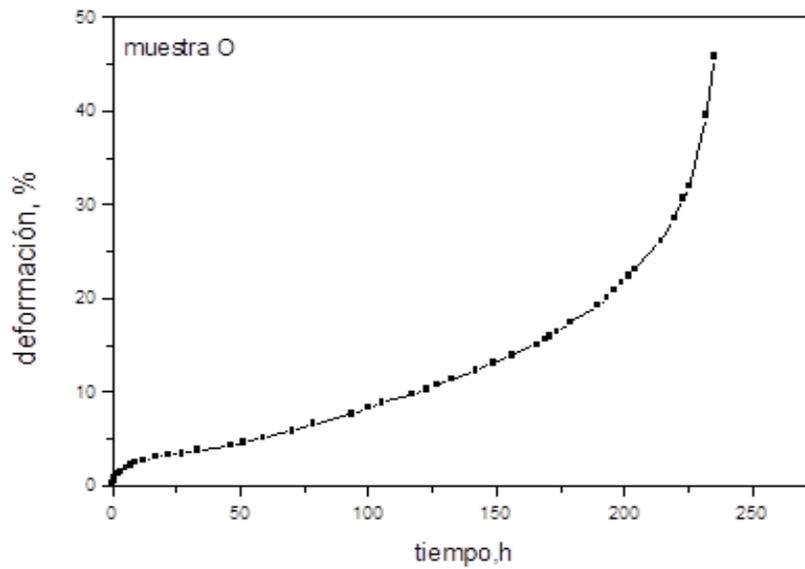


Figura A1.1 Curva de fluencia lenta para la condición de ensayo 125 MPa y 575°C y condición del material MES.

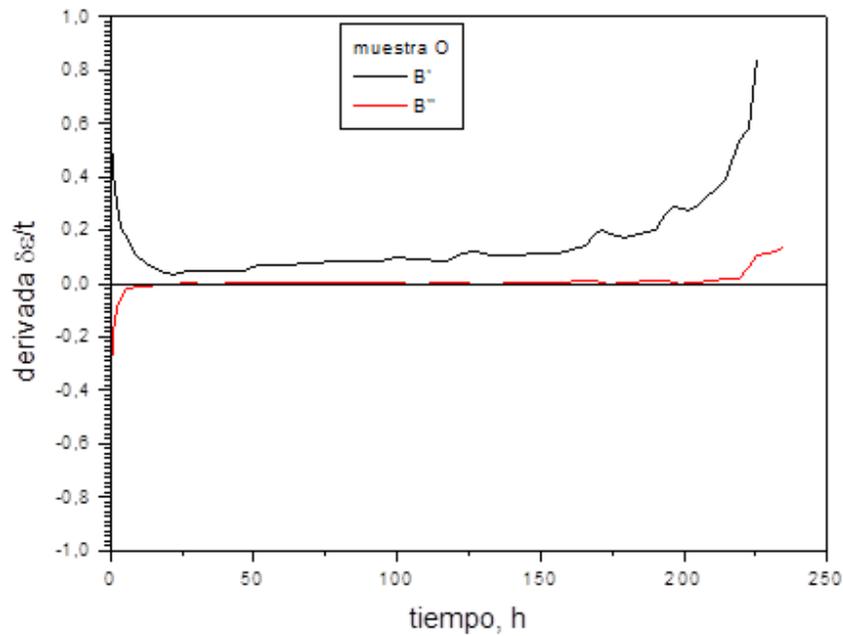


Figura B1.1 Gráfico de la primera y segunda derivada de la deformación plástica con respecto al tiempo para la condición de ensayo 125 MPa y 575 °C y condición del material MES.

## Muestra S9

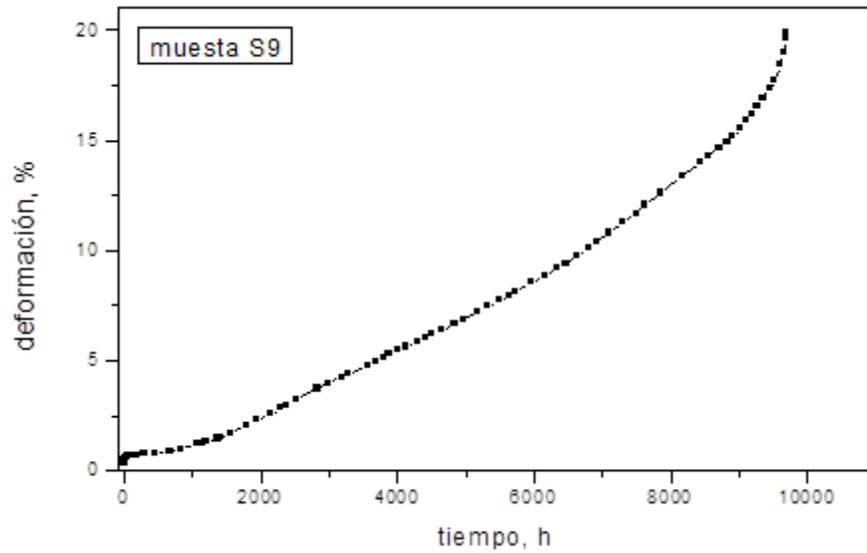


Figura A1.2 Curva de fluencia lenta para la condición de ensayo 100 MPa y 550°C y condición del material MES.

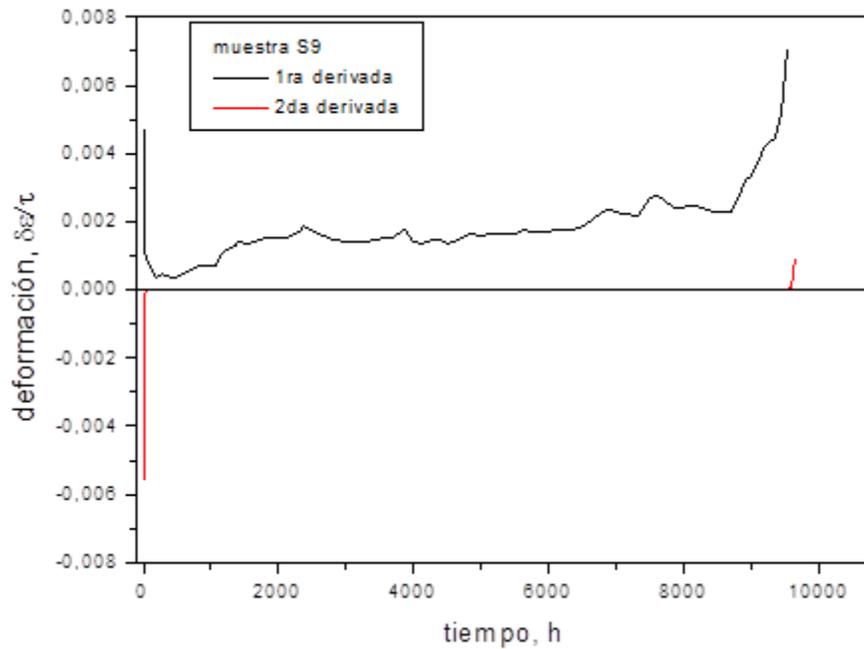


Figura B1.2 Gráfico de la primera y segunda derivada de la deformación plástica con respecto al tiempo para la condición de ensayo 100 MPa y 550 °C y condición del material MES.

## Muestra N8

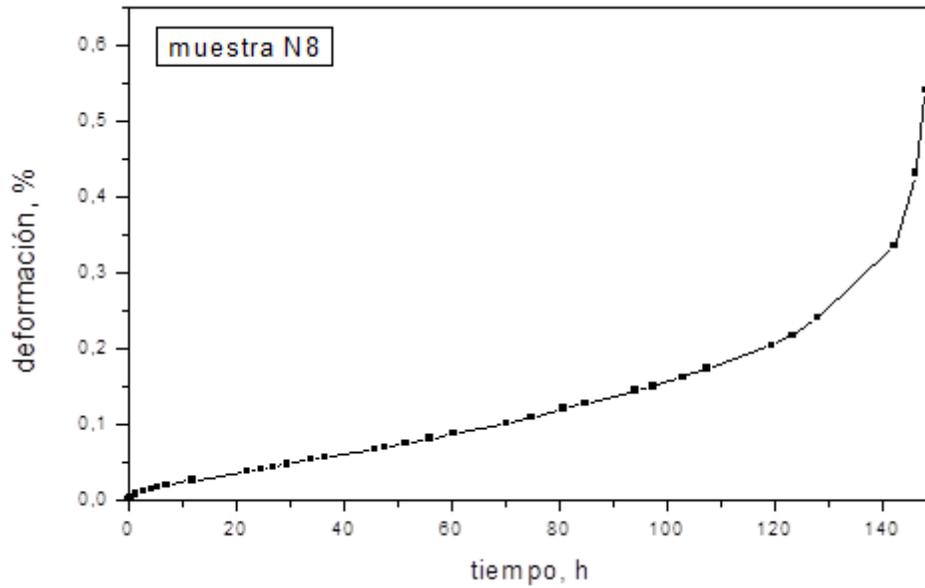


Figura A1.3 Curva de fluencia lenta para la condición de ensayo 100 MPa y 600°C y condición del material MES.

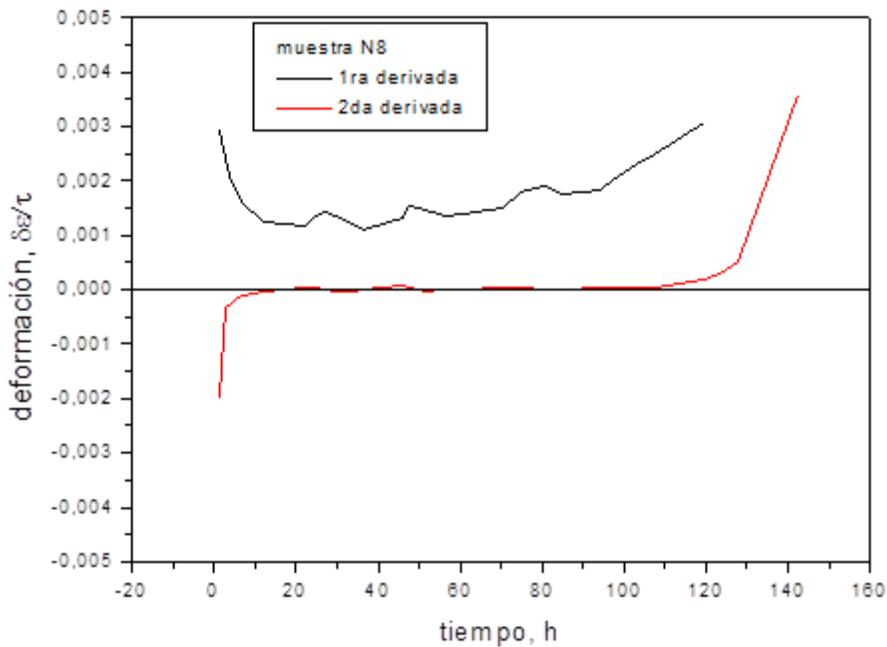


Figura B1.3 Gráfico de la primera y segunda derivada de la deformación plástica con respecto al tiempo para la condición de ensayo 100 MPa y 600 °C y condición del material MES.

Muestra N4

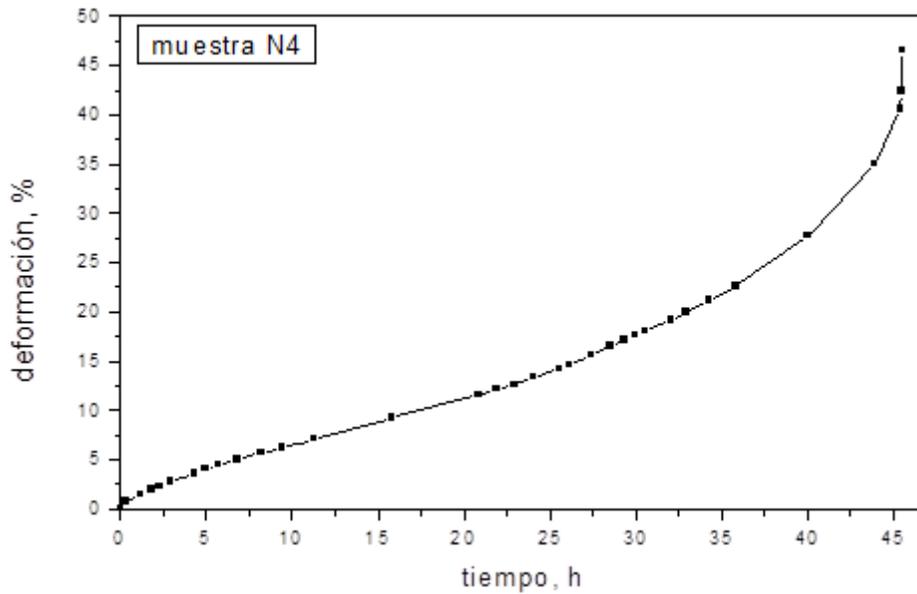


Figura A1.4 Curva de fluencia lenta para la condición de ensayo 125 MPa y 600°C y condición del material MES.

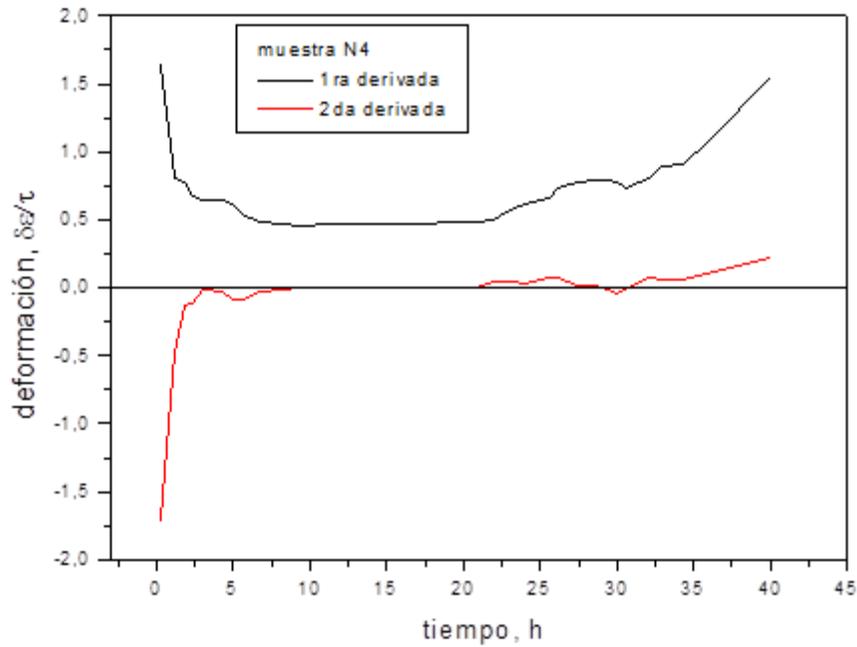


Figura B1.2 Gráfico de la primera y segunda derivada de la deformación plástica con respecto al tiempo para la condición de ensayo 125 MPa y 600 °C y condición del material MES.

### Muestra N3

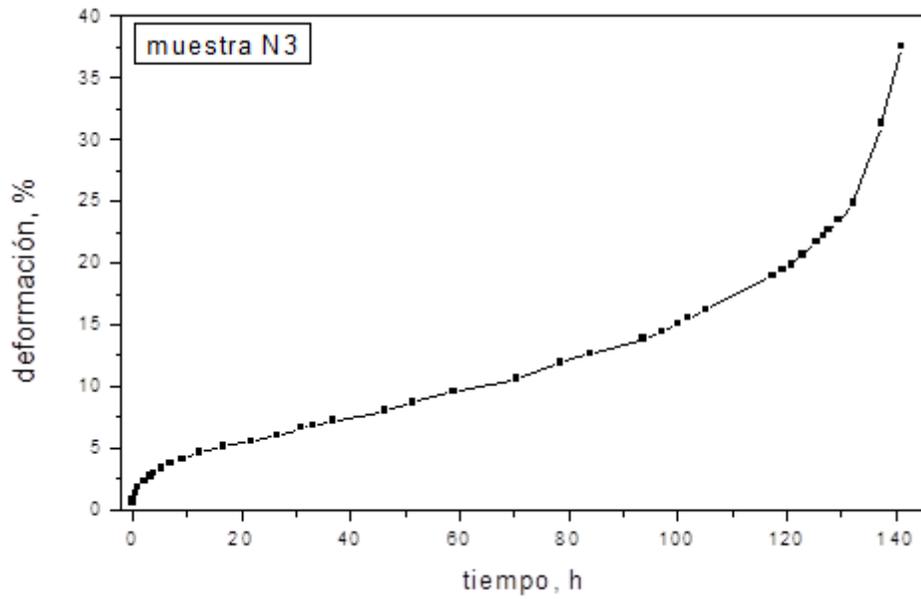


Figura A1.5 Curva de fluencia lenta para la condición de ensayo 150 MPa y 575°C y condición del material MES.

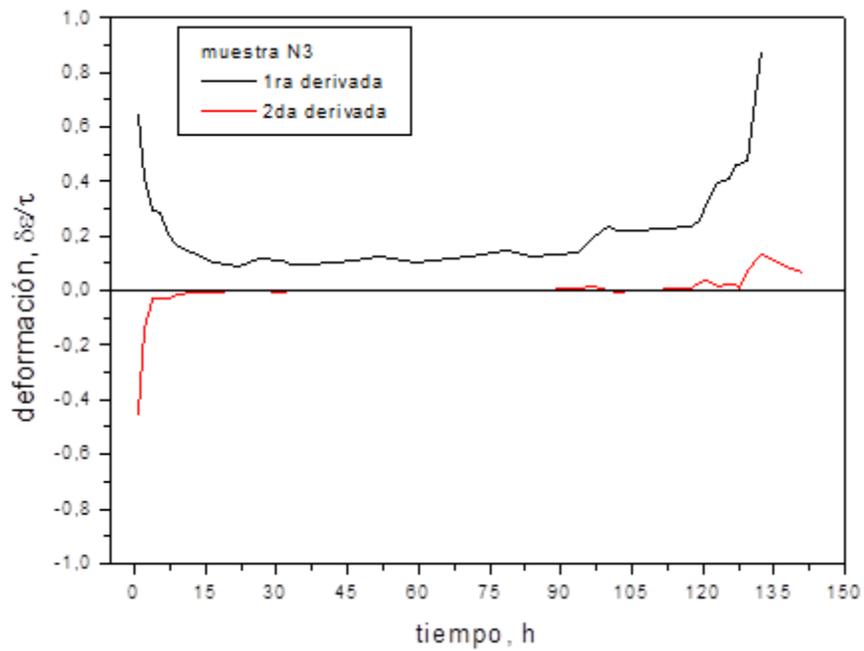


Figura B1.5 Gráfico de la primera y segunda derivada de la deformación plástica con respecto al tiempo para la condición de ensayo 150 MPa y 575 °C y condición del material MES.

### Muestra TT1

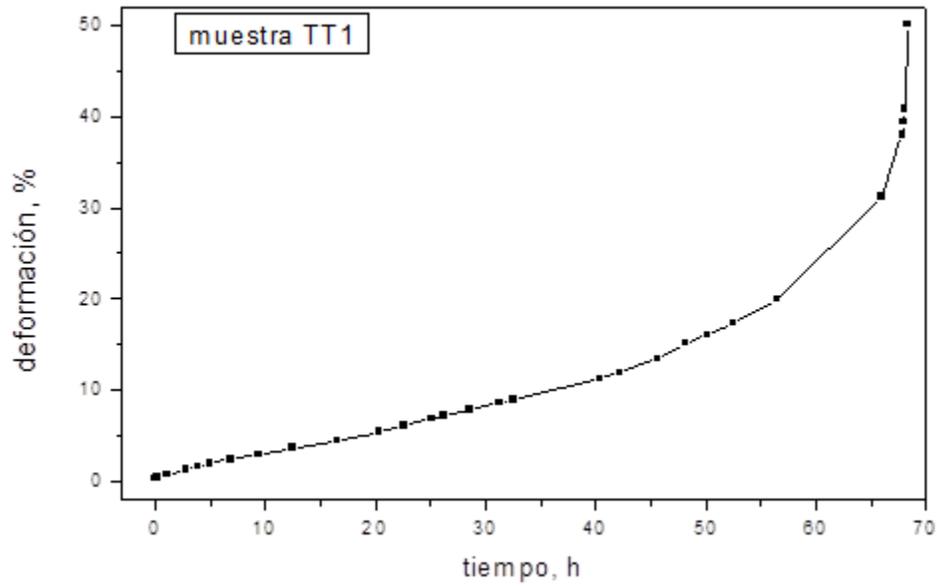


Figura A1.6 Curva de fluencia lenta para la condición de ensayo 100 MPa y 625°C y condición del material MESTT.

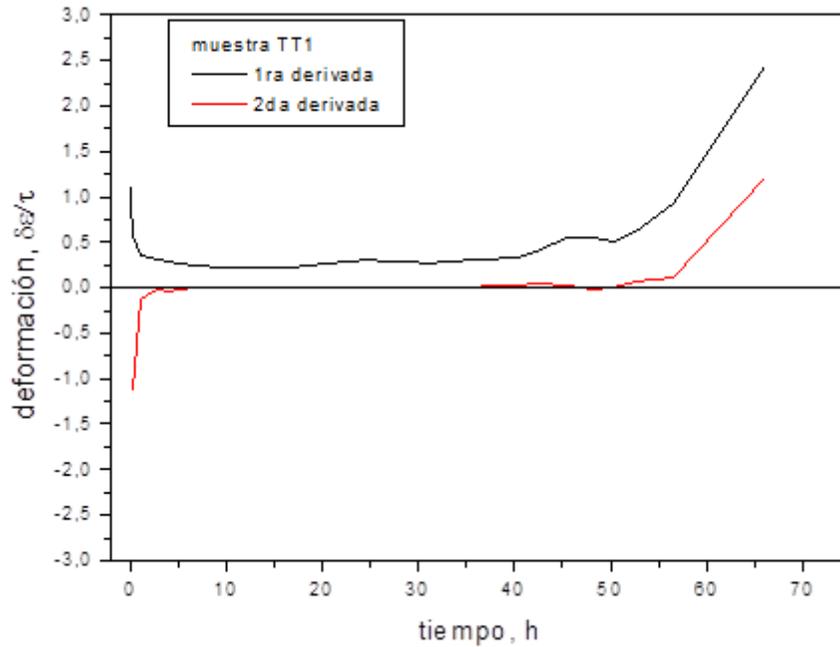


Figura B1.6 Gráfico de la primera y segunda derivada de la deformación plástica con respecto al tiempo para la condición de ensayo 100 MPa y 625 °C y condición del material MESTT.

## Muestra TT2

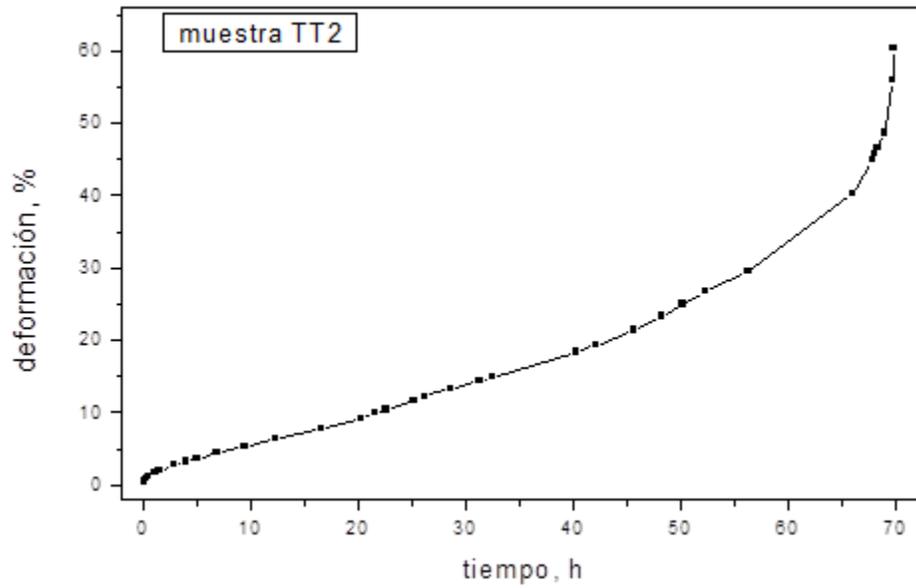


Figura A1.7 Curva de fluencia lenta para la condición de ensayo 125 MPa y 600°C y condición del material MESTT.

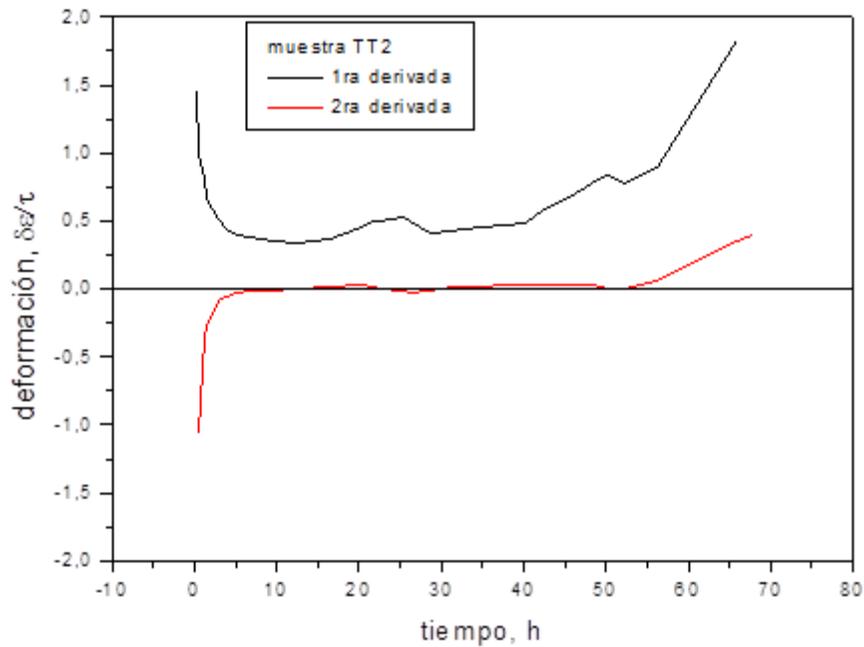


Figura B1.7 Gráfico de la primera y segunda derivada de la deformación plástica con respecto al tiempo para la condición de ensayo 125 MPa y 600 °C y condición del material MESTT.

Muestra TT4

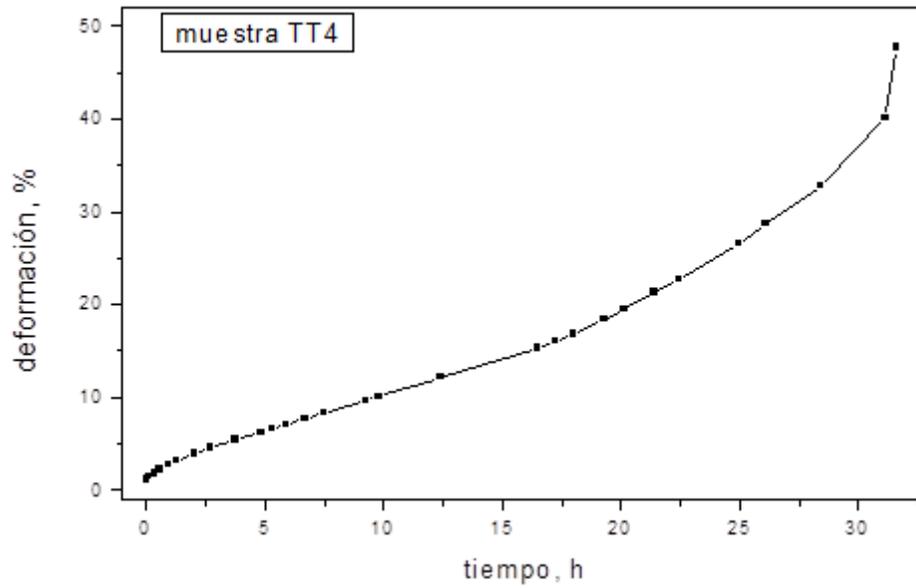


Figura A1.8 Curva de fluencia lenta para la condición de ensayo 175 MPa y 575°C y condición del material MESTT.

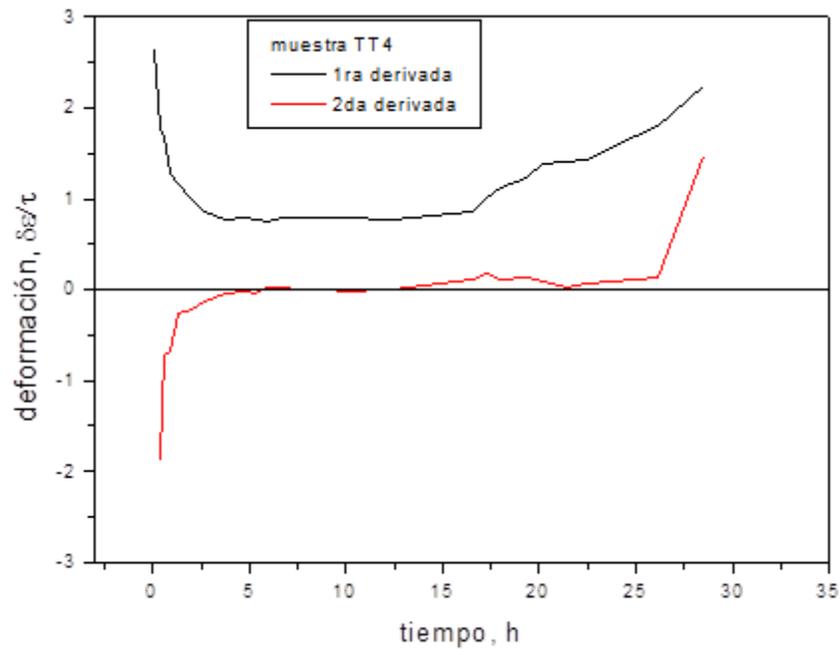


Figura B1.8 Gráfico de la primera y segunda derivada de la deformación plástica con respecto al tiempo para la condición de ensayo 175 MPa y 575 °C y condición del material MESTT.

## Muestra TT5

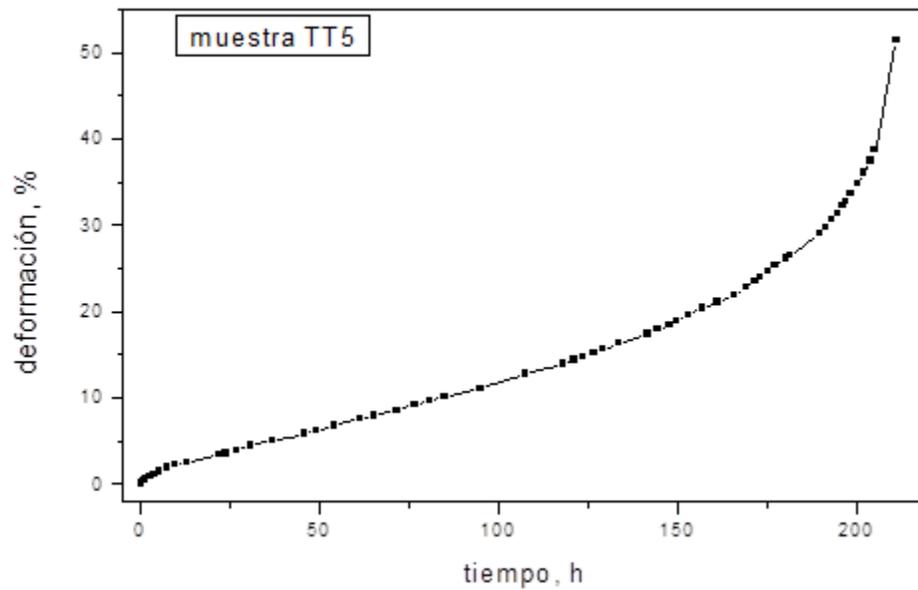


Figura A1.9 Curva de fluencia lenta para la condición de ensayo 100 MPa y 610°C y condición del material MESTT.

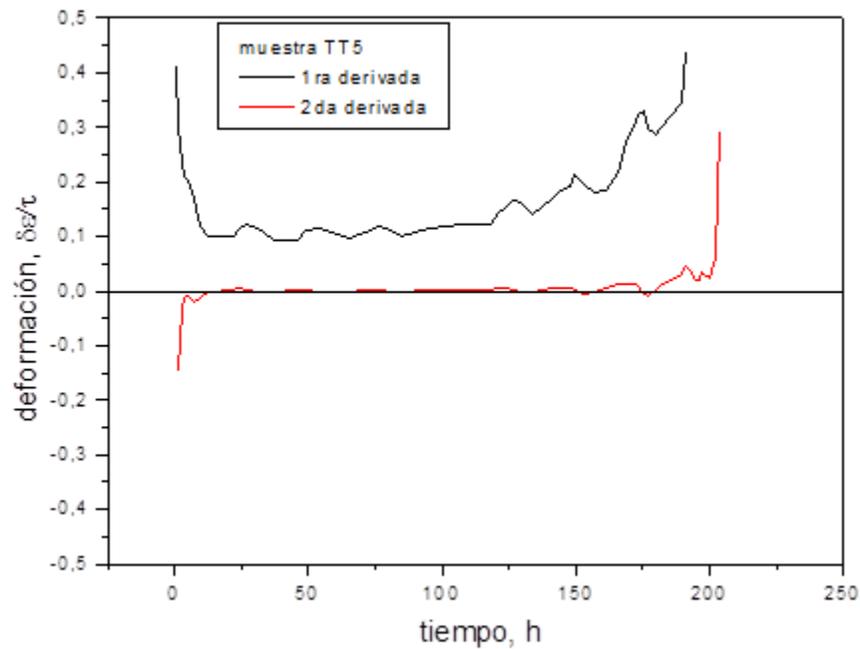


Figura B1.9 Gráfico de la primera y segunda derivada de la deformación plástica con respecto al tiempo para la condición de ensayo 100 MPa y 610 °C y condición del material MESTT.

## Muestra TT6

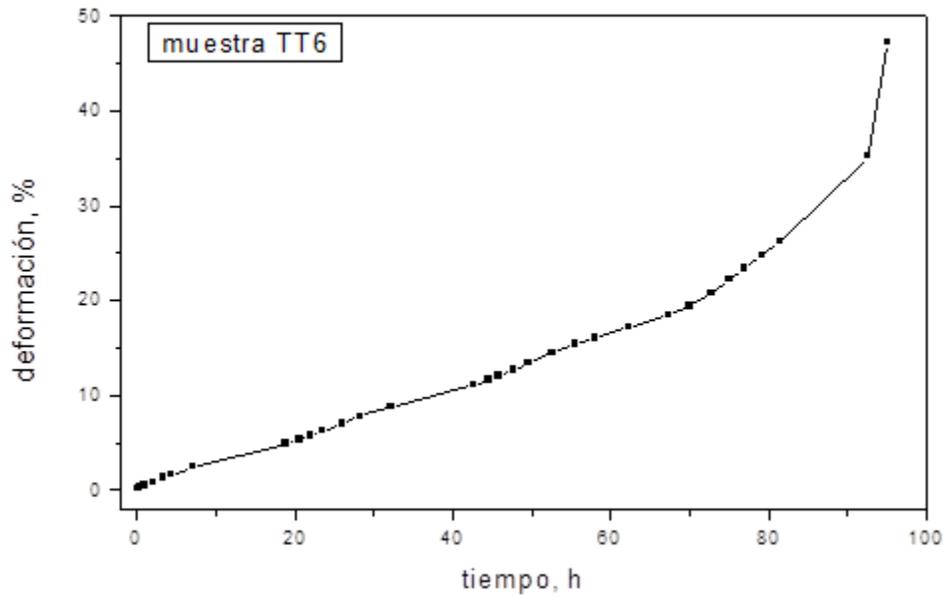


Figura A1.10 Curva de fluencia lenta para la condición de ensayo 150 MPa y 575°C y condición del material MESTT.

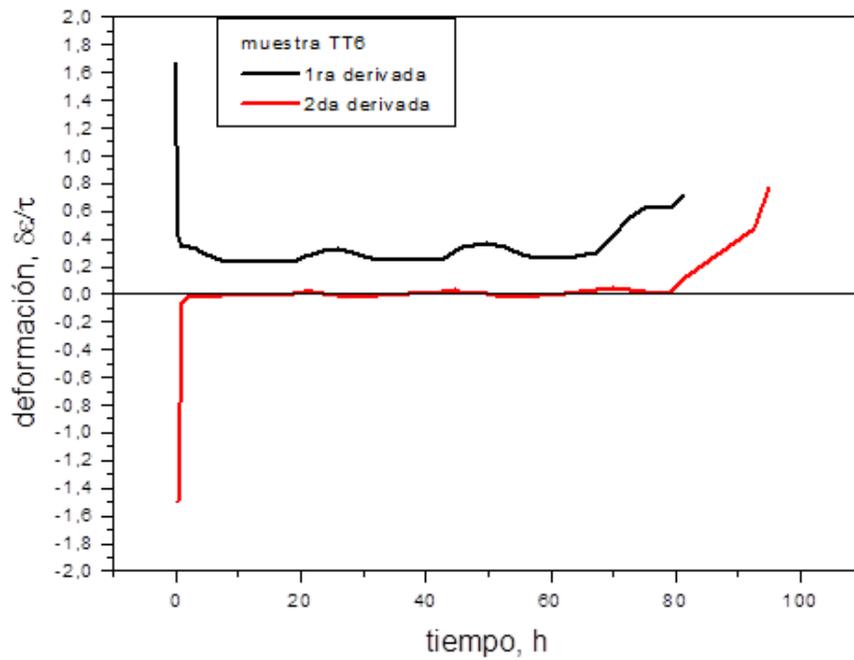


Figura B1.10 Gráfico de la primera y segunda derivada de la deformación plástica con respecto al tiempo para la condición de ensayo 150 MPa y 575 °C y condición del material MESTT.

Muestra TT 7

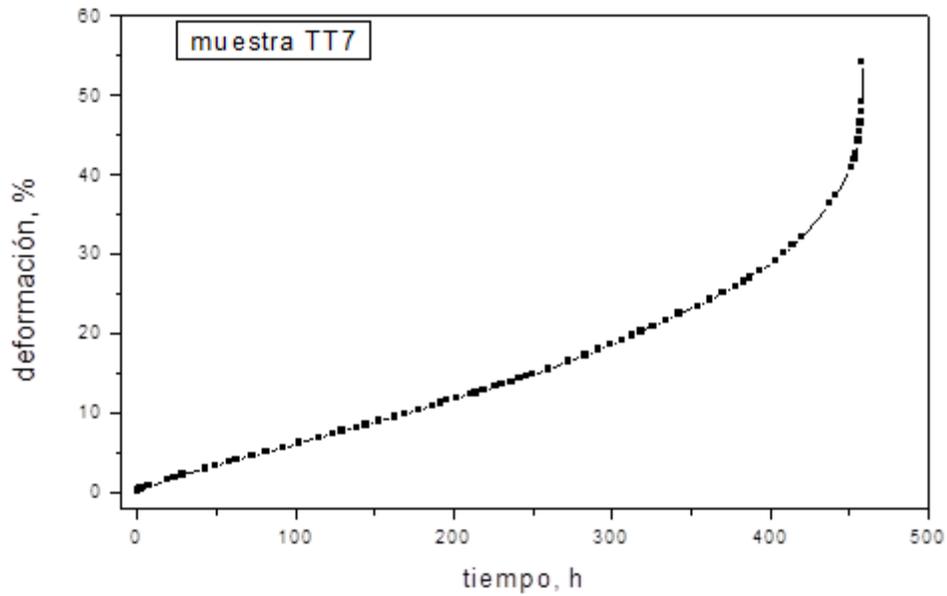


Figura A1.11 Curva de fluencia lenta para la condición de ensayo 125 MPa y 575°C y condición del material MESTT.

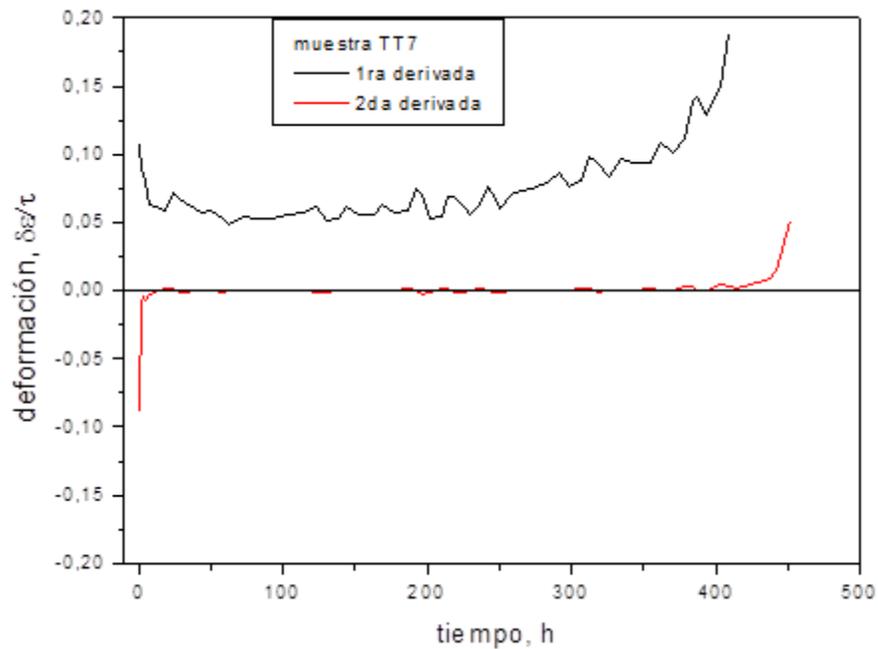


Figura B1.11 Gráfico de la primera y segunda derivada de la deformación plástica con respecto al tiempo para la condición de ensayo 125 MPa y 575 °C y condición del material MESTT.

## Muestra S2

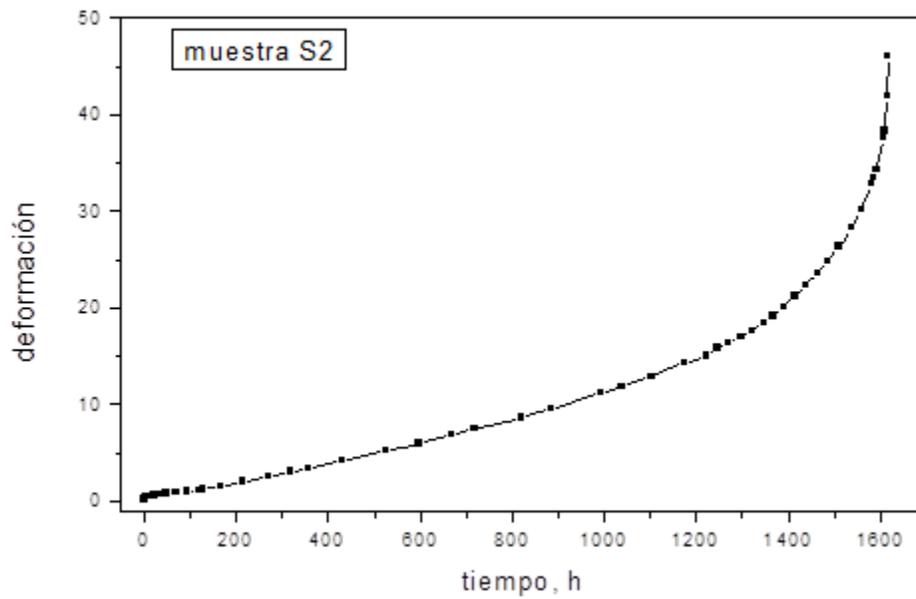


Figura A1.12 Curva de fluencia lenta para la condición de ensayo 100 MPa y 575°C y condición del material MES.

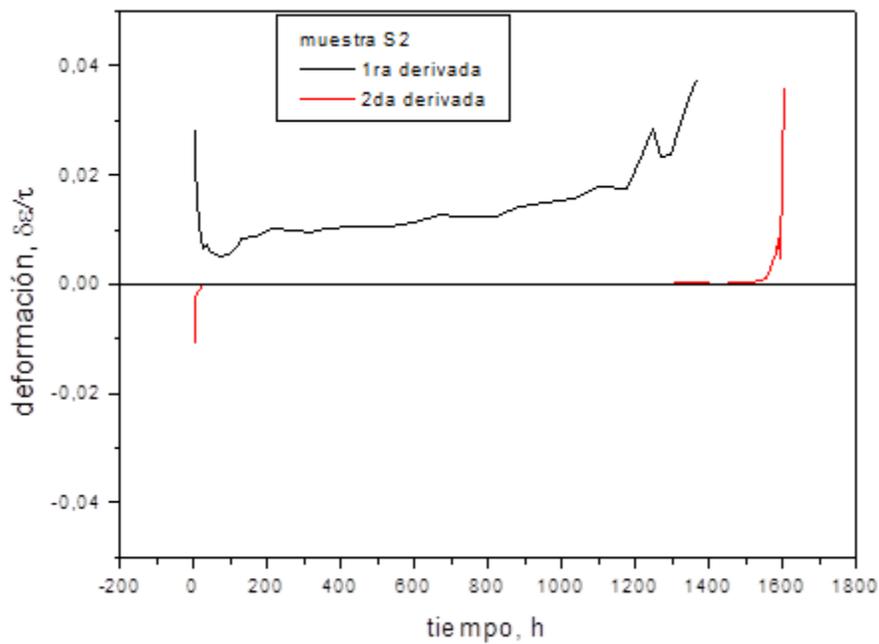


Figura B1.12 Gráfico de la primera y segunda derivada de la deformación plástica con respecto al tiempo para la condición de ensayo 100 MPa y 575 °C y condición del material MES.

Muestra N9

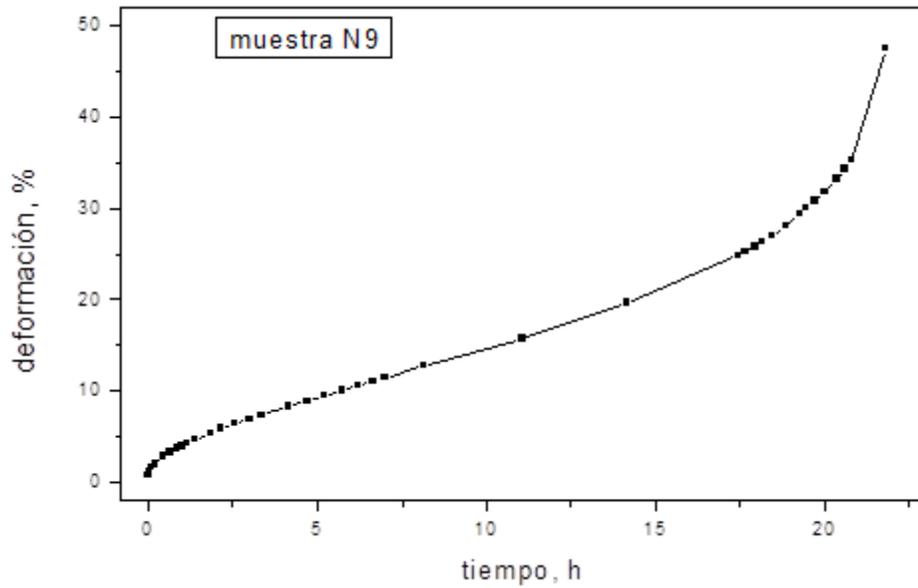


Figura A1.13 Curva de fluencia lenta para la condición de ensayo 100 MPa y 550°C y condición del material MES.

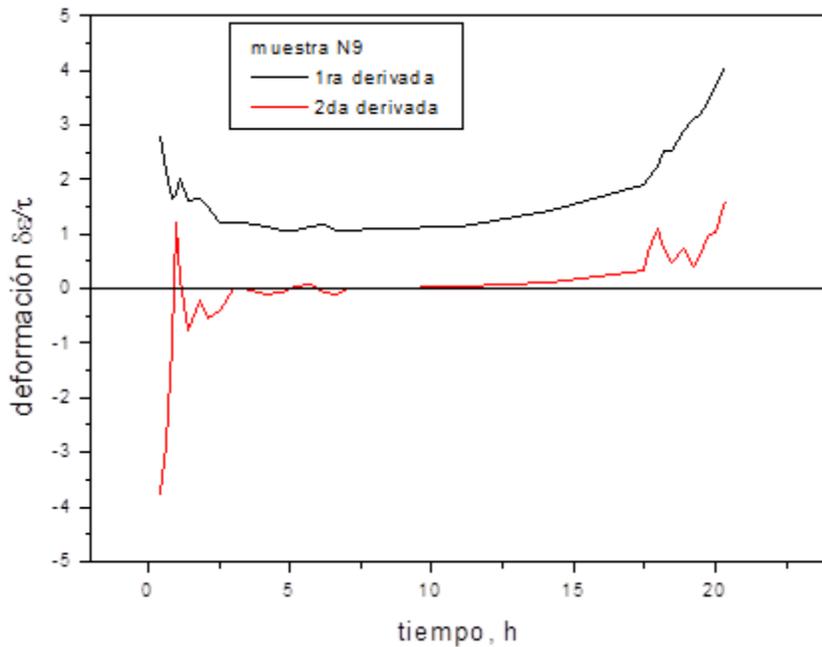


Figura B1.13 Gráfico de la primera y segunda derivada de la deformación plástica con respecto al tiempo para la condición de ensayo 100 MPa y 550 °C y condición del material MES.

## Muestra N6

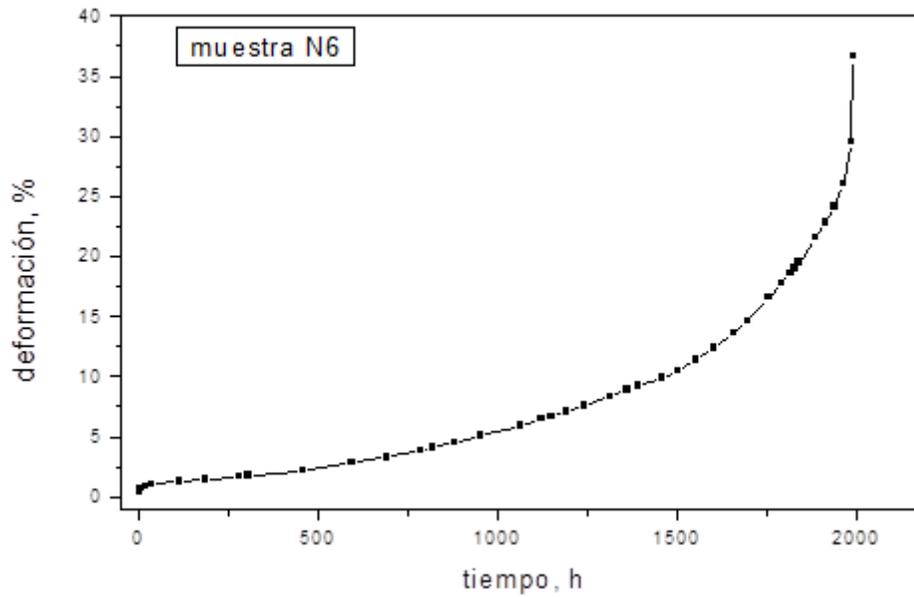


Figura A1.14 Curva de fluencia lenta para la condición de ensayo 125 MPa y 550°C y condición del material MES.

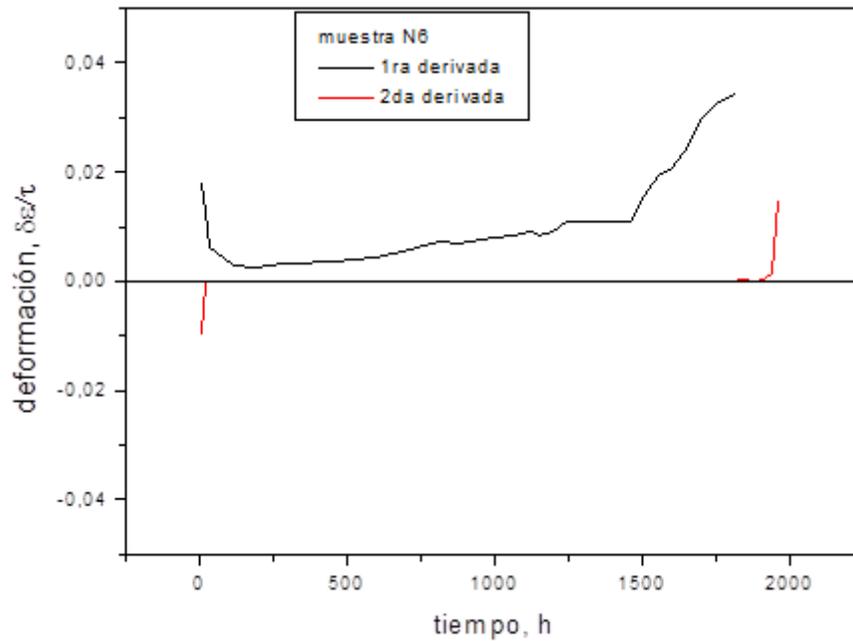


Figura B1.14 Gráfico de la primera y segunda derivada de la deformación plástica con respecto al tiempo para la condición de ensayo 125 MPa y 550 °C y condición del material MES.

### Muestra S3

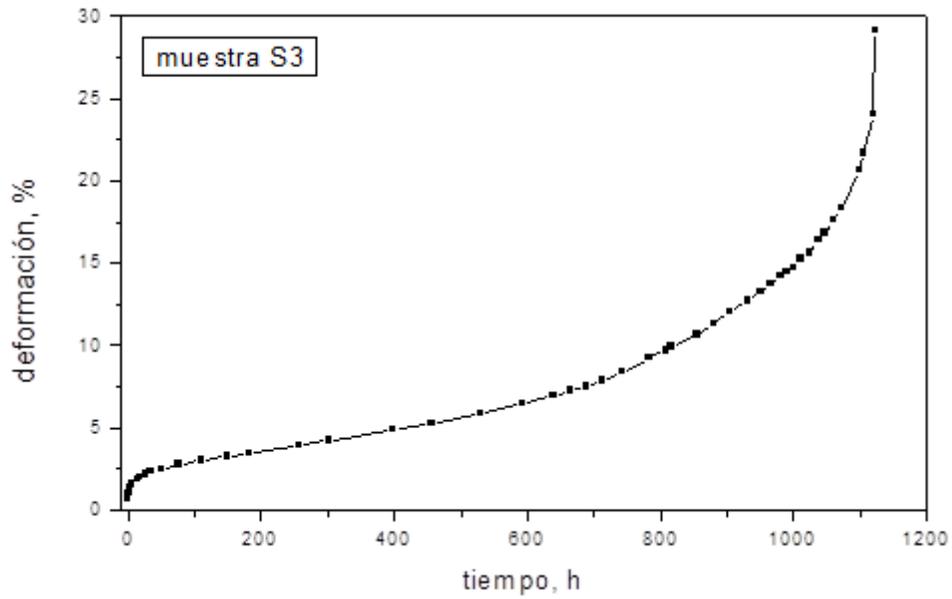


Figura A1.15 Curva de fluencia lenta para la condición de ensayo 150 MPa y 550°C y condición del material MES.

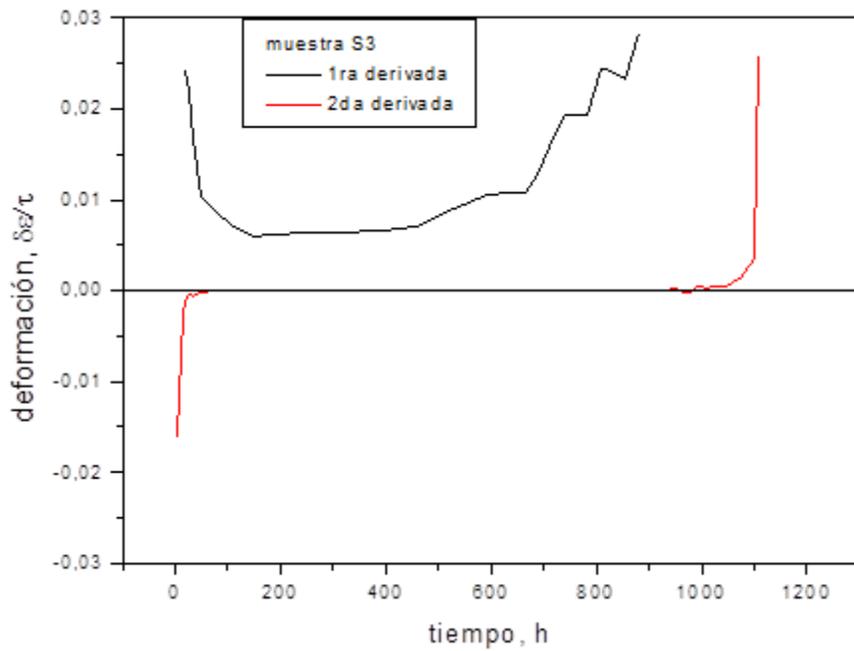


Figura B1.15 Gráfico de la primera y segunda derivada de la deformación plástica con respecto al tiempo para la condición de ensayo 150 MPa y 550 °C y condición del material MES.

Muestra O

Tabla A1.1 Análisis de regresión lineal para determinar la velocidad de deformación plástica en el estadio secundario de la condición de ensayo 125 MPa y 575 °C y condición del material MES.

Parameter	Value	Error	t-Value	Prob> t
A	0.2405	0.25818	0.93153	0.36737
B	0.08382	0.00244	34.39029	<0.0001

R	R-Square(COD)	Adj. R-Square	Root-MSE(SD)	N
0.99413	0.9883	0.98747	0.36663	16

ANOVA Table:

Item	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Statistic	Prob>F
Model	1	158.97196	158.97196	1182.69229	<0.0001
Error	14	1.88181	0.13442		
Total	15	160.85377			

Muestra S9

Tabla A1.2 Análisis de regresión lineal para determinar la velocidad de deformación plástica en el estadio secundario de la condición de ensayo 100 MPa y 550 °C y condición del material MES.

Parameter	Value	Error	t-Value	Prob> t
A	-0.73287	0.13777	-5.31943	<0.0001
B	0.00164	2.77193E-5	59.00646	<0.0001

R	R-Square(COD)	Adj. R-Square	Root-MSE(SD)	N
0.99233	0.98473	0.98444	0.52659	56

ANOVA Table:

Item	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Statistic	Prob>F
Model	1	965.49718	965.49718	3481.7628	<0.0001
Error	54	14.97427	0.2773		
Total	55	980.47145			

Muestra N8

Tabla A1.3 Análisis de regresión lineal para determinar la velocidad de deformación plástica en el estadio secundario de la condición de ensayo 100 MPa y 600 °C y condición del material MES.

Parameter	Value	Error	t-Value	Prob> t
A	6.69629E-4	0.00227	0.29539	0.77107
B	0.00152	3.49848E-5	43.37034	<0.0001

R	R-Square(COD)	Adj. R-Square	Root-MSE(SD)	N
0.99525	0.99052	0.98999	0.00451	20

ANOVA Table:

Item	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Statistic	Prob>F
Model	1	0.03828	0.03828	1880.98607	<0.0001
Error	18	3.6635E-4	2.03528E-5		
Total	19	0,03865			

Muestra N4

Tabla A1.4 Análisis de regresión lineal para determinar la velocidad de deformación plástica en el estadio secundario de la condición de ensayo 125 MPa y 600 °C y condición del material MES.

Parameter	Value	Error	t-Value	Prob> t
A	0.93707	0.27538	3.40287	0.00268
B	0.54875	0.01228	44.70198	<0.0001

R	R-Square(COD)	Adj. R-Square	Root-MSE(SD)	N
0.99479	0.9896	0.9891	0.61763	23

ANOVA Table:

Item	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Statistic	Prob>F
Model	1	762.26206	762.26206	1998.26746	<0.0001
Error	21	8.01069	0.38146		
Total	22	770.27275			

Muestra N3

Tabla A1.5 Análisis de regresión lineal para determinar la velocidad de deformación plástica en el estadio secundario de la condición de ensayo 150 MPa y 575 °C y condición del material MES.

Parameter	Value	Error	t-Value	Prob> t
A	2.30443	0.32899	7.00458	<0.0001
B	0.12881	0.00441	29.20222	<0.0001

R	R-Square(COD)	Adj. R-Square	Root-MSE(SD)	N
0.99132	0.98271	0.98156	0.55998	17

ANOVA Table:

Item	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Statistic	Prob>F
Model	1	267.41072	267.41072	852.76972	<0.0001
Error	15	4.70369	0.31358		
Total	16	272.11441			

Muestra TT1

Tabla A1.6 Análisis de regresión lineal para determinar la velocidad de deformación plástica en el estadio secundario de la condición de ensayo 100 MPa y 625 °C y condición del material MESTT.

Parameter	Value	Error	t-Value	Prob> t
A	-0.20501	0.31789	-0.6449	0.52713
B	0.30298	0.01037	29.22257	<0.0001

R	R-Square(COD)	Adj. R-Square	Root-MSE(SD)	N
0.98962	0.97936	0.97821	0.74304	20

ANOVA Table:

Item	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Statistic	Prob>F
Model	1	471.4787	471.4787	853.95861	<0.0001
Error	18	9.93797	0.55211		
Total	19	481.41668			

Muestra TT2

Tabla A1.7 Análisis de regresión lineal para determinar la velocidad de deformación plástica en el estadio secundario de la condición de ensayo 125 MPa y 600 °C y condición del material MESTT.

Parameter	Value	Error	t-Value	Prob> t
A	-0.03369	0.43738	-0.07702	0.93956
B	0.47836	0.0134	35.70995	<0.0001

R	R-Square(COD)	Adj. R-Square	Root-MSE(SD)	N
0.99378	0.98761	0.98683	0.78692	18

ANOVA Table:

Item	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Statistic	Prob>F
Model	1	789.66337	789.66337	1275.20038	<0.0001
Error	16	9.90794	0.61925		
Total	17	799.57132			

Muestra TT4

Tabla A1.8 Análisis de regresión lineal para determinar la velocidad de deformación plástica en el estadio secundario de la condición de ensayo 175 MPa y 575 °C y condición del material MESTT.

Parameter	Value	Error	t-Value	Prob> t
A	1.81017	0.29186	6.20219	<0.0001
B	0.85887	0.0212	40.5112	<0.0001

R	R-Square(COD)	Adj. R-Square	Root-MSE(SD)	N
0.99636	0.99274	0.99214	0,46602	14

ANOVA Table:

Item	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Statistic	Prob>F
Model	1	356.41823	356.41823	1641.15768	<0.0001
Error	12	2.6061	0.21717		
Total	13	359.02432			

Muestra TT5

Tabla A1.9 Análisis de regresión lineal para determinar la velocidad de deformación plástica en el estadio secundario de la condición de ensayo 100 MPa y 610 °C y condición del material MESTT.

Parameter	Value	Error	t-Value	Prob> t
A	-0.713	0.41262	-1.72797	0.09307
B	0.13527	0.00341	39.71303	<0.0001

R	R-Square(COD)	Adj. R-Square	Root-MSE(SD)	N
0.98939	0.9789	0.97828	1.04947	36

ANOVA Table:

Item	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Statistic	Prob>F
Model	1	1737.02552	1737.02552	1577.1246	<0.0001
Error	34	37.44718	1.10139		
Total	35	1774.4727			

Muestra TT6

Tabla A1.10 Análisis de regresión lineal para determinar la velocidad de deformación plástica en el estadio secundario de la condición de ensayo 150 MPa y 575 °C y condición del material MESTT.

Parameter	Value	Error	t-Value	Prob> t
A	-0.25458	0.25213	-1.00972	0.32313
B	0.28425	0.00541	52.5842	<0.0001

R	R-Square(COD)	Adj. R-Square	Root-MSE(SD)	N
0.99587	0.99175	0.99139	0.63268	25

ANOVA Table:

Item	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Statistic	Prob>F
Model	1	1106.82023	1106.82023	2765.09816	<0.0001
Error	23	9.2065	0.40028		
Total	24	1116.02673			

Muestra TT 7

Tabla A1.11 Análisis de regresión lineal para determinar la velocidad de deformación plástica en el estadio secundario de la condición de ensayo 125 MPa y 575 °C y condición del material MESTT.

Parameter	Value	Error	t-Value	Prob> t
A	-1.33481	0.35096	-3.80328	3.77013E-4
B	0.06992	0.0014	49.87161	<0.0001

R	R-Square(COD)	Adj. R-Square	Root-MSE(SD)	N
0.98971	0.97952	0.97913	1.18852	54

ANOVA Table:

Item	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Statistic	Prob>F
Model	1	3513.35007	3513.35007	2487.17756	<0.0001
Error	52	73.45443	1.41259		
Total	53	3586.8045			

Muestra S2

Tabla A1.12 Análisis de regresión lineal para determinar la velocidad de deformación plástica en el estadio secundario de la condición de ensayo 100 MPa y 575 °C y condición del material MES.

Parameter	Value	Error	t-Value	Prob> t
A	-1.20348	0.45065	-2.67054	0.0118
B	0.01428	4.94453E-4	28.8842	<0.0001

R	R-Square(COD)	Adj. R-Square	Root-MSE(SD)	N
0.98136	0.96306	0.96191	1.48291	34

ANOVA Table:

Item	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Statistic	Prob>F
Model	1	1834.64344	1834.64344	834.29689	<0.0001
Error	32	70.36894	2.19903		
Total	33	1905.01238			

Muestra S9

Tabla A1.13 Análisis de regresión lineal para determinar la velocidad de deformación plástica en el estadio secundario de la condición de ensayo 100 MPa y 550 °C y condición del material MES.

Parameter	Value	Error	t-Value	Prob> t
A	3.55456	0.07589	46.8378	<0.0001
B	1.1256	0.01039	108.3203	<0.0001

R	R-Square(COD)	Adj. R-Square	Root-MSE(SD)	N
0.99957	0.99915	0.99906	0.1116	12

ANOVA Table:

Item	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Statistic	Prob>F
Model	1	146.13945	146.13945	11733.28694	<0.0001
Error	10	0.12455	0.01246		
Total	11	146.264			

Muestra N6

Tabla A1.14 Análisis de regresión lineal para determinar la velocidad de deformación plástica en el estadio secundario de la condición de ensayo 100 MPa y 550 °C y condición del material MES.

Parameter	Value	Error	t-Value	Prob> t
A	-2.54321	0.93718	-2.7137	0.01063
B	0.01018	7.37417E-4	13.80837	<0.0001

R	R-Square(COD)	Adj. R-Square	Root-MSE(SD)	N
0.92536	0.85629	0.8518	2.54544	34

ANOVA Table:

Item	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Statistic	Prob>F
Model	1	1235.40679	1235.40679	190.67101	<0.0001
Error	32	207.33628	6.47926		
Total	33	1442.74307			

Muestra S3

Tabla A1.14 Análisis de regresión lineal para determinar la velocidad de deformación plástica en el estadio secundario de la condición de ensayo 150 MPa y 550 °C y condición del material MES.

Parameter	Value	Error	t-Value	Prob> t
A	0.62702	0.49782	1.25954	0.22047
B	0.01185	7.32928E-4	16.16421	<0.0001

R	R-Square(COD)	Adj. R-Square	Root-MSE(SD)	N
0.95869	0.91909	0.91558	1.05536	25

ANOVA Table:

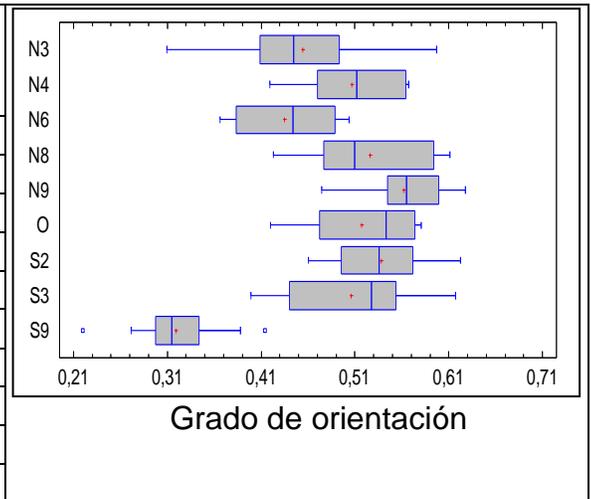
Item	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Statistic	Prob>F
Model	1	291.0125	291.0125	261.28158	<0.0001
Error	23	25.61714	1.11379		
Total	24	316.62964			

## Anexo 3

### Análisis estadístico relacionado con el grado de orientación para la condición MES

#### Resumen Estadístico

	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación
N3	10	0.454178	0.0810092	17.8364%
N4	10	0.506694	0.0504818	9.96297%
N6	10	0.435287	0.0552857	12.701%
N8	10	0.526378	0.0671994	12.7664%
N9	10	0.561635	0.0532275	9.47723%
O	10	0.51737	0.0616811	11.922%
S2	10	0.53805	0.0519396	9.6533%
S3	10	0.506134	0.0708167	13.9917%
S9	10	0.319366	0.0554785	17.3715%
Total	90	0.48501	0.0911357	18.7905%



#### Tabla ANOVA

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.432206	8	0.0540258	14.25	0.0000
Intra grupos	0.307003	81	0.00379016		
Total (Corr.)	0.739209	89			

### Pruebas de Múltiple Rangos

Método: 95,0 porcentaje LSD

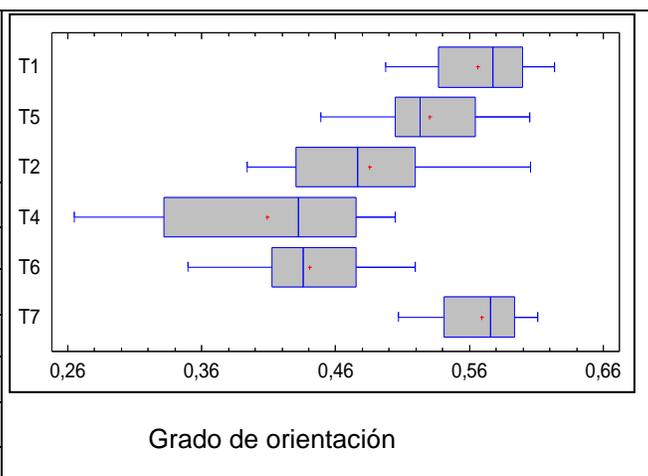
	Casos	Media	Grupos Homogéneos	Contraste	Sig.	Diferencia	Contraste	Sig.	Diferencia
S9	10	0.319366	X	N3 - N4		-0.0525157	N6 - S2	*	-0.102763
N6	10	0.435287	X	N3 - N6		0.0188911	N6 - S3	*	-0.0708467
N3	10	0.454178	XX	N3 - N8	*	-0.0721997	N6 - S9	*	0.115922
S3	10	0.506134	XX	N3 - N9	*	-0.107457	N8 - N9		-0.0352571
N4	10	0.506694	XX	N3 - O	*	-0.063192	N8 - O		0.00900773
O	10	0.51737	XX	N3 - S2	*	-0.0838717	N8 - S2		-0.011672
N8	10	0.526378	XX	N3 - S3		-0.0519556	N8 - S3		0.0202441
S2	10	0.53805	XX	N3 - S9	*	0.134813	N8 - S9	*	0.207013
N9	10	0.561635	X	N4 - N6	*	0.0714069	N9 - O		0.0442648
				N4 - N8		-0.019684	N9 - S2		0.0235851
				N4 - N9	*	-0.054941	N9 - S3	*	0.0555012
				N4 - O		-0.0106762	N9 - S9	*	0.24227
				N4 - S2		-0.0313559	O - S2		-0.0206797
				N4 - S3		0.000560155	O - S3		0.0112364
				N4 - S9	*	0.187329	O - S9	*	0.198005
				N6 - N8	*	-0.0910908	S2 - S3		0.0319161
				N6 - N9	*	-0.126348	S2 - S9	*	0.218684
				N6 - O	*	-0.0820831	S3 - S9	*	0.186768

(\* indica una diferencia significativa)

### Análisis estadístico relacionado con el grado de orientación para la condición MESTT

#### Resumen Estadístico

	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación
T1	10	0.566329	0.0429835	7.58984%
T5	10	0.530021	0.0477761	9.014%
T2	10	0.485528	0.0688445	14.1793%
T4	10	0.409184	0.0833217	20.3629%
T6	10	0.440741	0.0517509	11.7418%
T7	10	0.568923	0,0319753	5.62033%
<b>Total</b>	<b>60</b>	<b>0.500121</b>	<b>0.0819065</b>	<b>16.3773%</b>



### Tabla ANOVA

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.220197	5	0.0440394	13.54	0.0000
Intra grupos	0.175615	54	0.00325213		
Total (Corr.)	0.395812	59			

### Pruebas de Múltiple Rangos

Método: 95,0 porcentaje LSD

	Casos	Media	Grupos Homogéneos
T4	10	0.409184	X
T6	10	0.440741	XX
T2	10	0.485528	XX
T5	10	0.530021	XX
T1	10	0.566329	X
T7	10	0.568923	X

Contraste	Sig.	Diferencia
T1 - T5		0.036308
T1 - T2	*	0.080801
T1 - T4	*	0.157145
T1 - T6	*	0.125589
T1 - T7		-0.00259359
T5 - T2		0.0444929
T5 - T4	*	0.120837
T5 - T6	*	0.0892805
T5 - T7		-0.0389016
T2 - T4	*	0.076344
T2 - T6		0.0447875
T2 - T7	*	-0.0833946
T4 - T6		-0.0315564
T4 - T7	*	-0.159739
T6 - T7	*	-0.128182

(\* Indica una diferencia significativa)

## Anexo 4

### Análisis de Regresión Simple grado de orientación vs alargamiento para la condición MES

Linear Regression:  $Y = A + B * X$

Parameter	Value	Error	t-Value	Prob> t
A	0.277758	0.0563767	4.92681	0.0017
B	0.00510195	0.00133826	3.81239	0.0066

R	R-Square(COD)	Adj. R-Square	Root-MSE(SD)	N
0,869509	0.756045	0.721195	6.249502	9

ANOVA Table:

Item	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Statistic	Prob>F
Model	1	0.0291711	0.0291711	14.53	0.0066
Error	7	0.0140493	0.00200705		
Total	8	0.0432205			

### Análisis de Regresión Simple grado de orientación vs reducción de área para la condición MES

Lineal:  $Y = a + b * X$

Parameter	Value	Error	t-Value	Prob> t
A	0.184004	0.0697102	2.63955	0.0334
B	0.00402834	0.000915278	4.40122	0.0032

R	R-Square(COD)	Adj. R-Square	Root-MSE(SD)	N
0,869509	0.756045	0.721195	6.249502	9

ANOVA Table:

Item	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Statistic	Prob>F
Model	1	0.0317478	0.0317478	19.37	0.0032
Error	7	0.0114727	0.00163896		
Total	8	0.0432205			

## Anexo 5

### Regresión Simple - alargamiento vs. Temperatura para la condición del material MES

Linear Regression:  $Y = A + B * X$

Parameter	Value	Error	t-Value	Prob> t
A	-232.694444	58.717976	-3.962917	0.005441
B	0,475333	0.102054	4.657668	0.002321

R	R-Square(COD)	Adj. R-Square	Root-MSE(SD)	N
0.869509	0.756045	0.721195	6.249502	9

ANOVA Table:

Item	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Statistic	Prob>F
Model	1	847.281667	847.281667	21.693871	0.002321
Error	7	273.393889	39.05627		
Total	8	1120.675556			

### Regresión Simple - alargamiento vs. Temperatura para la condición del material MESTT

Linear Regression:  $Y = A + B * X$

Parameter	Value	Error	t-Value	Prob> t
A	38.244286	17.108344	2.235417	0.039074
B	0.083071	0.028818	2.882585	0.044896

R	R-Square(COD)	Adj. R-Square	Root-MSE(SD)	N
0.82161	0.675042	0.593803	1.39206	6

ANOVA Table:

Item	Degrees of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	F Statistic	Prob>F
Model	1	16.102012	16.102012	8.309299	0.00249
Error	4	7.751321	1.93783		
Total	5	23.853333			