

## **CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.**

### **1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS.**

Los ensayos de tracción a alta temperatura, y a velocidad de deformación constante, proporcionan la tensión asociada a la velocidad de deformación durante la etapa secundaria de un ensayo convencional de creep. Por tanto, el método de ensayos utilizado ha permitido, como se ha explicado, obtener algunas propiedades del comportamiento en creep de los materiales utilizados.

#### **1.1. PLANIFICACIÓN DE LOS ENSAYOS**

Es muy importante confeccionar una planificación previa de los ensayos a realizar. En cuanto al número de ellos, no debe ser muy alto, debido a que todos tienen una duración de varias horas (debido fundamentalmente a la etapa inicial de calentamiento y homogeneización de la temperatura en el sistema de ensayo). En segundo lugar, y de la información obtenida de los estudios de otros autores sobre el creep, es necesario, para cada temperatura de prueba elegida, realizar ensayos con diversos órdenes de magnitud de velocidad de deformación y un número suficiente de ensayos, para obtener un buen modelado del comportamiento y detectar posibles cambios en el mecanismo de deformación que controla el proceso de termofluencia.

Por otro lado, los parámetros que podemos controlar en los ensayos serán la temperatura y la velocidad de deformación.

En cuanto a la temperatura, la mínima viene impuesta por las propias condiciones del creep, es decir, una temperatura, en Kelvin, superior al 40% de la de fusión.

$$T_{\min} = 40\% \cdot T_F = 40\% \cdot (659.7 + 273)K = 100^\circ C$$

La temperatura máxima vendrá determinada por la mínima de entre todas las temperaturas máximas de utilización de los diversos componentes que se introducen en la cámara de temperatura (extensómetro, mordazas, lubricante...). En este caso, el

lubricante, una grasa de marca MOLYCOTE, impone que la temperatura de ensayo sea inferior a 290 °C, para evitar que éste se degrade.

Se decidió que los ensayos se realizaran a 250 °C para ambos materiales (Al AM y Al ER) y adicionalmente, a 220 y 280 °C para el Al AM (30 °C por encima y por debajo de los 250 °C), para valorar la influencia de la temperatura.

Debido a las características de la máquina que se iba a utilizar (*INSTRON 5505*) y con datos consultados al proveedor de la misma, se fijó el tiempo máximo de los ensayos en 5 horas (sin contar con el tiempo previo para la estabilización de las temperaturas). Con este dato se puede estimar la velocidad mínima de deformación que se va a utilizar:

Deformación aprox. de la probeta  $\rightarrow$  10 %. Longitud calibrada  $\rightarrow$  25mm

$$\Delta l = \varepsilon \cdot l_0 = 10\% \cdot 25\text{mm} = 2.5\text{mm}$$

Fijamos el tiempo de rotura máximo de la probeta en 4h (inferior a las 5h), con lo que obtenemos la mínima velocidad de deformación:

$$v_{\min} (\text{mm} / \text{min}) = \frac{\Delta l (\text{mm})}{t_{f,\max} (\text{min})} = \frac{2.5\text{mm}}{4\text{h} \cdot \frac{60 \text{ min}}{1\text{h}}} \approx 0.01\text{mm} / \text{min}$$

Para el límite inferior de duración de los ensayos tomamos 3 minutos, obteniéndose una velocidad máxima de deformación:

$$v_{\max} (\text{mm} / \text{min}) = \frac{\Delta l (\text{mm})}{t_{f,\min} (\text{min})} = \frac{2.5\text{mm}}{3 \text{ min}} \approx 1\text{mm} / \text{min}$$

El rango de velocidades de deformación que se utilizará será de 0.01 mm/min a 1 mm/min, siendo, por tanto, de una amplitud de dos órdenes de magnitud.

Para cada temperatura se debe realizar el mayor número posible de ensayos, abarcando todo el rango de velocidades de deformación establecido. Las velocidades de deformación establecidas pueden verse en la siguiente **Tabla 1**.

Velocidad de desplazamiento (mm/min)	$\dot{\epsilon}_s$ ( $s^{-1}$ ), con $l_0 = 25\text{mm}$
0.01	6.67E-06
0.025	1.67E-05
0.05	3.33E-05
0.1	6.67E-05
0.25	1.67E-04
0.5	6.67E-04
1	3.33E-04

**Tabla 1.** Velocidades de deformación.

Además, en las tablas siguientes (**Tabla 2** y **Tabla 3**), se muestra un resumen de los datos de los diferentes ensayos sobre Al AM y Al ER. En ellas se tabulan el número identificativo de la probeta (inscrito en ellas con el lápiz de grabado), la sección de ésta, la temperatura a la que se ensayó, la longitud calibrada tomada en el extensómetro, la velocidad de desplazamiento impuesta a los cabezales, la fuerza máxima alcanzada en el ensayo, el nombre identificativo del ensayo, la máxima tensión alcanzada, la velocidad de deformación impuesta, el material de la probeta y las observaciones.

Probeta	Datos del ensayo						Creep		Observaciones	Material
	Área (mm <sup>2</sup> )	Temp.(°C)	L0 (mm)	V (mm/min)	Fmax (kg)	Archivo	Tensión (MPa)	Vel. Def.		
1	19.349	220	25.000	0.01	325.58	ensayo11	168.3	6.67E-06	No rompio	Al AM
2	19.100	220	25.006	0.1	368.06	ensayo10	192.7	6.67E-05		Al AM
3	17.329	220	24.994	1	371.56	ensayo09	214.4	6.67E-04		Al AM
4	18.594	220	25.004	0.05	344.00	ensayo13	185.0	3.33E-05		Al AM
5	18.050	220	24.998	0.01	313.65	ensayo14	173.7	6.67E-06	Repetición ensayo11	Al AM
6	19.051	220	24.997	0.5	388.53	ensayo12	203.9	3.33E-04		Al AM
7	17.355	250	24.997	0.01	236.78	ensayo15	136.4	6.67E-06	No rompio	Al AM
8	19.335	250	25.000	0.05	309.32	ensayo16	159.9	3.33E-05		Al AM
9	19.271	250	25.000	0.1	322.05	ensayo17	167.1	6.67E-05		Al AM
10	19.173	250	25.004	0.5	336.81	ensayo18	175.7	3.33E-04		Al AM
11	19.239	250	25.003	1	361.71	ensayo19	188.0	6.67E-04		Al AM
12	19.336	250	24.990	0.25	330.95	ensayo20	171.2	1.67E-04		Al AM
13	19.269	250	25.004	0.025	293.03	ensayo21	152.1	1.67E-05		Al AM
14	18.865	280	24.998	0.01	222.60	ensayo28	118.0	6.67E-06		Al AM
15	19.143	280	24.997	0.025	240.06	ensayo27	125.3	1.67E-05		Al AM
16	18.542	280	24.998	0.05	241.95	ensayo26	130.5	3.33E-05		Al AM
17	19.302	280	25.003	0.1	263.09	ensayo25	136.3	6.67E-05		Al AM
18	18.902	280	24.997	0.25	264.79	ensayo24	140.1	1.67E-04		Al AM
19	19.349	280	24.995	0.5	277.00	ensayo23	143.2	3.33E-04	Defectuoso	Al AM
20	18.966	280	25.000	1	297.11	ensayo22	156.7	6.67E-04		Al AM
21	19.701	220	24.995	0.25	381.82	ensayo29	193.7	1.67E-04		Al AM
22	19.458	220	25.003	0.025	346.30	ensayo30	178.1	1.67E-05		Al AM
23	16.773	250	24.998	0.01	226.12	ensayo31	134.7	6.67E-06	Repetición ensayo15	Al AM
24	19.196	280	24.989	0.5	283.18	ensayo32	147.6	3.33E-04	Repetición ensayo23	Al AM
25	19.184		25.000				0.0	0.00E+00	Disponible	Al AM
26	19.521		25.000				0.0	0.00E+00	Disponible	Al AM
27	19.355		25.000				0.0	0.00E+00	Disponible	Al AM
28	18.668		25.000				0.0	0.00E+00	Disponible	Al AM

**Tabla 2.** Tabla resumen de ensayos sobre aluminio AM.

Probeta	Datos del ensayo						Creep		Observaciones	Material
	Área (mm <sup>2</sup> )	Temp.(°C)	L0 (mm)	V (mm/min)	Fmax (kg)	Archivo	Tensión (MPa)	Vel. Def.		
1'	19.655	250	24.999	0.05	327.91	ensayo01	168.2	3.33E-05		Al ER
2'	19.591	250	25.000	0.01	214.07	ensayo02		6.67E-06	No rompio	Al ER
3'	19.691	250	25.003	0.01	289.37	ensayo03	148.4	6.67E-06		Al ER
4'	19.544	250	24.997	0.1	335.67	ensayo04	172.1	6.67E-05		Al ER
5'	19.667	250	25.002	0.025	314.92	ensayo05	163.8	1.67E-05		Al ER
6'	19.798	250	24.997	0.2	343.54	ensayo06	174.2	1.33E-04		Al ER
7'	19.322	250	25.003	0.5	358.28	ensayo07	185.0	3.33E-04		Al ER
8'	19.222	250	24.997	1	367.08	ensayo08	190.6	0.000667		Al ER

**Tabla 3.** Tabla resumen de ensayos sobre Al ER.

## 1.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En la **Figura 1** puede verse un gráfico de los resultados de los ensayos anteriores, mostrándose en el eje horizontal la tensión máxima y en el vertical (a escala logarítmica) la velocidad de deformación impuesta. Hay que recordar que, en materiales convencionales, el comportamiento esperado (Ley Potencial del Creep) es tal que deben obtenerse, para temperatura constante, tendencias formadas por tramos de líneas rectas, correspondiendo, cada uno de estos tramos, a regiones de creep gobernadas por mecanismos distintivos.

En el análisis general de estos datos se utilizará la Ley Potencial del Creep, aunque con la complejidad que introducen los dos siguientes hechos:

1) La posible existencia de una tensión umbral, parámetro extra que hay que determinar y que depende de la temperatura.

2) La actuación de diversos mecanismos de deformación, pudiendo existir, simultáneamente, uno o diversos de ellos, en función de las condiciones de presión y temperatura.

La estrategia a seguir para el análisis de resultados será, en primer lugar, suponer que no existe tensión umbral y que la deformación está controlada por un solo mecanismo de deformación. Posteriormente se asumirán varios mecanismos controladores del creep en el rango de condiciones utilizado para el ensayo. Finalmente se intentará incorporar el concepto de tensión umbral para hacer un estudio de creep sobre este tipo de materiales, similar al realizado por otros autores de prestigio reconocido [2].

Finalmente se compararán los resultados obtenidos con los de otros autores para materiales similares.

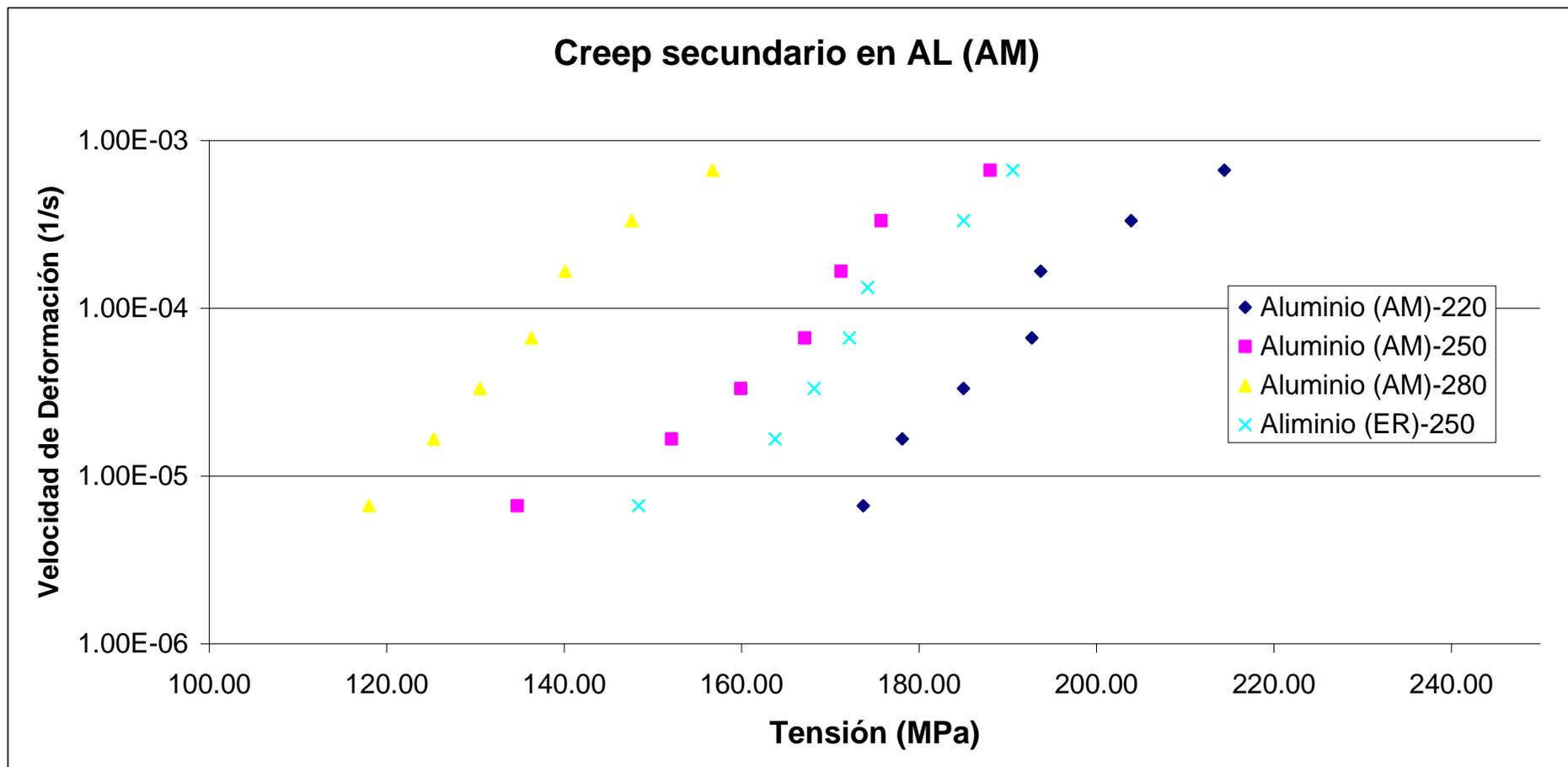


Figura 1. Resultados de los ensayos

En la **Figura 1** se representa la tensión frente a la velocidad de deformación, ésta en escala logarítmica. Por ello, si se cumple la Ley Potencial del Creep,

$$\dot{\epsilon}_s = A\sigma^n \exp\left(-\frac{Q_c}{RT}\right)$$

y representamos  $\log \dot{\epsilon}_s$  frente a  $\log \sigma$  se obtiene una recta de pendiente n. Esta representación para los ensayos realizados se ilustra en la **Figura 2**. Puede comprobarse cómo los valores obtenidos siguen, aproximadamente, la ley lineal esperada. Los valores del parámetro n obtenidos se muestran en la **Tabla 4**.

	Valores de n
Al ER-250	19.4
Al AM-220	22.0
Al AM-250	14.8
Al AM-280	17.0

**Tabla 4.** Valores del parámetro n en la aproximación lineal.

Se puede ver cómo los valores de este parámetro están en el rango de 14-22, valores del orden de los previstos por otros autores [1]. Si nos fijamos más detenidamente en esta última figura, puede verse cómo cada curva describe una figura parecida a una “S”. Es posible, por tanto, que esté actuando más de un mecanismo de fluencia, en función de la velocidad de deformación característica, y que cada uno de estos mecanismos tenga asociado un valor de n característico, identificable en la figura por una zona lineal con pendiente n. Por ello, se ha procedido a aproximar la serie de datos de cada ensayo con tres tramos de rectas. En la **Figura 3** se muestran estas aproximaciones, los parámetros de las rectas de ajuste (ver la pendiente) y el valor del parámetro indicativo de la bondad de la aproximación R<sup>2</sup>.

Los valores de las pendientes n obtenidas se ilustran en la **Tabla 5**:

	Valores de n		
	n1	n2	n3
Al ER-250	9.3	32.4	17.5
Al AM-220	24.9	28.1	13.7
Al AM-250	10.4	32.0	10.2
Al AM-280	16.0	33.3	12.4

**Tabla 5.** Valores de n, aproximación trilineal.

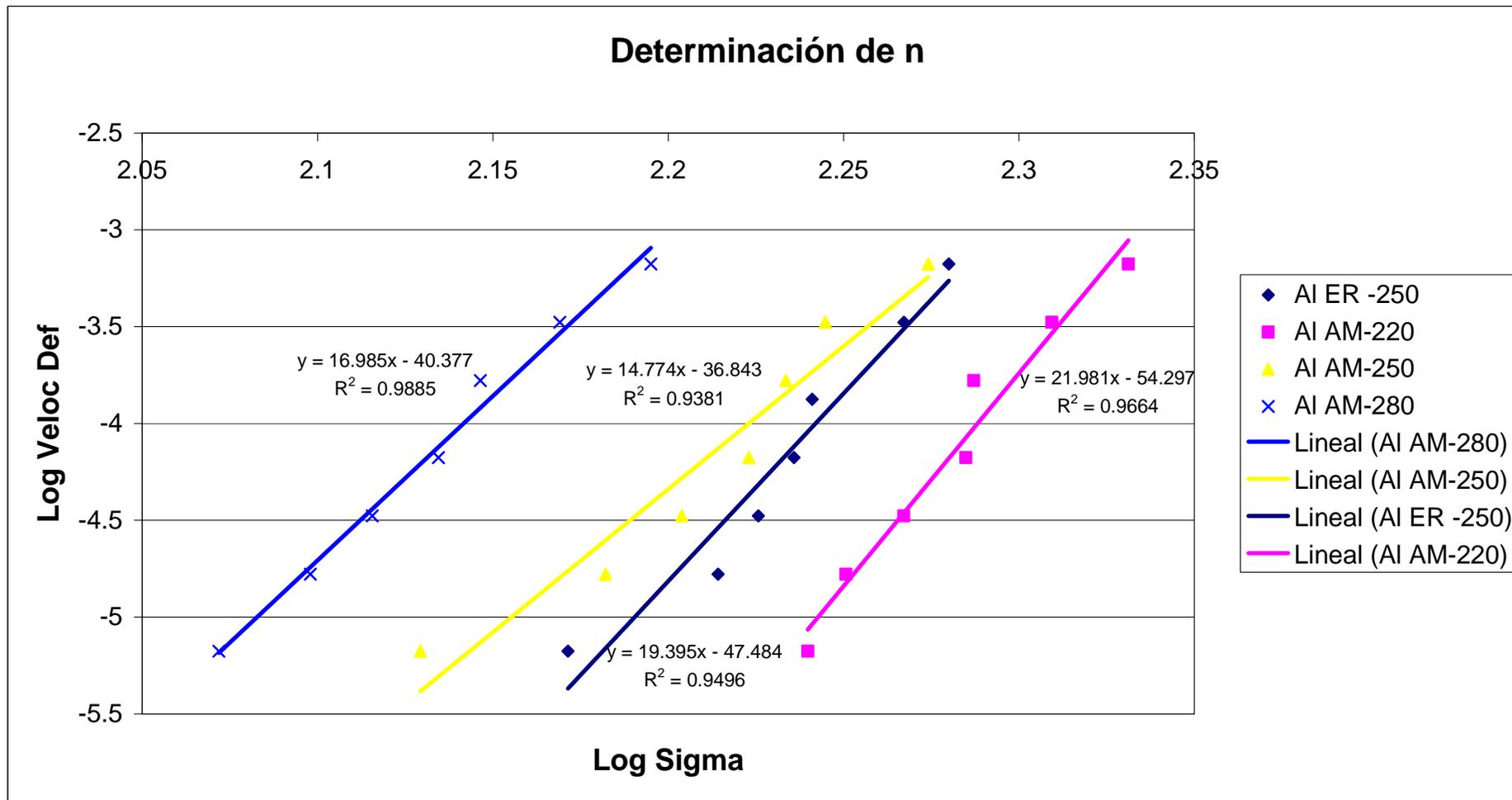


Figura 2. Aproximación lineal: un solo mecanismo de deformación.

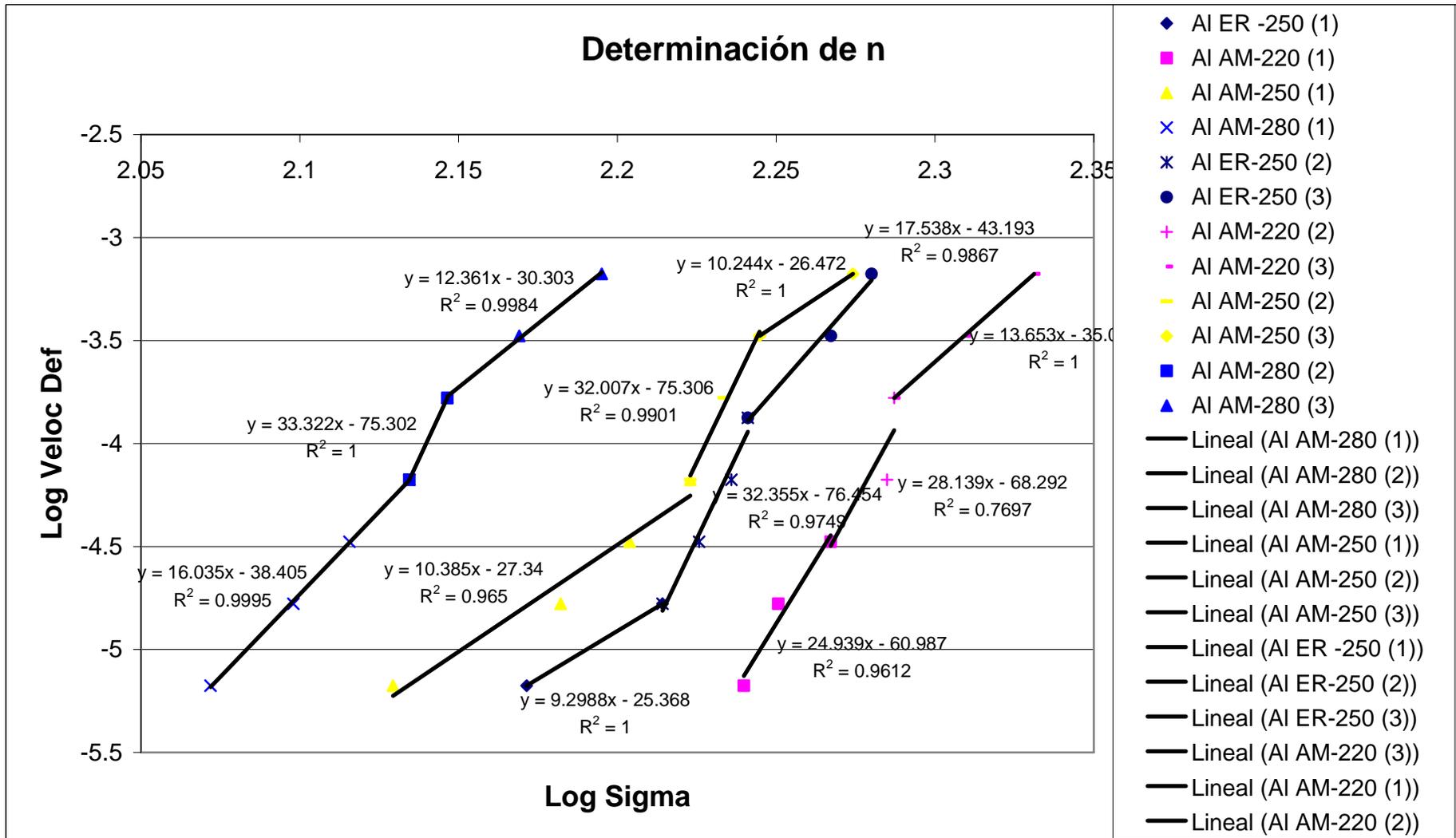


Figura 3. Aproximación triple lineal: tres mecanismos de deformación.

Se observa en las figuras anteriores (**Figura 2** y **Figura 3**) que aparecen tres etapas distintivas de mecanismos de creep. Para establecer el origen y la naturaleza de tales mecanismos no basta con realizar pruebas de carácter mecánico, que además deberían de ser más exhaustivas y precisas de las que aquí se han realizado, sino que habría que hacer estudios microestructurales durante diferentes etapas de deformación del material. Estos estudios “completos” deberían ser específicos sobre una sola temperatura y abarcar un rango completo (7 ordenes de magnitud) de velocidad de deformación, según lo publicado por F.A. Mohamed y otros autores [2, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 19].

En cuanto a la incorporación de la tensión umbral, para los datos obtenidos experimentalmente, no se aprecia que ésta tenga influencia. Al intentar aproximar los datos con la ecuación que incluye la tensión umbral se obtenían resultados sin sentido. Además parece que no existe tensión umbral porque, tal y como se ha comprobado, al representar los resultados en escala doblemente logarítmica estos se alinean en diferentes rectas/mecanismos, y no se produce la curvatura característica de la existencia de tensión umbral.

En las siguientes figuras se muestra un ejemplo característico de existencia de tensión umbral. Ocurre que los datos no se alinean al representarlos en escala doblemente logarítmica, sino que se curvan (**Figura 61 a**). Ello hace que el valor aparente del parámetro  $n$  aumente al disminuir la tensión aplicada (**Figura 61 b**).

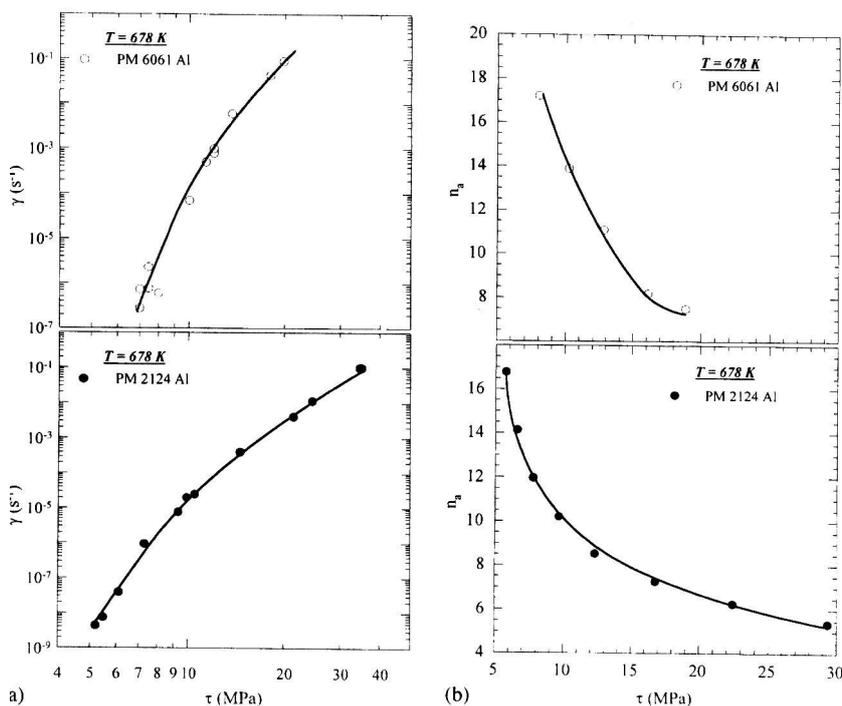


Figura 4. Aparición de tensión umbral.

### 1.3. RESULTADOS DE OTROS AUTORES.

Los materiales ensayados por otros autores no son los mismos, bien porque son aleaciones de distinta composición química, o porque el proceso de obtención del material ha sido diferente. Además, los rangos de temperatura y tensión de las sucesivas experiencias de estos autores no coinciden exactamente con las se han empleado en este proyecto. También hay que considerar que el método de ensayo utilizado en nuestras experiencias no ha sido, quizás, el más convencional.

Así Myshlyaev [16] realizó experiencias con Al puro (99.99% de Al) y Al comercial (99.3% de Al), obtenidos por técnicas no pulvimetalúrgicas. Las probetas tenían forma cilíndrica o de láminas planas de 22x6x0.15 mm<sup>3</sup>. Previamente a los ensayos, las probetas se sometían a un recocido en vacío durante 1 hora a 680 °C. El rango de temperaturas ensayadas abarca desde la temperatura ambiente hasta los 400 °C y las tensiones empleadas estaban en torno a 40 y 50 MPa.

Los resultados que obtuvo este autor situaban la energía de activación de termofluencia en torno a los 150 kJ/mol, obteniendo para el exponente de tensiones valores de 4.3 a 4.9.

Otros autores han realizado experiencias con materiales obtenidos por técnicas pulvimetalúrgicas. Así, Hawk [17] realizó ensayos de termofluencia con Al 12.6Mn-4.8Si. Los compactos se obtuvieron con un primer prensado a 207 MPa, sinterización en horno durante 6 horas, (las 3 primeras de aproximación a los 427 °C). Reprensado a 1087 MPa y posterior extrusión a 398 °C. La duración de sus ensayos fue del orden de las 100 horas, a unas temperaturas de entre 300 y 450 °C.

Hawk [17] obtuvo que la energía de activación de termofluencia varía para distintos rangos de temperatura; así para el rango de temperaturas de 280 °C – 330 °C se ha obtenido una energía de activación de termofluencia en torno a 105 kJ/mol. En cambio, para el rango de temperaturas de 340 – 380 °C se obtuvo una energía de activación de termofluencia superior a 200 kJ/mol. En cuanto al exponente, se ha obtenido un valor que oscila entre 3.6 y 4.5, que son valores cercanos a los que hemos obtenido en nuestro proyecto.

Hawk [18] también realizó experiencias con otros autores con materiales de base Aluminio y Ti y otros elementos como aleantes, aleados mecánicamente. Las probetas que utilizó eran obtenidas por extrusión, y con un mecanizado posterior. El procedimiento experimental consistía en someter durante 2 horas y 30 minutos la probeta a la temperatura de trabajo. Las temperaturas de trabajo son superiores a los 400 °C y el tiempo de duración de los ensayos es superior a las 100 horas. En cuanto a los resultados obtenidos, hay que decir que se han obtenido energías de activación de termofluencia superiores a los 200 kJ/mol y exponentes de tensiones de entre 3 y 5.5.

Más recientemente Li et al [4] han ensayado la aleación 2124 Al pulvimetalúrgica a temperaturas entre 345 y 405 °C. La configuración del ensayo era tal que se sometía la probeta a tensión tangencial, obteniéndose diversas ventajas. La primera es que al no producirse cambios de volumen en esta configuración, solo de forma, no se produce la estricción y una velocidad de deformación constante se traduce en una velocidad constante de desplazamiento de los cabezales. Además la probeta se deforma más antes de romperse. En estos ensayos se observó la existencia de la tensión umbral descrita,

variando el valor del exponente de tensión aparente de 1 a 16 y el real de 4.5 a 5. La energía de activación aparente era de 60 – 280 kJ/ mol y la real de 27.5 kJ /mol.

En los ensayos realizados por F. A. Mohamed [5] sobre la aleación pulvimetalúrgica 6061 Al, también realizados a cortadura y apreciándose la existencia de tensión umbral, la temperatura de ensayo era de 375 – 405 °C y la tensión de 1 – 15 MPa. La energía de activación aparente resultó variar entre 200 y 600 kJ/ mol, oscilando realmente entre 147 y 180 kJ /mol. En cuanto al exponente de tensiones variaba el aparente entre 8 y 17. El real resulto ser 3 o 5 (en función del mecanismo predominante).

Los resultados obtenidos en el presente estudio hacen suponer, por los altos valores de exponentes de tensiones, entre 10 y 30 que existe una tensión umbral que modifica la Ley Potencial del Creep. Sin embargo los ajustes intentados para obtener el valor de la energía de activación daban resultados no posibles y muy variables no dependiendo adecuadamente con la temperatura.

Un resumen de todos estos estudios se muestra en la **Tabla 6**.

Autor	Material	Rango de $T$ (°C)	Rango de $\sigma$ (MPa)	$Q_c$ (kJ/mol)	$n$
Myshlyayev [16]	Al	25 - 400	40 - 50	150	4.3-4.9
Hawk [17]	Al 12.6Mn-4.8Si	300 - 450	10 - 200	105 - 200	3.6-4.5
Hawk [18]	Al - Ti	> 400	30 - 100	200	3-5.5
Li, Nutt, et Al.[4]	PM 2124 Al	345 - 405	5 – 40	27.5	4.5 – 5
				60 280	1 - 16
F .A. Mohamed [5]	PM 6061 Al	375 - 405	1 - 15	147 – 180	3 – 5
				200 - 600	8 - 17
E.M. Esquinas Navas. [3]	Al ER y Al AM	150 - 300	15 - 150	50 - 100	4.3-5
Presente estudio	Al ER y Al AM	220 – 280	120 – 215	Datos no validos	10 - 30

**Tabla 6.** Resultados de otros autores.

## **2. MÁQUINA DE CREEP.**

Tal y como se especificó en la introducción, uno de los objetivos del presente proyecto es establecer las características básicas que debe reunir una máquina de creep para poder realizar ensayos en el laboratorio del grupo. Puesto que la misma se va a utilizar para el desarrollo de investigaciones, interesa que sea una máquina versátil, en cuanto a la variedad de materiales que se puedan ensayar y en lo que a rangos de temperatura y carga aplicables se refiere. Además de fiabilidad, sencillez en operación y fácil mantenimiento.

Se contactó con diferentes proveedores nacionales (IBERTEST), europeos (ZWICK-ROELL, INSTRON) y americanos (APPLIED TEST SYSTEMS) que presentaron sus ofertas para nuestra solicitud. Para ello, previamente, hubo que establecer las características básicas que tendría dicho sistema de ensayos.

### **2.1. REQUISITOS BÁSICOS.**

Como punto de partida se decidió que el tipo de materiales a ensayar serían de base aluminio, pudiéndose extender a otro tipo de materiales como titanio o aceros en un futuro, si fuese necesario.

El tipo de probeta que se utilizaría sería el mismo que se viene utilizando en el laboratorio, puesto que éste se obtiene mediante pulvimetalurgia y, emplear otro tipo de probeta llevaría a la fabricación de un nuevo molde y la utilización de unas cargas de prensado diferentes. Ese hecho planteó algunas dificultades puesto que es común la utilización para el creep de probetas cilíndricas con unas entallas exteriores recrecidas para la fijación del extensómetro. En nuestro caso, la fabricación mediante prensado, inherente a la pulvimetalurgia, junto con el hecho de evitar un mecanizado posterior para no afectar a la superficie (tensiones residuales de mecanizado), hace que se opte por probetas planas. Por ello nos quedamos con el modelo que se viene utilizando en el laboratorio.

Se revisó la literatura existente sobre el creep de aluminio y sus aleaciones de manera que se establecieran unos rangos de temperatura y de cargas tales que se abarcasen los mecanismos y sistemas de termofluencia más interesantes.

Por otra parte, al ser de una elevada duración estos ensayos, sería muy interesante que la máquina permitiera ensayar varias probetas, con diferentes condiciones, simultáneamente.

También son importantes el sistema de extensometría que utiliza la máquina y la fijación de la probeta a las mordazas, aspecto este último crítico, puesto que pueden producirse problemas de gripado o de deslizamiento a elevadas temperaturas.

En principio se solicitó que la máquina permitiese ensayar **probetas planas**, con una longitud calibrada de **25mm** y una deformación máxima del **40%**. El rango de tensiones entre **0,1 kN y 5kN** (con la máxima precisión en dicho rango) y una temperatura de ensayo entre **100 y 400 °C**, pudiéndose, posteriormente, aumentar las prestaciones y versatilidad de la máquina siempre que fuese posible.

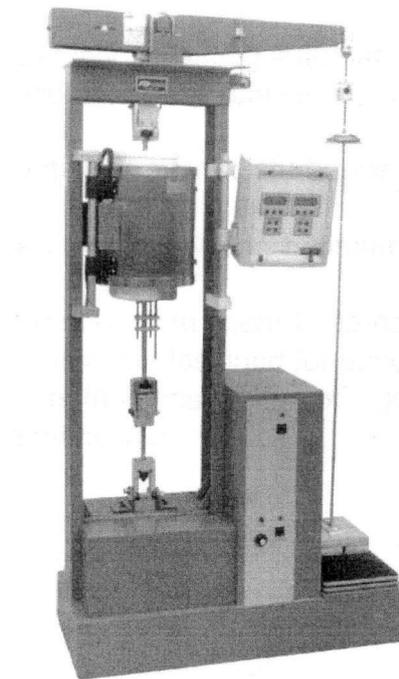
## 2.2. CARACTERÍSTICAS DE LA MÁQUINA ADQUIRIDA.

Se optó finalmente por un sistema de ensayos de APPLIED TEST SYSTEMS por la versatilidad del equipo que ofrecían y por ser, con una notable diferencia, el proveedor que disponía de una mayor experiencia en la construcción de máquinas para ensayos de creep. De hecho esta empresa tiene en internet un catálogo con las diferentes familias y modelos de máquinas de creep de que dispone. Por nuestras necesidades nos decidimos por las *Lever Arm Creep Testing Systems*, que se caracterizan por utilizar pesos muertos y transmitir la carga a la probeta mediante un brazo de palanca. Una de estas máquinas se ilustra en la **Figura 5**.

Este tipo de máquinas son, probablemente, las más ampliamente utilizadas y versátiles de las que se encuentran en el mercado actual. Son, además, robustas y de una excelente precisión y fiabilidad.

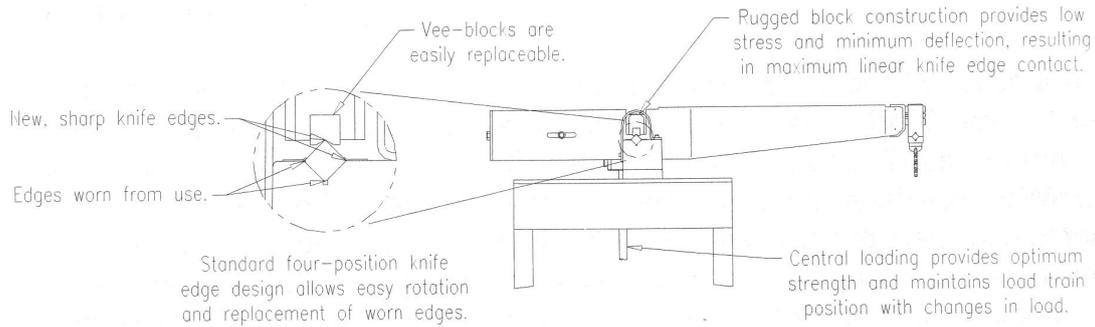
Se basan en la utilización de una palanca con una relación que oscila, en general, entre 3:1 y 50:1 (*ratio*) que multiplica la fuerza ejercida por unos pesos. Para minimizar

el rozamiento y tener la máxima precisión en el giro de la palanca, ésta tiene una pieza en con forma de V que gira sobre una arista de otra pieza solidaria al bastidor. Ambas piezas están fabricadas con acero de herramientas pero se deterioran con el uso, aunque son fácilmente reemplazables. Esto se ilustra para mayor claridad en la **Figura 6**.



**Figura 5.** Máquina de creep de brazo de palanca.

Con el presupuesto disponible se pudieron comprar dos de estas máquinas con diversos componentes y accesorios cuyas características se describirán en los párrafos siguientes.



Standard Lever Arm Design Features

**Figura 6.** Detalle de la palanca.

1. Dos bastidores y palancas equilibradas modelo 2330SR (ver **Figura 7**) con ratio 3:1, con ajustador de precisión de la relación de brazo y placa con aristas para el apoyo de la palanca. Capacidad de carga de 150 a 1500 lb (0.667 a 6.67kN). Dimensiones aproximadas 42 x 20 x 92 in.
2. Un controlador, válido para dos máquinas (WINCCS II Dual Frame Controller), con pantalla para operación, control de los cabezales, 8 entradas de señales de termopares tipo K y dos entradas de extensómetros de alto nivel y controladores para hornos de tres zonas.
3. Dos pares de acopladores de arista de cuclillo serie 4021 de 53,4 kN con conexiones  $\frac{3}{4}$ -10-2B x  $\frac{3}{4}$ -10 de rápida cambio, en plated steel.
4. Dos pull rod (transmisión de carga) superiores serie 4043 de acero MAR-M246 de  $\frac{3}{4}$  in de diámetro y 10- $\frac{3}{4}$  de longitud, con rosca  $\frac{3}{4}$ -10-2A x 1  $\frac{1}{4}$  in de long. en ambos extremos.
5. Dos pull rod (transmisión de carga) inferiores serie 4043 de acero MAR-M246 de  $\frac{3}{4}$  in de diámetro y 20 in de longitud, con rosca  $\frac{3}{4}$ -10-2A x 1  $\frac{1}{4}$  in de long. en ambos extremos.
6. Cuatro mordazas roscadas serie 4031A de material MAR-M246 con rosca  $\frac{3}{4}$ -10-2B x  $\frac{1}{2}$ -13-2B.

7. Cuatro mordazas de ranura, con 3mm de profundidad de ranura y 6mm de diámetro, rosca  $\frac{3}{4}$ -10-2B y material MAR-M246.
8. Cuatro mordazas de cuña, válidas para probetas de 0,109 a 0,141in. de espesor y hasta 1in de anchura. Rosca  $\frac{3}{4}$ -10-2B y material MAR-M246/247.
9. Dos hornos divididos serie 3210, de 3 in. de diámetro interno, 10 de externo y 16 in de altura. Resistencia calentadora con devanado de Kanthal A1 hasta 1205 °C. División en tres zonas, cada una de ellas con 4in de longitud de zona de calefacción. Potencia de 880w / 3,8A por zona, es decir, 2640W a 230V de alterna, monofásico y 50/60Hz. Calibre terminales: superior 1 in e inferior 3 in. Casquetes de terminación de 1 ½ de espesor: el superior de  $\frac{3}{4}$  in de diámetro interno y el inferior recortado para la colocación del extensómetro. Apto para utilizar con el sistema WINCCS II.

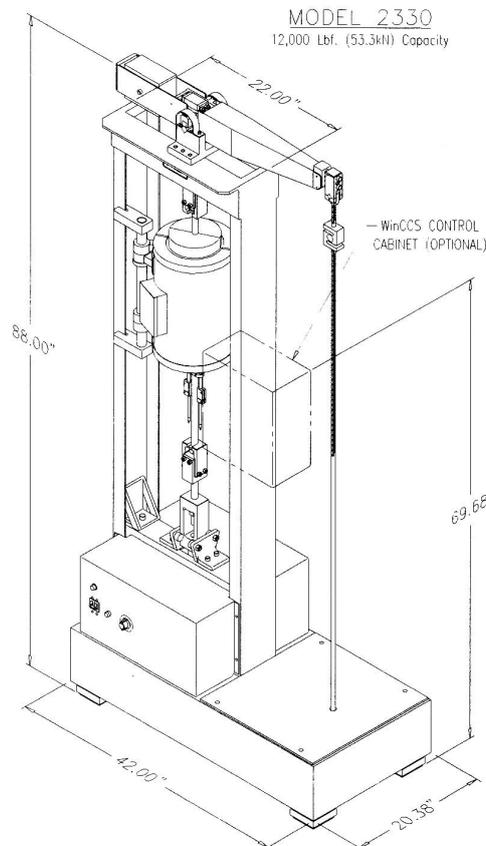


Figura 7. Máquina modelo 2330.

10. Dos controladores de temperatura serie AB 900-TC16 para utilizar con el sistema WINCCS II.
11. Dos extensómetros de promedio serie 4124A. Cada uno de construcción en doble tubo con capacidad para dos transductores de desplazamiento. Longitud calibrada de probeta ajustable de 0,5 a 4 in. Cabezales con inserciones intercambiables. Temperatura máxima de operación 1100°C. Materiales Inconel 600/601, Inconel 718 y MAR-M246.
12. Dos recambios de cabezales para probetas planas para espesor de 1,5 mm a 2,5 mm y hasta 19mm de ancho. Material MAR-M246
13. Un pack para la transmisión de las señales de los extensómetros (válido para dos *frames*), con 4 encoders lineares con un rango de medida de 12mm y una precisión de +/- 0.2µm y una tarjeta acondicionadora de señal.
14. Un transductor de desplazamiento, con resolución de 1µm.
15. Un pack para realizar ensayos de relajación de tensiones o a tensión constante. Válido para 2 frames, controlado por software. Contiene un relé de control de motor, una célula de carga de 2,2 kN y acondicionadores de la señal de la célula de carga.
16. Dos kit para carga directa, que incluye componentes para convertir la máquina en una de carga directa (sin palanca), para ensayar con cargas muy bajas. Capacidad de 44,5 a 800,7 N
17. Ordenador con software y todos los elementos requeridos para manejo y control del sistema de ensayos.
18. cable para termopares tipo K. Bobina de 100ft.
19. Ocho conectores de termopares tipo K.
20. Pack de 100 boquillas rápidas de termopares.

## 21. Herramienta para boquillas rápidas de termopares.

En resumen, esta máquina permite realizar los siguientes ensayos:

- Tipos de ensayos: convencionales de creep (mantener la fuerza), creep a tensión constante (tiene en cuenta la reducción de la sección), ensayos de relajación de tensiones, ensayos de creep con carga en escalón...
- Rango de tensiones: desde 40 N (utilizando el kit de carga directa para bajas tensiones), hasta 6,67 kN.
- Rango de temperaturas: desde 100 °C a 1100 °C.
- Precisión de 1µm en la medida de deformación.
- La máquina cumple todos los requisitos para realizar ensayos conforme a la norma ASTM [20].