

CAPÍTULO III. MATERIAL Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

1. MATERIAL.

1.1. POLVO DE ALUMINIO EXPERIMENTAL.

Para este proyecto se ha empleado polvo de aluminio en estado de recepción Al (0,15) E.R, en adelante polvo de aluminio elemental, de pureza nominal superior al 99.5%. Este polvo está fabricado por la empresa *ECKART-WERKE* (Alemania), mediante la técnica de atomización con aire comprimido del aluminio fundido.

El polvo es designado comercialmente como *ECKA Aluminium* tipo *AS61* y presenta como principal impureza el hierro, y que, según análisis químico del *Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial*, Madrid, es de 0.15% (no se menciona el porcentaje en peso de otros elementos).

Las características de este polvo obtenidas en pruebas previas en este Departamento se muestran en la **Tabla 1**

PROPIEDAD	RESULTADO
Forma de la partícula	Irregular
Porcentaje de partículas con tamaño a 125 μm .	99.4%
Densidad absoluta (g/cm^3)	2.70
Densidad aparente (g/cm^3)	0.97 (35.92%)
Densidad de golpeo (g/cm^3)	1.50 (55.56%)
Fluidez	No fluye libremente
Tamaño medio de partícula	< 44 μm
HV _{0.02} (Kp/mm^2)	23 \pm 1

Tabla 1. Características del polvo de aluminio en estado de recepción.

1.2. MORFOLOGÍA Y MICROESTRUCTURA DEL POLVO.

La morfología del polvo de aluminio elemental, Al (0.15), (menor de 325 mallas ASTM) se ilustra mediante microscopía SEM, en la **Figura 39**. En ella puede observarse su morfología irregular, en forma dendrítica, con tamaño de partícula no uniforme.

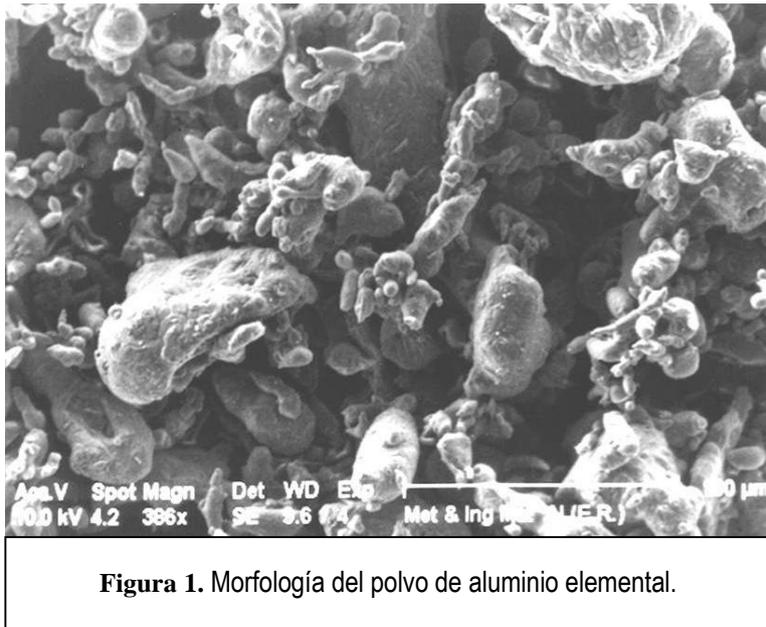


Figura 1. Morfología del polvo de aluminio elemental.

Puede apreciarse la existencia de una cierta rugosidad superficial, motivada por la presencia de una especie de escamas en la superficie de las partículas.

En las **Figura 2** y, **Figura 3** se representa la microestructura del polvo de aluminio elemental. En ellas, puede apreciarse, una forma microestructural del tipo dendrítica formada por granos de forma poligonal.

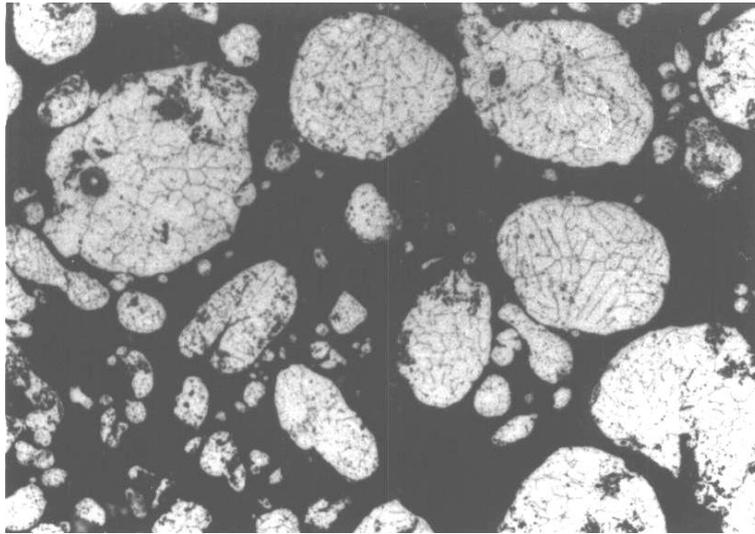


Figura 2. Microestructura del polvo de aluminio elemental.

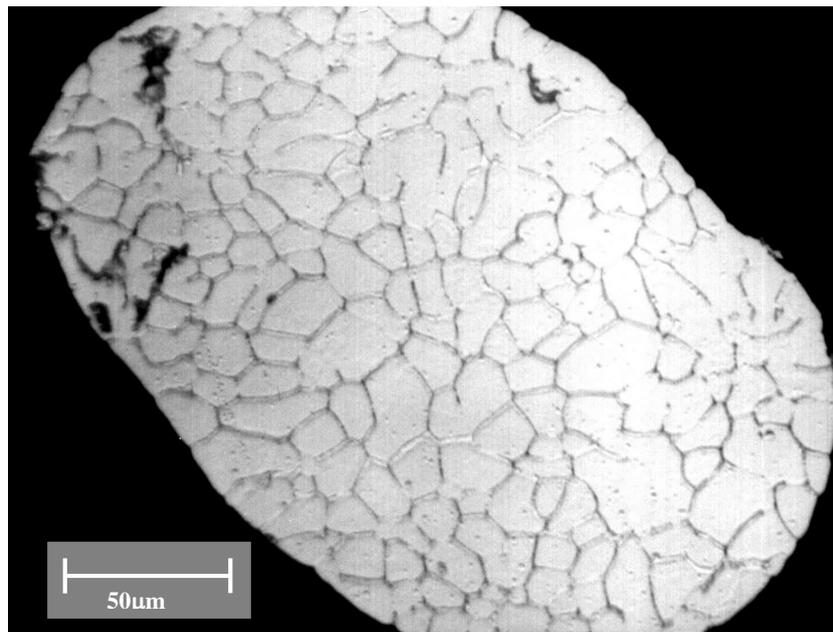


Figura 3. Microestructura del polvo de Al elemental (1000X).

1.3. GRANULOMETRÍA.

La distribución de tamaños del polvo de aluminio elemental se muestra en la **Figura 4** y la **Tabla 2**.

TAMIZ	INTERVALO DE TAMAÑOS, (μm)	MASA EN INTERVALO, (%)	MASA ACUMULADA (%)
Fondo	-44	59.44	59.44
325	44-62	18.56	78.00
230	62-105	21.36	99.36
140	105-149	0.48	99.84
100	149-177	0.06	99.90
80	177	0.1	100.00

Tabla 2. Granulometría del polvo de aluminio en estado de recepción.

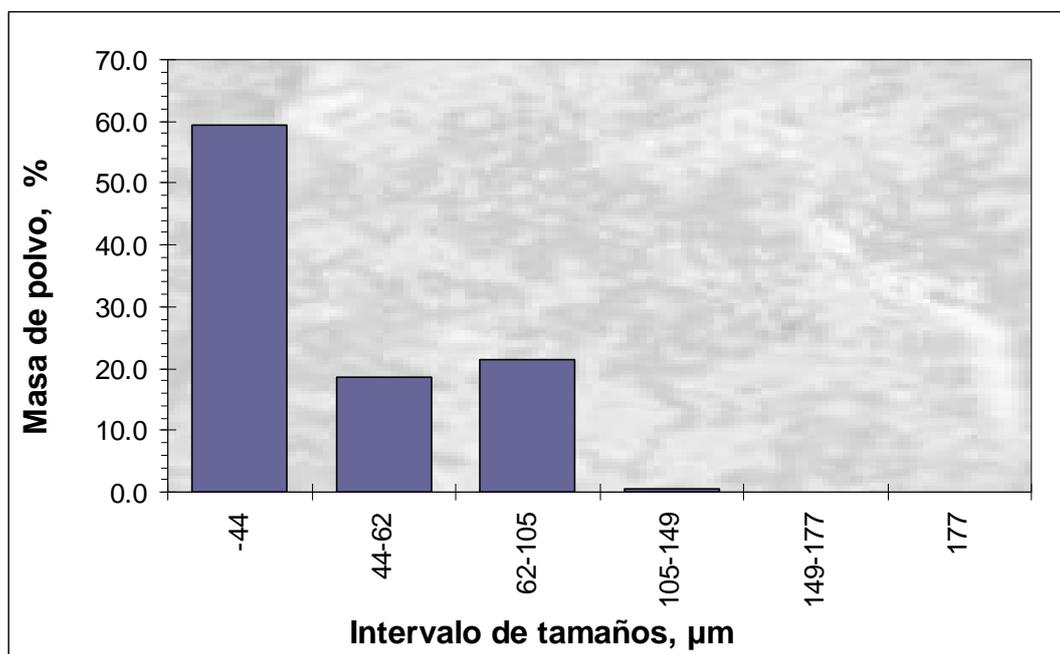


Figura 4 Distribución granulométrica del polvo de aluminio elemental, expresada como Masa de polvo (%) retenida entre dos tamices consecutivos.

En la **Figura 5**, se ha representado la distribución granulométrica acumulada.

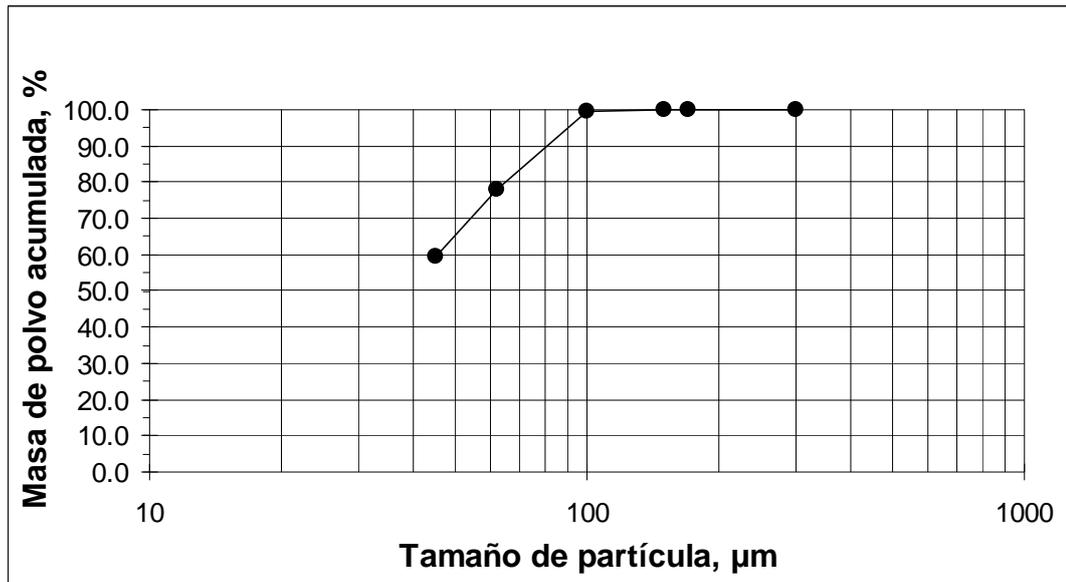


Figura 5. Distribución granulométrica acumulada del polvo de aluminio elemental.

De la observación de las figuras anteriores se desprende que el tamaño medio de partícula es inferior a 45 μm , obteniéndose que el 99.90% de la masa de polvo es menor de 177 μm , el 99.36% menor de 105 μm , y el 59.44% inferior a 45 μm . Estos resultados son muy similares a los suministrados por *ECKART*.

1.4. CERA EN POLVO.

Como agente controlador del proceso (A.C.P.), y para la lubricación de las paredes de prensado, se ha utilizado la Cera Micropolvo C-PM, para pulvimetalurgia de *HOECHST* (etilen bis-estearil-amida).

Se trata de una cera comúnmente empleada en pulvimetalurgia por sus buenas propiedades como lubricante y porque tiene la característica de que se volatiliza el 100% por debajo de los 500°C, sin depositarse en las paredes del horno o en otros conductos. Durante la molienda, la cera reacciona con las partículas del polvo, evitándose así la soldadura de estas con las piezas del molino y, por tanto, los problemas que ello conllevaría. Por tanto, es utilizada como A.C.P. de “fractura-soldadura”.

En la **Tabla 7** se muestran las principales propiedades de la cera empleada, así como su fórmula química.

Propiedad	Resultado
Densidad a 20°C, g/cm ³	1
Densidad aparente, g/cm ³	0.3
Tamaño máximo, μm	40
Tamaño medio, μm	15
Composición química	H ₃₅ C ₁₇ CONHC ₂ H ₄ NHCOC ₁₇ H ₃₅
Comportamiento termogravimétrico	100% a 500°C

Tabla 3. Principales propiedades de la cera micropolvo CPM para pulvimetalurgia de Hoechst.

1.5. POLVO DE ALUMINIO ALEADO MECÁNICAMENTE (Al-AM).

El otro material ensayado en este proyecto es el Aluminio Aleado Mecánicamente (Al AM), mediante moliendas con las especificaciones ya se detallarán posteriormente en el apartado de Procedimiento Experimental.

El polvo Al(0.15) AM, y que en lo sucesivo denominaremos Al AM, ha sido obtenido mediante molienda de 10h del polvo de Al(0.15) ER en un molino tipo Atritor, tal y como se describe en el referido apartado.

La composición química mayoritaria del polvo aleado mecánicamente, es decir, tras la molienda en el molino de alta energía es similar a la del polvo de aluminio en estado de recepción Al(0.15) ER, con pequeños cambios determinados por dicha molienda.

El polvo no presenta ningún olor característico y posee una coloración metálica. Las características del polvo se presentan a continuación.

1.6. MORFOLOGÍA Y MICROESTRUCTURA DEL POLVO.

La morfología del polvo de aluminio aleado mecánicamente, Al AM, se ilustra mediante microscopía SEM en la **Figura 6**. En ella puede apreciarse la existencia de una morfología mucho más regular que en el caso del aluminio elemental, con una distribución de tamaños más uniforme, aunque mayor, y partículas de forma equiaxial relativamente esférica.

La microestructura se muestra en la **Figura 7**. En ella se puede ver que ha desaparecido completamente la forma microestructural del polvo original, de tipo dendrítica, siendo reemplazada por una dispersión homogénea de, presumiblemente, partículas de alúmina y carburo de aluminio lo cual es una cualidad que debe reunir un polvo al alcanzar el aleado mecánico. No obstante, el polvo aleado mecánicamente tiene unas características submicroestructurales que han de ser puestas de manifiesto por microscopía electrónica de transmisión (TEM).

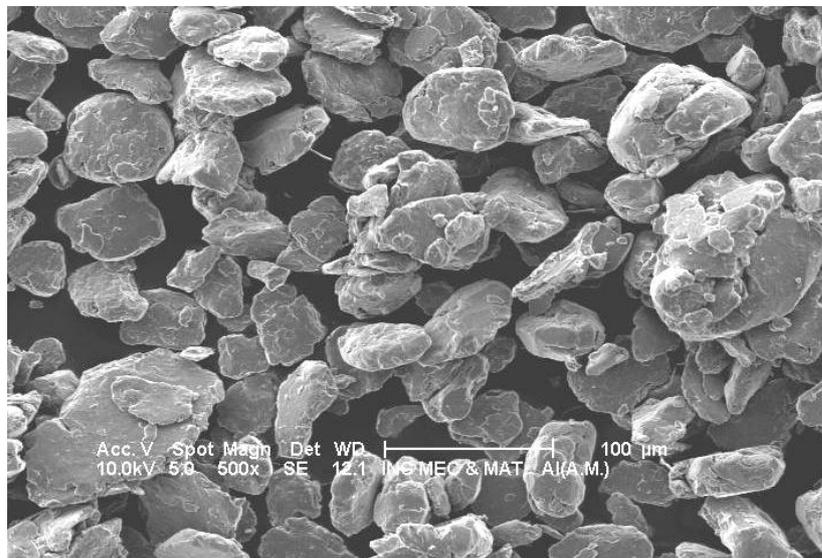


Figura 6 Morfología por microscopía SEM del polvo de Al AM.

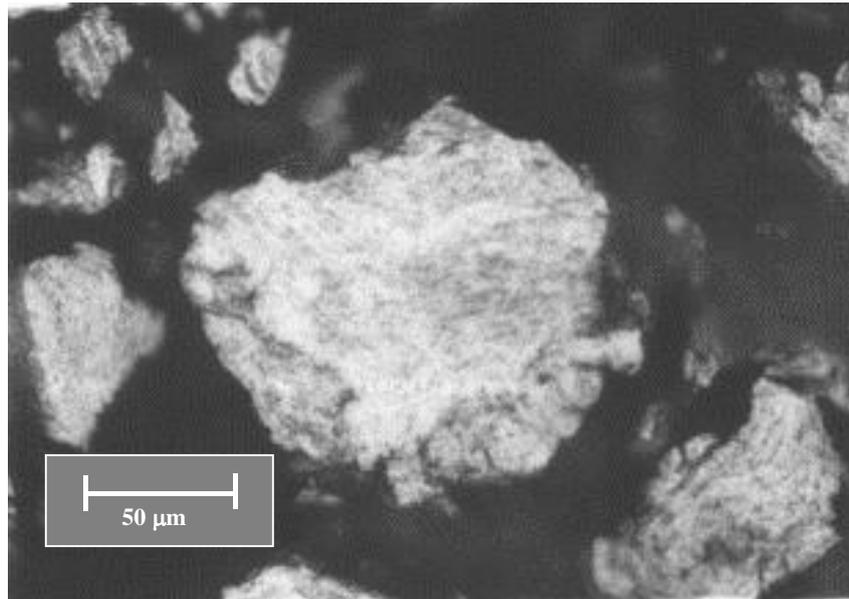


Figura 7 Microestructura del polvo de Al AM.

1.7. GRANULOMETRÍA.

La distribución de tamaños del polvo de Al AM se muestra en la **Tabla 4** y en la **Figura 46**.

TAMIZ	INTERVALO DE TAMAÑOS, (μm)	MASA EN INTERVALO, (%)	MASA ACUMULADA (%)
Fondo	-44	23.26	23.26
325	44-62	24.77	48.03
230	62-105	43.59	91.63
140	105-149	7.28	98.91
100	149-177	0.50	99.41
80	177	0.59	100.00

Tabla 4. Granulometría del polvo de aluminio aleado mecánicamente.

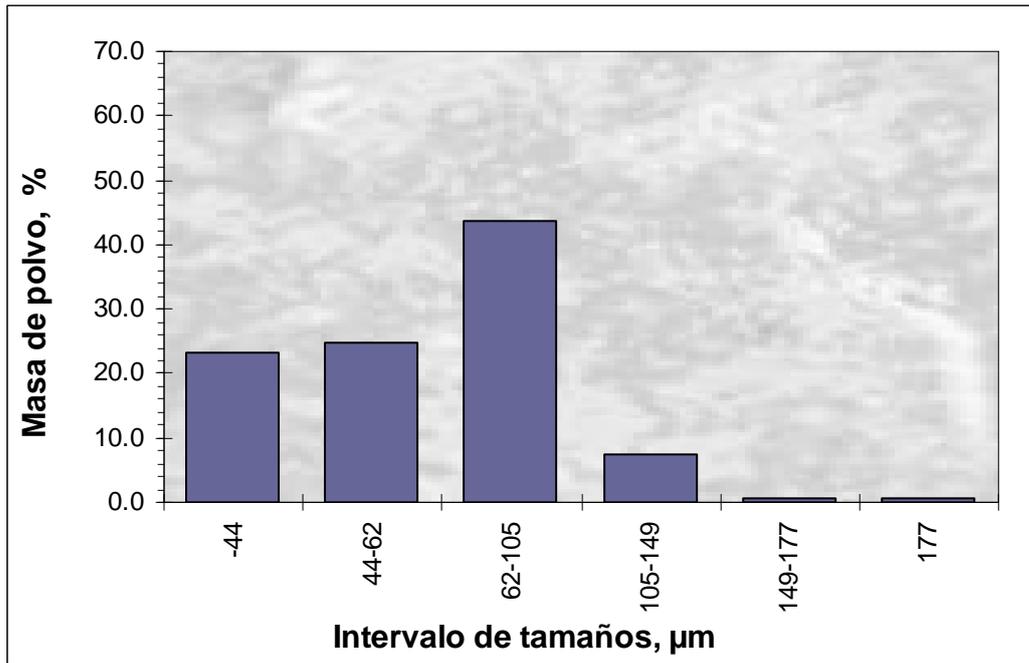


Figura 8. Distribución granulométrica del polvo de Al AM, expresada como Masa de polvo (%) retenida entre dos tamices consecutivos

En la Figura 9, se ha representado la distribución granulométrica acumulada. Sobre dicha figura se ha calculado el diámetro medio.

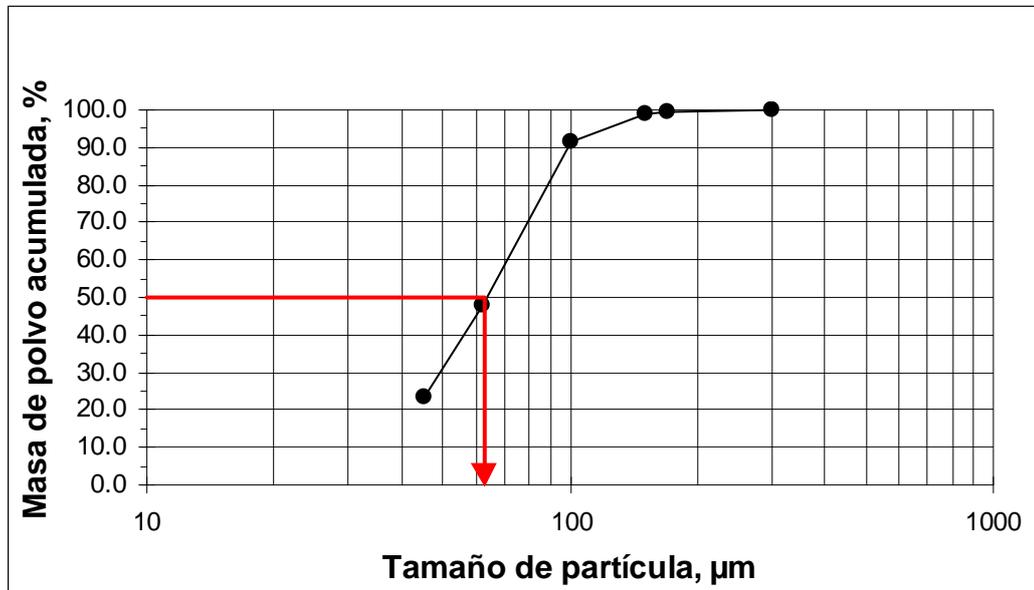


Figura 9. Distribución granulométrica acumulada del polvo de Al AM, que muestra la estimación del diámetro medio.

De la figura puede apreciarse que el tamaño medio de partícula es de 64 μm , aproximadamente, obteniéndose además, que el 99.41% de la masa de polvo es inferior a 177 μm , el 91.63% inferior a 105 μm , y el 23.26% inferior a 44 μm .

2. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

2.1. MOLIENDA.

En el proceso de *aleado mecánico* una carga conveniente de polvo es introducida en un molino de alta energía, además de una carga de bolas (generalmente, de acero endurecido), haciéndolo girar durante un cierto tiempo y a una velocidad determinada. En este proyecto se ha utilizado un molino vertical de bolas tipo *Attritor*, tal como el patentado por Szegvari, que puede producir volúmenes moderados de material, en tiempos moderados (del orden de horas). En este aparato, las bolas y la carga de polvo son mantenidas en un recipiente vertical estacionario y son agitadas por un rotor con brazos radiales.

El molino *Attritor* fue adquirido a la empresa *UNION PROCESS* (Ohio, USA), consta de un motor de 1/4 HP con variador continuo de velocidad entre 0-650 rpm y puede verse en la **Figura 10**.

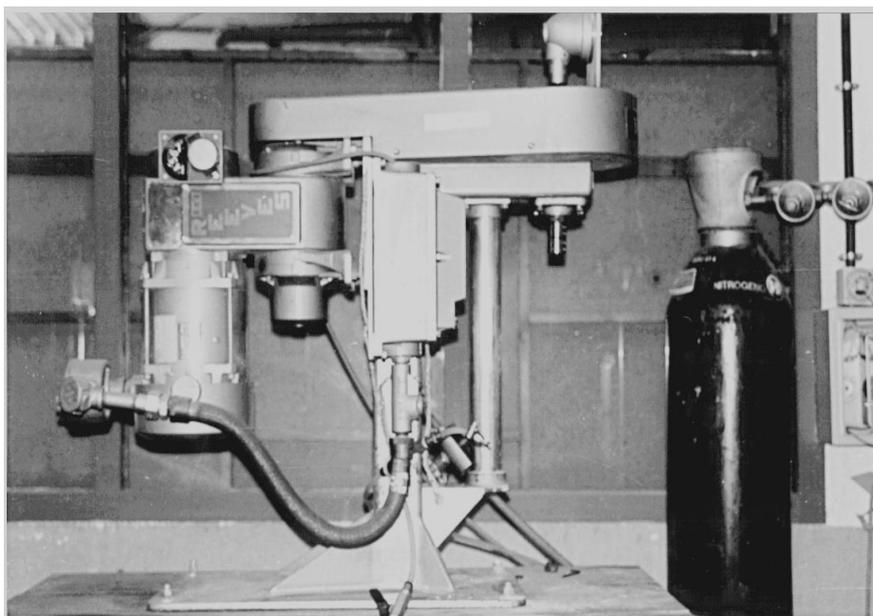


Figura 10. Molino tipo Attritor empleado en la molienda de los polvos.

La vasija es de 750 cm³ en acero inoxidable y tiene una camisa para su refrigeración por agua u otros líquidos. La vasija va cerrada por una tapadera especial con junta y cierre mecánico *MECO* para el árbol de agitación. El agitador es de acero inoxidable con los brazos de "colmonoy". Dispone de un tacómetro.

Las bolas de molienda son de Ø 4.65 mm en acero al cromo níquel, empleadas en rodamientos de bolas, y se ajustan a las especificaciones DIN 1.3505 y AISI E52 100 ó equivalentes. Comercialmente se pueden encontrar, entre otras, con las denominaciones SKF-3 o Rodfor (Forjas Alavesas).

2.1.1 DESCRIPCIÓN DE UNA MOLIENDA

El proceso empleado consta de los siguientes puntos:

1. Carga y puesta en funcionamiento del molino

Una de las variables en la molienda es la relación de carga de bolas a carga de polvos, denominada R. El fabricante recomienda que se emplee una carga de bolas de 1.800 g como máximo, para hacer la molienda más efectiva. Para obtener, lotes de polvo molido lo más grande posible, se ha empleado una relación de carga R=50:1. Por otra parte se ha utilizado, en todos los casos, un 3% de agente controlador del proceso (A.C.P.) muy importante, entre otras razones, para controlar la tendencia a la soldadura del aluminio en la molienda. En la **Tabla 9** se presentan las condiciones que se han empleado en las experiencias de molienda. En las pesadas de los polvos, tanto de aluminio como del A.C.P., se ha empleado una balanza Mettler PB 300 con apreciación de centésimas de gramo.

Propiedad	Valor	Unidad
Volumen Vasija	750	[cm ³]
Velocidad	500	[rpm]
Tiempo	10	[h]
Atmósfera	Vacío	—
Relación C _B / C _P	50:1	—
Carga de Bolas	3600	[g]
Carga de A.C.P.	2.16	[g]
Carga de Al (C)	69.84	[g]
Refrigeración	Agua a 15°C	—

Tabla 5. Condiciones de la molienda.

Esta etapa del proceso consiste en verter las bolas en la vasija del molino y, a continuación el agente controlador del proceso (A.C.P.). Situar la vasija en el molino, cerrándola convenientemente, y poner en funcionamiento la refrigeración de la vasija, que no se interrumpirá en toda la molienda.

2. Impregnación de las bolas con el A.C.P.

Se pone en funcionamiento el molino y se sube gradualmente la velocidad hasta 300 rpm, manteniéndola así durante 5 minutos.

3. Molienda

Transcurrido el tiempo anterior se añade, por una abertura de carga superior en la tapa de la vasija, la masa de polvo de aluminio que se ha pesado con anterioridad. Se sube la velocidad de giro de molino hasta la empleada en la experiencia, manteniéndola hasta la finalización de la molienda (durante 10 horas).

4. Apertura del molino

Una vez finalizada la molienda, para prevenir una reacción violenta del polvo de aluminio molido con el aire, que ha podido aumentar su natural reactividad, se deja

entrar algo de aire en el interior de la vasija, aflojando las tuercas de la tapa y bajando, simultáneamente, la velocidad de giro a 300 rpm. Terminado el período anterior, de 5 minutos de duración, se detiene el motor y se retira la vasija del molino.

5. Separación del polvo y control del rendimiento de la molienda

Se vierte el contenido de la vasija en un tamiz de 3 mm de apertura que dejará caer el polvo sobre una hoja de papel de aluminio, separándolo de las bolas, que quedarán retenidas. El papel debe ser metálico pues el empleo de papel vegetal ha ocasionado problemas, en ocasiones, al arder el mismo por la temperatura del polvo. A continuación, se sacude el conjunto y se separa así el polvo molido de las bolas completamente. Se pesa el polvo y se determina el rendimiento de la molienda como razón entre el polvo molido (extraído tras la molienda) y el polvo a moler (introducido antes de la molienda).

El rendimiento de la molienda es un dato sencillo de obtener y muy importante para valorar algunas incidencias en la molienda, que al final repercuten en la bondad del aleado mecánico.

En el presente trabajo se realizaron dos moliendas, obteniendo una cantidad total de 139.7 g de polvo de Al AM, con un rendimiento medio de molienda de 98,38%.

2.1.2 MEZCLADO DE POLVOS.

Con objeto de homogeneizar las mezclas realizadas y poder eliminar los posibles efectos que a posteriori se podrían producir, por el hecho de haber tenido que moler el polvo en dos moliendas distintas, se agrupó y mezcló, durante 30 minutos, el polvo resultante de dichas moliendas en el molino mezclador “Turbula Type T2 C”, mostrado en la Figura 11.

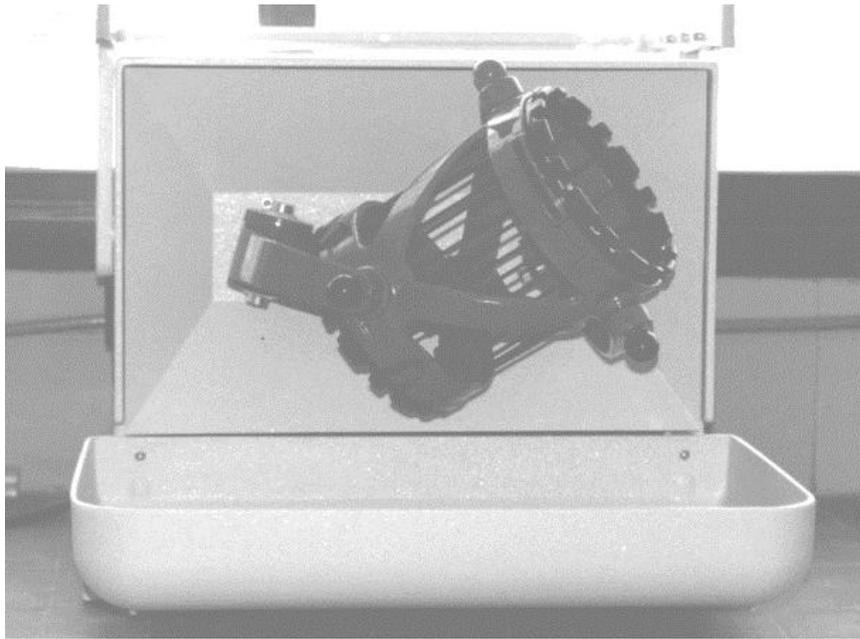


Figura 11. Molino mezclador “Turbula Type T2 C”.

2.1.3 LIMPIEZA DE LA CARGA DE BOLAS

La limpieza de las bolas sólo se ha realizado antes de la primera molienda, y después de la segunda molienda. En general, la carga de bolas sale poco contaminada de aluminio, llevando adherido un 1.62 % de la carga de polvo. Para dicha limpieza, se han empleado métodos químicos.

2.2. PROCESADO MEDIANTE PRENSADO Y SINTERIZACIÓN.

Tanto la consolidación del polvo de Al aleado mecánicamente (Al AM), como la del polvo de Al en estado de recepción (Al ER), se ha efectuado mediante un prensado y posterior sinterización en horno.

2.2.1 COMPACTACIÓN DE POLVOS

Se han empleado, a este efecto, las máquinas universales de ensayos MALICET ET BLIN U-30 y SUZPECAR MUE-60, ver **Figura 12** entre cuyos platos de compresión ha sido colocada la matriz. La primera de ellas dispone de cuatro escalas, 3, 6, 15 y 30 toneladas, que han sido seleccionadas según la presión de compactación empleada, mientras que para la segunda siempre se ha empleado la escala de 60 toneladas.

Las matrices empleadas a tal efecto son de acero F-522 templado y revenido. La empleada para los compactos con forma de probeta de tracción plana está formada por un núcleo de F-522 templado y revenido dividido en dos mitades, zunchadas por medio de un anillo de acero F-127 tratado.

En la **Figura 14** se muestran las matrices, punzones y sufrideras de las probetas de tracción, con sus compactos correspondientes.

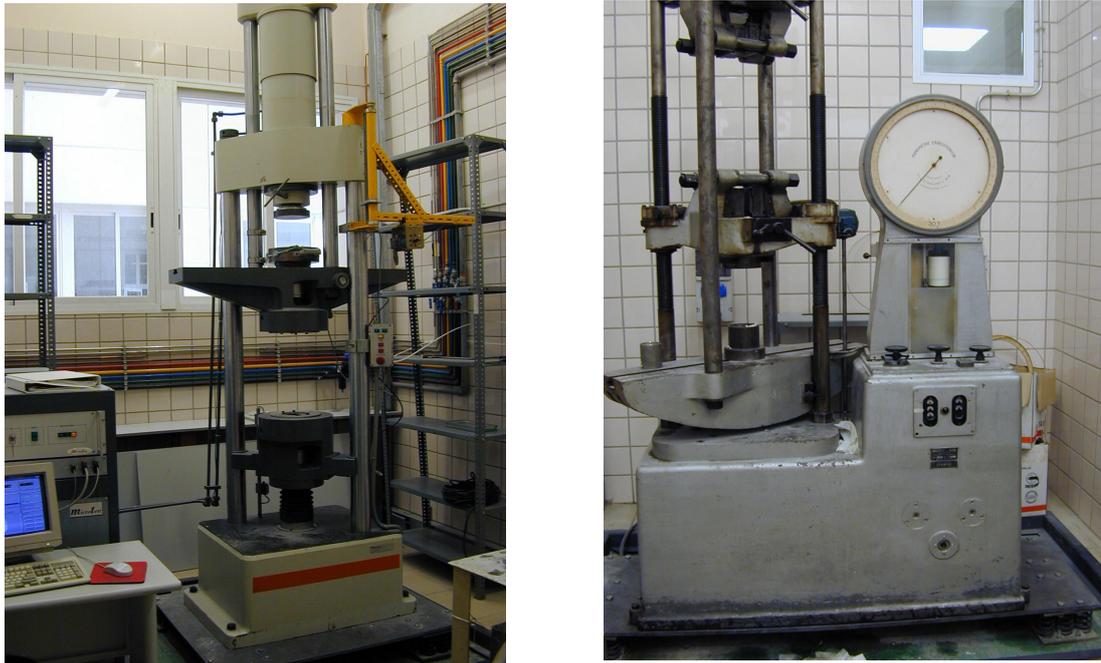


Figura 12. Máquina SUZPECAR MUE-60 y Máquina MALICET ET BLIN U-30.

A lo largo de las experiencias realizadas han sido fabricados compactos con forma de probeta de tracción plana. En la **Figura 13** se presenta un esquema con las dimensiones de la probeta. Esta sigue recomendaciones de la norma de creep de la

ASTM [20], que remite a la forma utilizada, siendo el tipo de probeta estándar para materiales pulvimetalúrgicos de la norma de tracción [21].

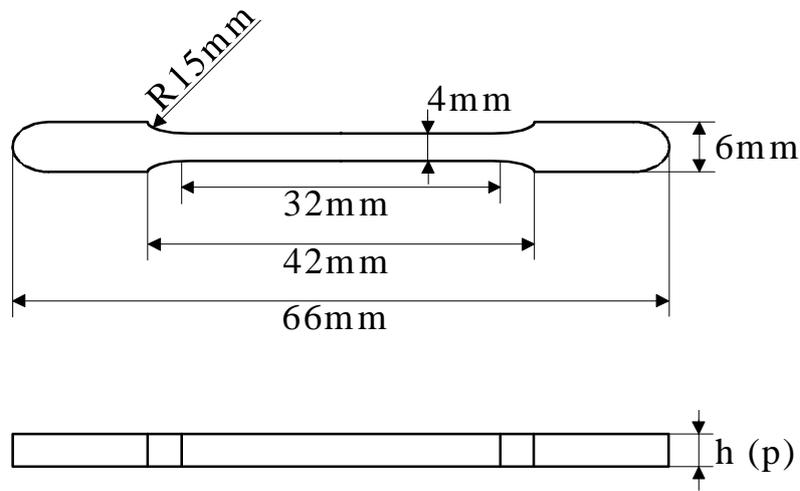


Figura 13. Forma y dimensiones de las probetas.

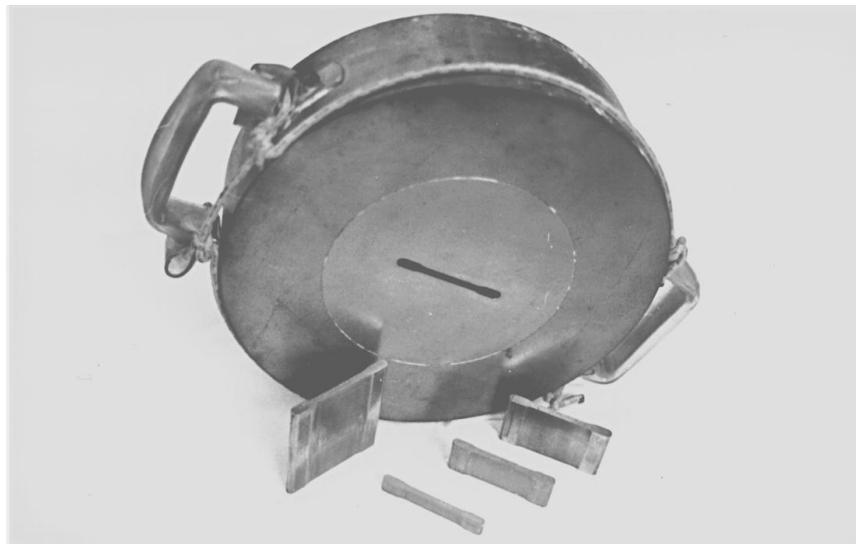


Figura 14. Matriz, punzón, sufrideras y una probeta de tracción.

Las compactaciones se han llevado a cabo siguiendo el método operatorio usual de laboratorio, es decir, mediante prensado mecánico en frío y lubricación en pared.

2.2.1.1 LUBRICACIÓN EN PARED

Para la lubricación en pared se ha dispuesto de la misma cera empleada como agente controlador del proceso (A.C.P.) en la molienda. La deposición del lubricante se ha llevado a cabo llenando la probeta con la suspensión de 10 g de A.C.P. + 100 cm³ de acetona, vaciándola súbitamente, esperando a la volatilización de la acetona.

2.2.1.2 DESCRIPCIÓN DE UN PRENSADO

El procedimiento utilizado puede resumirse del siguiente modo:

Aplicación de la carga de compresión: La máquina de ensayos universal SUZPECAR MUE-60 dispone de un software que permite en todo momento el control y seguimiento del ensayo, dependiendo la carga aplicada del tipo de material y de si se trata de un prensado de ciclo simple o de ciclo doble. La velocidad de aplicación de la carga es 110 Kg/s para los compactos de tracción, dándole a todas las probetas una precarga inicial de 10 KN. Las probetas de tracción se realizan con 4 g de mezcla.

En nuestro caso se ha utilizado un ciclo simple de prensado. En la **Tabla 10** se muestran las presiones utilizadas:

Material	Carga (MPa)
Al (ER)	210
Al (AM)	850

Tabla 6 Relación de presiones de compactación.

2.2.2 SINTERIZACIÓN DE LOS COMPACTOS

Se ha realizado la sinterización en un horno de tubo horizontal. Incorpora un controlador programable de temperaturas EURO THERM modelo 818P de 8 etapas de programación. El tubo para vacío fue fabricado en acero inoxidable AISI 304 y está dotado de dispositivo de refrigeración en sus dos extremos. El sistema de vacío consta de una bomba rotativa EDWARDS E2M2 de dos etapas y 2.8m³/h, una bomba difusora

de aceite EDWARDS de 150 L/s y controlador de presión BALZERS modelo TPG 300 con sus correspondientes medidores Pirani y Penning. Una ilustración del equipo se encuentra en la **Figura 15**.

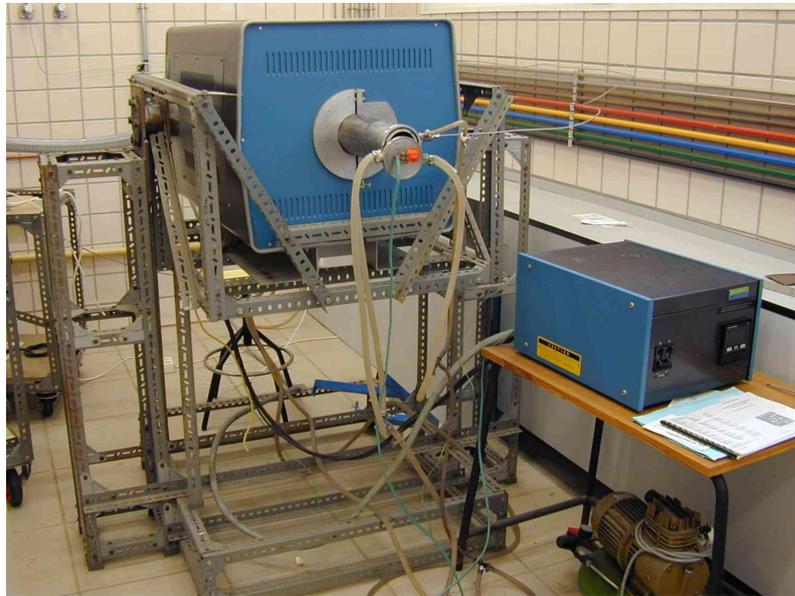


Figura 15. Horno de tubo horizontal y equipo de vacío.

2.2.2.1 DESCRIPCIÓN DE UNA SINTERIZACIÓN

Se ha aplicado el perfil de temperatura mostrado en **Figura 16** y **Tabla 7**. Para las sinterizaciones realizadas, el procedimiento experimental puede esquematizarse en las operaciones que se describen a continuación:

En primer lugar, los compactos se han dispuesto sobre las navecillas. El soporte de las navecillas va montado en una varilla sujeta en un extremo a la tapa del tubo y en el otro con un pequeño pie de apoyo.

El soporte de las navecillas ha sido montado con precaución para que al introducir la varilla en el tubo del horno quede posicionado adecuadamente. Se cierra la tapa con los tornillos al efecto.

En segundo lugar, se ha puesto en funcionamiento la bomba rotativa (sin enchufar la bomba difusora) e introducido en el controlador del horno los datos del ciclo de

sinterización esperando a dar comienzo al ciclo hasta haberse alcanzado el vacío de trabajo, 0.05Pa.

	Ciclo de Sinterización a 650°C, vacío		
Etapa	1	2	3
Gradiente [°C/min]	10	5	1
Temperatura final [°C]	600	645	650
Duración [h]	0	0	1

Tabla 7. Programa de un ciclo de sinterización a 650°C

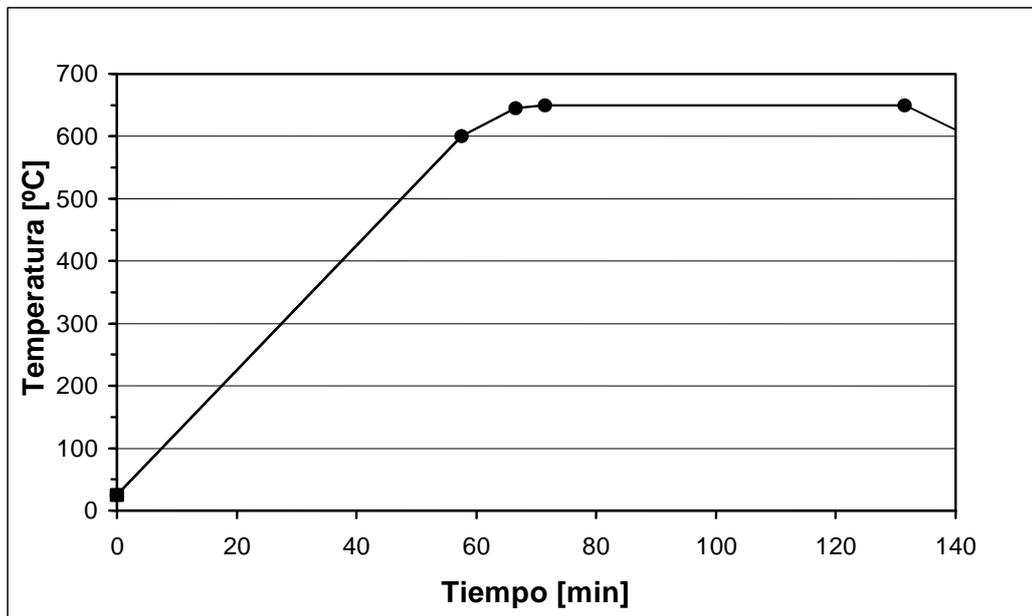


Figura 16. Ciclo de sinterización a 650°C en vacío.

Una vez acabado el ciclo de sinterización, se han dejado las probetas en el interior del horno para que se enfríen lentamente hasta una temperatura del orden de 100 °C.

En la segunda sinterización de las probetas se sigue un proceso exactamente igual al que se acaba de describir.

2.3. ENSAYOS DE TRACCIÓN A ALTA TEMPERATURA.

Para la realización de estos ensayos se ha empleado una máquina dinámica de ensayos INSTRON 5505, ver **Figura 17**, con una célula de carga de 100 kN, dotada de mordazas de acero inoxidable, además de una cámara de temperatura.

El ensayo consiste en someter a una probeta a una velocidad de deformación y temperatura constantes, indicadas previamente.

Las probetas de tracción que han sido ensayadas en esta investigación tienen las dimensiones que se muestran en la **Figura 13**.



Figura 17. Máquina de Tracción Instron 5505.

La máquina incorpora un software, denominado “*Merlin*”, de la misma empresa INSTRON. *Merlín* es un paquete de programas de ensayo de materiales diseñado para funcionar en el entorno de *Microsoft Windows*[®].

Merlin actúa como base de una serie de aplicaciones que ayudan a ensayar materiales y estructuras, y a recoger y analizar datos de los mismos. *Merlin* se ejecuta en un ordenador conectado a través de una tarjeta digital de interfaz al bastidor INSTRON Serie 5500 de gran rigidez que aplica las cargas del ensayo a la probeta.

El programa de ensayo proporciona todas las opciones de configuración, control, seguimiento y análisis del ensayo. La **Figura 18**, muestra el sistema de ensayo.

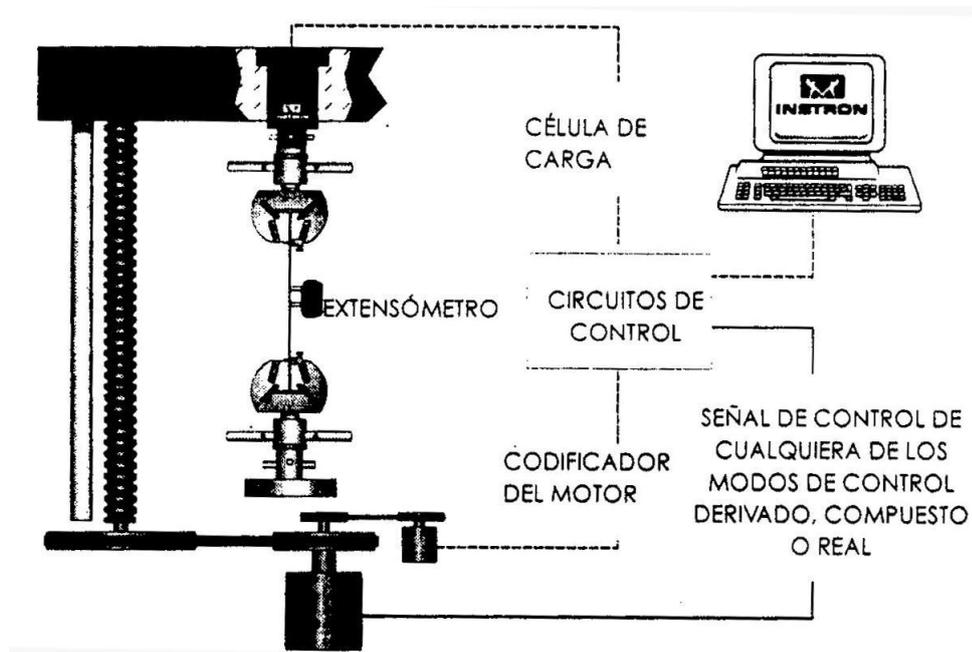


Figura 18. Sistema de ensayo de la máquina INSTRON 5505.

La pantalla de *Merlin* se divide en dos áreas principales: la consola y el área de trabajo. La consola ocupa la parte superior de la pantalla y comprende los iconos de configuración del equipo, los displays activos y la barra de menú. Contiene todos los controles y lecturas de salida que se requieren para configurar el equipo de ensayo y monitorizar los ensayos.

2.3.1 PARAMETROS DEL ENSAYO.

Lo primero que debemos hacer es seleccionar el tipo de ensayo que queremos realizar, entre una serie de ensayos. En nuestro caso, se trata de un ensayo de tracción a alta temperatura controlado por deformación.

Antes de proceder al ensayo de una probeta, se deben definir una serie de parámetros, que incluyen detalles acerca del control de la máquina, como la velocidad de la cruceta, la frecuencia de registro de los datos o las dimensiones de la probeta. Asimismo, Merlin necesita conocer los resultados que debe calcular al término del ensayo y cómo se van a representar gráficamente los datos recogidos durante la ejecución del mismo. Por otro lado, se debe abrir o crear un archivo de datos en bruto (con la extensión *.raw*) que almacene los datos en bruto de la muestra recopilados durante el ensayo.

El “Editor de métodos” permite crear un método de ensayo que incluye todos estos parámetros y los guarda como un archivo al que se puede acudir antes de comenzar. Así, se pueden crear varios métodos de ensayo para utilizarlos con distintos tipos de probetas y en condiciones variables. Concretamente, estos valores son *Datos de entrada*, como la unidad de medida del sistema, dimensiones de las probetas, frecuencia de registro de los datos, los parámetros de control de la máquina y la especificación del extensómetro.

A continuación, se va a detallar cómo se introducen los parámetros que van a controlar el ensayo. Como el ensayo de tracción que vamos a realizar consiste en mantener una velocidad de deformación constante a una temperatura fijada hasta la rotura, el parámetro distintivo a introducir es la velocidad de la cruceta, puesto que la temperatura se impone en la cámara de temperatura.

Seguidamente hay que indicar los criterios para detener el ensayo y finalizar el mantenimiento de la carga. En nuestro caso ambos criterios son el tiempo, 300 minutos.

La captura de datos se realizará de forma automática, con un intervalo de 1 o 0.5 muestras cada segundo (dependiendo de la duración esperada del ensayo, para no saturar el espacio máximo de almacenamiento).

El siguiente paso consiste en especificar que los datos de deformación se van a obtener a partir del extensómetro, y siempre se hace necesario aplicarle un autobalanceo, para corregir posibles alteraciones iniciales.

Los últimos datos que necesita el programa *Merlin* para poder realizar el ensayo y después poder interpretar de una forma coherente los resultados son las dimensiones de la probeta que se va a ensayar. El nombre que se asigna a los ficheros de datos de salida es “ensayoNN.raw”, donde NN son dos dígitos que identifican el número del ensayo por orden de realización. Por ejemplo, el primer fichero de datos sería ensayo01.raw.

2.3.2 PREPARACIÓN EXPERIMENTAL DEL ENSAYO.

Como ya se han descrito los equipos que vamos a emplear para este ensayo de tracción y se ha explicado cómo se introducen los parámetros de control del ensayo y las dimensiones de la probeta, vamos a describir su preparación.

2.3.2.1 Preparación de la probeta

Una vez que hemos obtenido la probeta tras el prensado y la sinterización, debemos preparar la probeta para realizar el ensayo.

Primero se lija la cara superior e inferior de la probeta, para eliminar las rebabas. El siguiente paso consiste en medir la anchura y espesor de la parte central de la probeta (no incluyendo las cabezas), tomando 5 medidas de cada una y después haciendo la media aritmética. Estos datos se encuentran en el *anexo II*.

Para finalizar esta fase de preparación de la probeta se realiza un rayado de las caras superior e inferior de las cabezas de la probeta con una lija de laboratorio, para aumentar la fricción con las paredes de su alojamiento y evitar así desplazamientos relativos indeseados. Además, en un lateral junto a la cabeza, mediante el “lápiz de grabado”, se le asigna un número identificativo a la probeta.

2.3.2.2 Colocación de la probeta en las mordazas

Se introduce la probeta en el horno y se fija solo a la mordaza inferior. Ello es debido a que, previamente al ensayo, es necesario, en una fase de lento calentamiento, llevar a la probeta hasta la temperatura de ensayo y sin que tenga restringida su dilatación, para no introducir deformaciones de compresión en la probeta. Es muy importante que la probeta quede colocada lo más verticalmente posible. Para asegurarnos que la dirección de tracción coincide con la dirección longitudinal de la probeta (carga axial).

Después colocamos el extensómetro en la probeta, cerrando posteriormente la cámara de temperatura, y en el control de la cámara de temperatura se fija la temperatura a la que se va a realizar el ensayo. En la **Figura 19** se representa el control de la cámara de temperatura.



Figura 19. Control de temperatura del horno.

2.3.2.3 Fase de calentamiento

Esta fase dura unos 40 minutos hasta que se alcanza la temperatura especificada en el control de la cámara de temperatura. Se ha escogido esta duración por considerarla el

tiempo necesario para que todo el sistema (mordazas+probeta+extensómetro+aire interior de la cámara) alcance la temperatura de ensayo.

Cuando hayan transcurrido veinte minutos desde que se ha alcanzado la temperatura de ensayo, abrimos la puerta de la cámara de temperatura y procedemos a apretar la parte superior de la mordaza para que la probeta quede completamente fijada y no se tengan tensiones residuales debidas al calentamiento al comienzo del ensayo.

Hecho esto esperaremos otros veinte minutos para que se vuelva a homogeneizar la temperatura en todo el sistema de ensayo y, solo entonces, daremos comienzo al test.

2.3.2.4 Inicio de ensayo

Tras completar la fase de calentamiento se puede poner en marcha el ensayo. En el área de trabajo se puede ver la evolución del ensayo mediante una representación gráfica ó directamente los datos que se van obteniendo.