

CAPÍTULO 3

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se va a exponer la secuencia de operaciones realizadas en el laboratorio para la fabricación y medida de las propiedades de los compactos porosos que serán objeto de estudio.

3.2 EXTRACCIÓN DE LAS MUESTRAS DE CADA TIPO DE POLVO

La primera operación es realizar la extracción de las muestras representativas de los polvos a estudiar. Esta extracción se realiza de dos formas diferentes en función de las características del polvo.

3.2.1 Tubo de vidrio:

Para ello se emplea un tubo de vidrio de aproximadamente 10 mm de diámetro y 30 cm de longitud.

La forma de realizarlo es introduciendo el tubo hasta el fondo del recipiente tomando así la muestra incluyendo todas las capas del recipiente.

Debido al transporte y manipulación, los polvos se segregan y las partículas de menor tamaño ocupan preferentemente el fondo del envase quedando las partículas de mayor tamaño en la parte superior del recipiente. Con este sencillo método, haya habido o no segregación del polvo, se garantiza que la muestra obtenida sea lo mas representativa posible del lote.

Este método se ha empleado para el aluminio, hierro y bronce.

3.2.2 Cucharilla:

En el caso del níquel se puede emplear cucharilla debido a que por su morfología no tiende a segregarse y además tiende a aglomerarse.

3. 3 CARACTERIZACIÓN DE LOS POLVOS

3.3.1 Porosidad de golpeo

La porosidad de golpeo da una medida de la capacidad de densificación de un polvo cuando se vibra; es decir, sin someter el polvo a presión de compactación. Este ensayo se realiza aplicando la Norma ASTM.

Para obtener la densidad de golpeo de un polvo se coloca una determinada cantidad del material en una probeta graduada. La probeta se somete a vibración durante un minuto, transcurrido el cual se calcula la porosidad considerando el volumen alcanzado por la columna de polvos (figura 3.1).



Figura 3.1 Vibrador y probeta graduada

La porosidad de golpeo viene dada por la expresión siguiente:

$$\Theta_M = 1 - (M / \gamma_0 V)$$

Donde:

M: Masa de polvo

γ_0 : Densidad absoluta del polvo.

V: Volumen medido.

Los valores de porosidad de golpeo obtenidos para los polvos estudiados se muestran en la Tabla 3.1.

MATERIAL	Θ_M
ALUMINIO	0,45
HIERRO WPL 200	0,63
HIERRO NC 100.24	0,65
NIQUEL 4 SP 400	0,60
NIQUEL TYPE 255	0,86
BRONCE	0,43

Tabla 3.1: Porosidades de golpeo

3.3.2 Curva de compresibilidad

Se trata de un procedimiento para obtener la porosidad de un compacto frente a la carga aplicada, relación necesaria para poder fabricar los compactos de diferentes porosidades objeto de estudio.

Se introduce el polvo en la matriz y hay que vibrarlo hasta que llegue a su porosidad de golpeo (punto 3.3.1 de este capítulo). Se sigue el siguiente procedimiento de prensado [Ref ASTM] con la

máquina MALICET ET BLIN U-30(maquina que se explicará en el apartado 3.5.2):

- Se coloca el reloj comparador como se muestra en la figura 3.2. La parte inferior de la varilla del reloj debe estar unos milímetros por encima de la bancada inferior.

- Se coloca la matriz cilíndrica en la bancada inferior y la superior se baja hasta que se encuentre a unos centímetros de la parte superior del punzón. La bancada superior ya no se volverá a mover durante todo el ensayo.



Figura 3.2 Reloj comparador empleado para obtener la curva de compresibilidad

- Mediante la apertura de la válvula (de accionamiento manual) se enrasa el punzón con la bancada superior y se anota lo que

marque el reloj comparador, esta será la medida que utilizaremos como referencia (marca la altura para la porosidad de golpeo).

- Con una velocidad de 1 Tm/min se aplicara una carga de 2 Tm, y se mantendrá esta durante 2 min.

- Se descargará y se volverá a enrasar el punzón tomando nota de lo que marque el reloj comparador.

- En el siguiente paso se llegará hasta las cuatro toneladas en dos tramos, uno hasta las 2 Tm con una velocidad de 4 Tm/min y el otro desde las 2 Tm hasta las 4 Tm con una velocidad de 1 Tm/min. Esta carga se vuelve a mantener durante 2 min.

- Se vuelve a descargar y a enrasar tomando nota de lo que marca el reloj comparador.

- Este proceso se repetirá para 6, 8, 10, 12, 14 y 16 Tm.

- El siguiente paso es medir la altura y diámetro de la probeta resultado del ensayo en 8 puntos (será necesario eliminar la rebaba que queda en los bordes).

- Una vez obtenidos todos los datos, estos se introducirán en una tabla de Excel donde se realizan los cálculos necesarios para obtener la curva de compresibilidad.

3.3.3 Análisis granulométrico

Muchas propiedades de los materiales en polvo dependen de su tamaño de partícula.

En este apartado se ha utilizado un analizador láser Mastersizer 2000 de MALVERN (figura 3.3). Las partículas dispersan la luz en todas direcciones con un patrón de intensidad dependiente de su tamaño. Concretamente el ángulo de dispersión es inversamente proporcional al tamaño de la partícula, este ha sido el método utilizado para la obtención de la granulometría de los materiales objeto de estudio.



Figura 3.3 Mastersizer 2000 empleado para obtener la granulometría

Este equipo dispone de un láser de He-Ne para medida de tamaños de partícula *grandes*, mientras que una fuente de luz azul de 466 nm de longitud de onda proporciona un incremento de la resolución en la región submicrométrica. Esto permite medir con precisión partículas con tamaños entre 0.2 y 2000 μm .

3.3.4 Análisis morfológico

También es importante la geometría de los materiales objeto de estudio, ya que es uno de los parámetros de los que va a depender el recorrido eléctrico efectivo, a través de su relación con la porosidad de golpeo.

Debido al tamaño de los polvos utilizados, es necesario utilizar microscopía electrónica de barrido (SEM) para la caracterización morfológica, ya que permite obtener representaciones con apariencia tridimensional. De este modo, trabajando con la señal de electrones secundarios (SE), se pueden distinguir en el material características como rugosidad y porosidad superficial abierta. Además, al tener una visión casi completa de las partículas, se puede observar con claridad su morfología.

El SEM utilizado para estos trabajos es un PHILIPS XL-30 del Servicio de Microscopía de la Universidad de Sevilla (CITIUS) (figura 3.4).



Figura 3.4 Microscopio electrónico de barrido PHILIPS XL-30 empleado para el análisis morfológico de las partículas.

3.3.5 Análisis microestructural

A la hora del estudio de un material, es necesaria una visión *global* de su microestructura, comenzando por su observación macroestructural, para progresivamente emplear técnicas que permitan una mayor magnificación y resolución. Por tanto, el microscopio óptico es necesario en el procedimiento de caracterización estructural de los materiales, sin el cual se pierde información básica acerca de ellos.

Se ha utilizado un microscopio óptico NIKON EIPHOT modelo 200(figura 3.5).

La captación de imágenes se realiza, mediante una cámara digital NIKON CoolPix 950.



Figura 3.5 Microscopio óptico NIKON EIPHOT modelo 200 empleado para caracterización microestructural de los materiales.

3.4 MUESTREO PREVIO AL PRENSADO

El primer paso para fabricar los compactos porosos es pesar la cantidad de polvo necesaria para obtener compactos de cada material y de diferentes porosidades.

La cantidad de polvo extraída total se vierte en el fluidímetro, se trata de una tolva que nos permite ir depositando el polvo en un vidrio de reloj haciendo una circunferencia (se busca realizar una distribución estadística).

Con la operación anterior se consigue realizar una distribución estadística del material. Posteriormente la circunferencia de polvo creada se divide en diferentes sectores.

Por último con una cucharilla se toma de cada sector la cantidad de polvo necesaria para cada compacto. En esta operación se emplea vidrio de reloj y balanza.

Las cantidades de polvo que necesitamos pesar para obtener posteriormente compactos de diferentes porosidades las calculamos mediante la expresión:

$$M = (1 - \Theta) \cdot S_N \cdot 10 \cdot \gamma_0$$

donde S_N es la sección nominal del compacto (sección de la matriz empleada), γ_0 la densidad del material macizo y 10 mm es la altura deseada para el compacto.

Material empleado (figura 3.6):

1. Balanza
2. Tubo de vidrio
3. Vidrio de reloj
4. Fluidímetro
5. Pincel

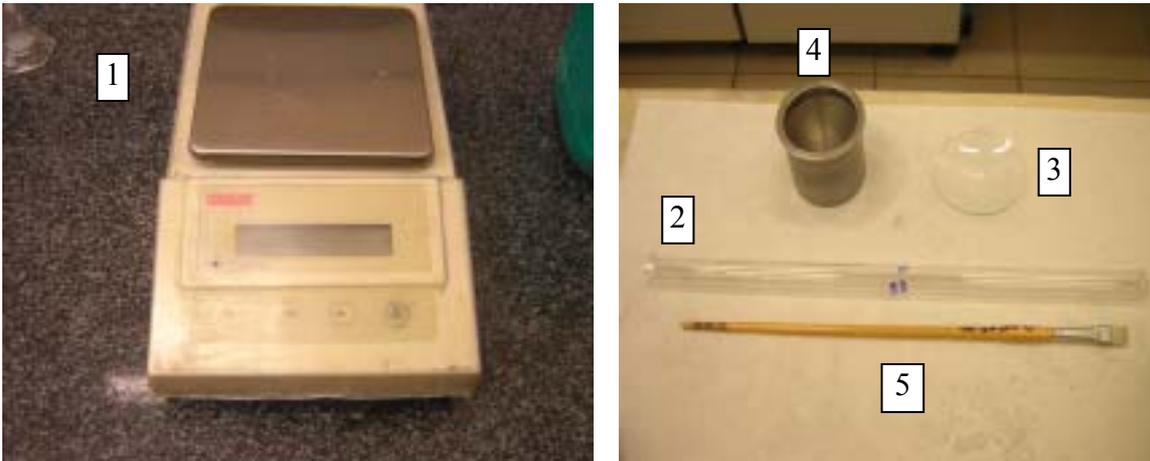


Figura 3.6 Material de laboratorio para preparar los polvos

3.5 PRENSADO Y EXTRACCIÓN DE LA MUESTRA

Una vez preparadas las muestras de polvo y obtenido de la curva de compresibilidad las cargas que hay que aplicar, se está en disposición de fabricar los compactos de diferentes porosidades y de 10 mm de altura.

3.5.1 Preparación de la matriz

La secuencia de preparación para cada compacto es la siguiente:

El interior de la matriz se limpia con el cepillo y posteriormente tapando un extremo, se le añade en el interior el lubricante (dilución de 10 g de cera en 100 cm³ de acetona).

Al paso de varios segundos se tira el lubricante, dejando que se seque el interior de las paredes de la matriz que están impregnadas de lubricante.

Se coloca el punzón corto en un extremo de la matriz, por el otro extremo se vierte el polvo con ayuda del pincel y por ultimo se le coloca el punzón largo.

En la figura 3.7 se muestra los utensilios empleados.

1. Acetona y cera
2. Cepillo
3. Matriz
4. Punzón corto
5. Punzón largo



Figura 3.7 Materiales de laboratorio necesarios para el prensado

3.5.2 Prensado

Para el prensado se comenzó empleando la máquina de ensayos SUZPECAR MUE-60 (figura 3.8), máquina que dispone de un software que permite en todo momento el control, automatización y seguimiento del ensayo. En la Tabla 3.2 se puede observar el valor de la secuencia a introducir en el programa de la máquina en función de la carga que se desee aplicar.

PRESIONES Y CARGAS EMPLEADAS EN LAS MATRICES			
MATRIZ CILÍNDRICA Ø12 mm			
Área =	113,1	Mm ²	
Velocidad =	588	N/s	
P, Mpa	CARGA, T	KN	Secuencia
210	2,4	23,73	34,61
310	3,6	35,03	46,54
435	5,0	49,15	61,17
700	8,1	79,09	91,31
780	9,0	88,13	100,22
850	9,8	96,04	107,95
950	11,0	107,34	118,91
1000	11,5	112,98	124,36
1125	13,0	127,11	137,88
1300	15,0	146,88	156,63

Tabla 3.2 Tabla de secuencias a introducir en la máquina de ensayos de SUZPECAR MUE-60



Figura 3.8 MaquinaSUZPECAR MUE-60

Para compactos con porosidad superior al 20% se detectó que la longitud de estos distaba bastante de la calculada (10 mm). Esto era debido a que los rangos de cargas empleadas estaban por debajo del rango de la maquina de ensayos SUZPECAR MUE-60, por tanto se decidió emplear ésta sólo para fabricar los compactos de máxima presión de compactación (1300 MPa) y para los demás se optó por compactar con la máquina MALICET ET BLIN U-30, modelo más antiguo y manual, que posibilitaba este trabajo a menor presión.

La máquina de compactación MALICET ET BLIN U-30 aparece representada en la figura 3.9.



Figura 3.9 Máquina de ensayos universal MALICET ET BLIN U-30

Observación:

Debido a la forma del Ni el volumen del polvo sin compactar para fabricar las probetas de 10 mm era superior al de la matriz por lo tanto se optó para este material fabricar los compactos de menor longitud.

3.5.3 Extracción de las probetas

Para extraer los compactos de la matriz se empleó la maquina MALICET ET BLIN U-30 con ayuda de un cilindro hueco con diámetro similar al de la matriz. Se coloca la matriz encima del cilindro hueco y

se le aplica carga lentamente hasta que cae el compacto con los punzones, el cilindro se rellena de papel para evitar que se rompa el compacto al golpear en metal.

3.6 SINTERIZADO DE LOS COMPACTOS

Proceso necesario para eliminar la capa de óxido existente entre los límites de partículas de los compactos porosos fabricados.

Equipos y utensilios empleados:

1. Bomba de vacío
2. Argón
3. Horno de tubo metálico
4. Horno de tubo cerámico

Los parámetros para el sinterizado son:

1. Tiempo de sinterización: 30 min

2. Atmósfera de argón: 1,2 bar

3. Temperaturas de sinterización:

1. AL: 650 °C
2. Fe: 1150 °C
3. Ni: 800 °C
4. Br: 850 °C

3.6.1 Sinterización del aluminio:

La sinterización se realizó en horno de tubo de acero horizontal, LINDBERG (wisconsin,USA) modelo 54553-H de 12 kW con resistencias del tipo CSI. Incorpora controlador programable de temperaturas EUROTHERM modelo 818P de 8 etapas de programación. El tubo para vacío es de acero inoxidable AISI 304 y está dotado de dispositivo de refrigeración en sus dos extremos (figura 3.10).



Figura 3.10 Horno de tubo de acero horizontal, LINDBERG

El sistema de vacío consta de una bomba rotativa EDWARDS E2M2 de dos etapas y una bomba difusora de aceite EDWARDS de 150l/s y controlador de presión BALZERS modelo TPG-300 (figura 3.11). Para crear la atmósfera de 1,2 bar de argón se dispone de una red en el laboratorio.



Figura 3.11 sistema de vacío

Pasos en la sinterización:

1. Se programa el ciclo de sinterización

Paso	1	2	3
Gradiente(°C/min)	10	5	1
Temperatura final(°C)	600	645	650
Tiempo(h)	0	0	0,5

2. Se colocan los compactos en un soporte que se introduce en el interior del tubo con una varilla a la que esta unido.

3. Se hace vacío con ayuda del equipo y se le introduce una atmósfera de 1,2 bar de argón (operación que se repite 2 veces para asegurar la atmósfera de argón).

4. Se conecta la refrigeración y se le da a ejecutar el programa del controlador.

5. Los compactos se retiran al día siguiente.

3.6.2 Sinterización del hierro, cobre y níquel:

El horno de sinterización empleado ahora es uno de tubo horizontal cerámico CARBOLYTE type STF 15/75/450 con una temperatura máxima de 1500 °C (figura 3.12).



Figura 3.12 Horno tubo horizontal cerámico CARBOLYTE

El horno consta de un tubo cerámico dispuesto en posición horizontal de unos 120 cm de longitud por 86 mm de diámetro externo, alojado en el interior de un cilindro con cavidad interior para acoger al tubo y con la misión de transferir el calor y aislar del

exterior. A ambos extremos del tubo se colocan dos cierres de acero inoxidable: por un lado un termopar controlador de la temperatura, y por el otro, un cierre con orificio adaptado para conexión con la bomba de vacío (la bomba de vacío descrita en el anterior apartado).

En ambos cierres de acero entran gomas destinadas a refrigeración mediante aporte y desalojo de agua. Por otro lado, el cierre de termopar dispone de otra goma para la entrada de argón y así poder crear la atmósfera deseada.

Pasos en la sinterización:

1. Se programa el ciclo de sinterización

Hierro

Paso	1	2	3
Gradiente(°C/min)	10	5	1
Temperatura final(°C)	1000	1140	1150
Tiempo(min)	0	0	30

Bronce

Paso	1	2	3
Gradiente(°C/min)	10	5	1
Temperatura final(°C)	800	840	850
Tiempo(min)	0	0	30

Níquel

Paso	1	2	3
Gradiente(°C/min)	10	5	1
Temperatura final(°C)	750	790	800
Tiempo(min)	0	0	30

2. Se colocan los compactos en un soporte que se introduce en el interior del tubo con una varilla. Se le coloca una pieza de material refractario en el extremo del tubo para que no alcance altas temperaturas en la zona de cierre donde se conecta el equipo de vacío.

3. Se hace vacío con ayuda del equipo y se le introduce una atmósfera de 1,2 bar de argón (operación que se repite 2 veces para asegurar la atmósfera de argón).

4. Se conecta la refrigeración y se le da a ejecutar el programa del controlador.

5. Los compactos se retiran al día siguiente.

Observación:

Inicialmente se empleó el horno cerámico para la sinterización del aluminio a 650 °C, pero los compactos se deformaron según se muestra en la figura. 3.13.



Figura 3.13 Compacto de aluminio deformado

Se repitió la prueba en el horno metálico a 650 °C y no ocurrió el fenómeno (los compactos no se deformaron). Finalmente se comprobó que el horno metálico no estaba bien calibrado para ese rango de temperatura y realmente la sinterización fue aprox. a 640 °C. Por tanto la temperatura final de sinterización para el aluminio fue de 640 °C (caso para el que no se deformaron las muestras).

3.6.3 Comprobación del grado de sinterización

Para comprobar que los compactos alcanzaban un buen grado de sinterización para las condiciones de temperatura, tiempo y atmósfera empleada, se prepararon muestras para observarlas en el microscopio:

Para poder manejar mejor la probeta es necesario su empastillado con resina (figura 3.14).

La probeta cilíndrica se corta por un plano que contenga el eje del cilindro y la cara cortada será la que se lijara y pulirá para su posterior observación. En las figuras 3.15 y 3.16 se muestran las máquinas de corte y empastillado respectivamente.



Figura 3.14 Probeta cortada y empastillada



Figura 3.15 maquina de corte Figura 3.16 maquina de empastillado

Por ejemplo, en la figura 3.17 se puede observar el grado de sinterización de una probeta de aluminio aprox. 20 % de porosidad.

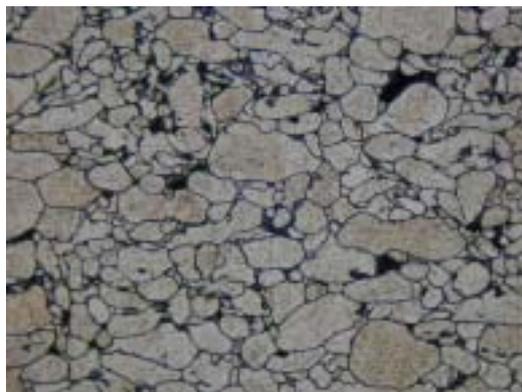


Figura 3.17 Foto probeta sinterizada Al ECKART ER-x100

3.7 PREPARACIÓN DE LAS SUPERFICIES DE LOS COMPACTOS Y MEDIDA DE LAS DIMENSIONES FINALES.

Se realiza un desbastado y pulido de las dos caras de los compactos con el fin de prepararlas para la medida de la resistencia eléctrica. Además se mide el diámetro y altura de los compactos en ocho puntos, con estos datos calculamos la porosidad real de las probetas a partir de la expresión:

$$\Theta = 1 - \frac{M}{S \cdot H \cdot \gamma_0}$$

siendo M la masa final del compacto, γ_0 la densidad absoluta del material del polvo, y H y S la altura y la sección del compacto, respectivamente, que habrán de ser medidas en 8 puntos distintos.

Desbastado, paso necesario para conseguir el paralelismo entre las caras de la probeta. Se emplearon lijas de P600 y P1000. En la figura 3.18 se muestra el útil empleado y en la figura 3.19 el esquema del montaje.



Figura 3.18 Lijado con útil

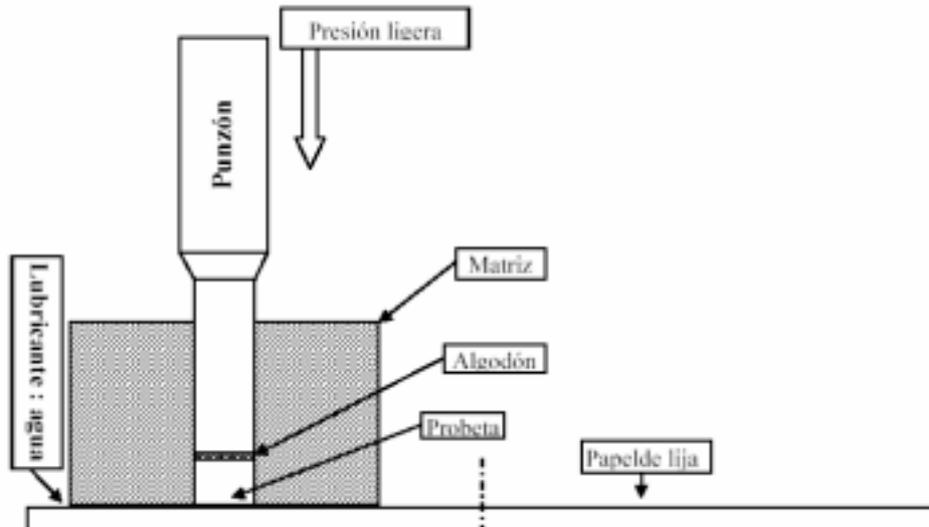


Figura 3.19 Esquema del montaje

El pulido es importante para eliminar la rugosidad y mejorar el contacto entre las caras y los electrodos, se realizó empleando la pulidora de diamante.

Entre cada paso de desbastado y de pulido se limpian las caras con alcohol. Previo al ataque con diamante debe limpiarse con jabón, alcohol y secar bien para no contaminar el paño. El último paso tras el pulido final es limpiar con alcohol.

Tras el pulido final y la limpieza con alcohol, es necesario aplicar temperatura a las probetas con el fin de que pierdan el agua que haya podido quedar entre los poros, lo cual alteraría en gran medida tanto el peso de las probetas como sus propiedades eléctricas objeto de estudio. Para ello se utilizó simplemente un secador con el cual se aplicó calor entre los diferentes pasos y por último secar en una estufa aprox. a 125 ° C durante 2-3 horas.

3.8 MEDIDA DE LA RESISTENCIA ELÉCTRICA DE LOS COMPACTOS POROSOS.

Todos los pasos anteriores tienen la finalidad de preparar unos compactos porosos para medir su resistencia eléctrica. Posteriormente a partir de esos datos de resistencia y geometría del compacto, calcular la resistividad eléctrica frente a la porosidad de cada material.

En un primer lugar se decidió emplear el ohmiómetro modelo "Microhmmeter CA10" (figura 3.20) y unos terminales de conexión de cobre ya existentes en el laboratorio (figura 3.21).



Figura 3.20 Ohmiómetro modelo Microhmmeter CA10 Figura 3.21 Terminales de conexión de cobre

Ambos equipos se descartaron debido a:

1. En la mayoría de las medidas el rango de resistencia a medir estaba por debajo del $\mu\Omega$. Se optó por emplear el puente de Kelvin modelo QJ57E (figura 3.22) en lugar de Microhmmeter CA10, porque

el puente de Kelvin QJ57E tiene mayor sensibilidad ($10^{-8} \Omega$ frente a $10^{-6} \Omega$ del Microhmmeter CA10).

2. El empleo de los electrodos de cobre causaban problemas de inestabilidades de las medidas, se optó por emplear unos electrodos de punzones comerciales (figura 3.23).



Figura 3.22 El puente de modelo QJ57E



Figura 3.23 Electrodo de Kelvin punzones comerciales

El puente kelvin en cuestión consta de:

- Un galvanómetro interno.
- Un multiplicador.
- Dos botones designados por B y G.
- Nueve terminales de conexión con sistemas exteriores, designados por C1, P1, C2, P2, Bext+, Bext-, Gext+ y Gext-.
- Un terminal de conexión para tierra.
- Una batería.
- Cinco potenciómetros medidores.

- Dos interruptores que marcan las posiciones de ext o de int.
- Dos ajustes, uno de sensibilidad y el otro de cero.

Procedimiento de medida:

1. Conexión de equipos:

A. Fuente de alimentación: el cable rojo al (+) de Bext., el azul al (-) de Bext., y la conexión a tierra en el terminal plateado.

B. Electrodo: Los terminales C1, C2, P1 y P2 son los terminales utilizados para la conexión a la resistencia a medir, a través de los electrodos siendo los dos primeros de corriente y los otros dos de voltaje. Para adaptar los electrodos a los terminales se realizó 4 piezas de cobre.

2. Posicionamiento del compacto

Consiste en colocar los electrodos en ambas caras del compacto. Para ello se preparó un útil de metacrilato (ver figura 3.24) y 3 abrazaderas para sujetar los electrodos y el compacto.

3. Medida

Previamente se ha comprobado el rango de la medida con el ohmímetro Modelo CA 10 para facilitar la labor con el puente de kelvin.

A. Configurar el puente Kelvin:

- El interruptor G en posición **int**.
- El interruptor B en posición **ext**.
- El selector de Rangos en **OFF**
- Los potenciómetros medidores en **X X X X X**
- El potenciómetro de la sensibilidad en el mínimo
- La probeta colocada correctamente entre los electrodos.
- Aplicar la carga.
- Conectar la fuente de alimentación.

B. Fijar el multiplicador en el rango deseado

C. Ajustar el "cero" con el potenciómetro dedicado a ello.

D. Enclavar el botón G, poner un poco de sensibilidad y medir pulsando el botón B, la aguja no debe ir a tocar en un lado sino es que hay demasiado sensibilidad.

Luego, hay que encontrar el bueno rango para que la aguja se acerca del cero.

E. Ajustar nuevamente del "cero".

F. Medir la resistencia bajando o subiendo los selectores: si la aguja esta en la parte (+), hay que subir las cifras; bajar en el caso (-).

Seguir realizando los pasos 4, 5 y 6 hasta que al pulsar el botón B la aguja marque el cero.

El esquema del montaje completo es el siguiente (figura 3.24).

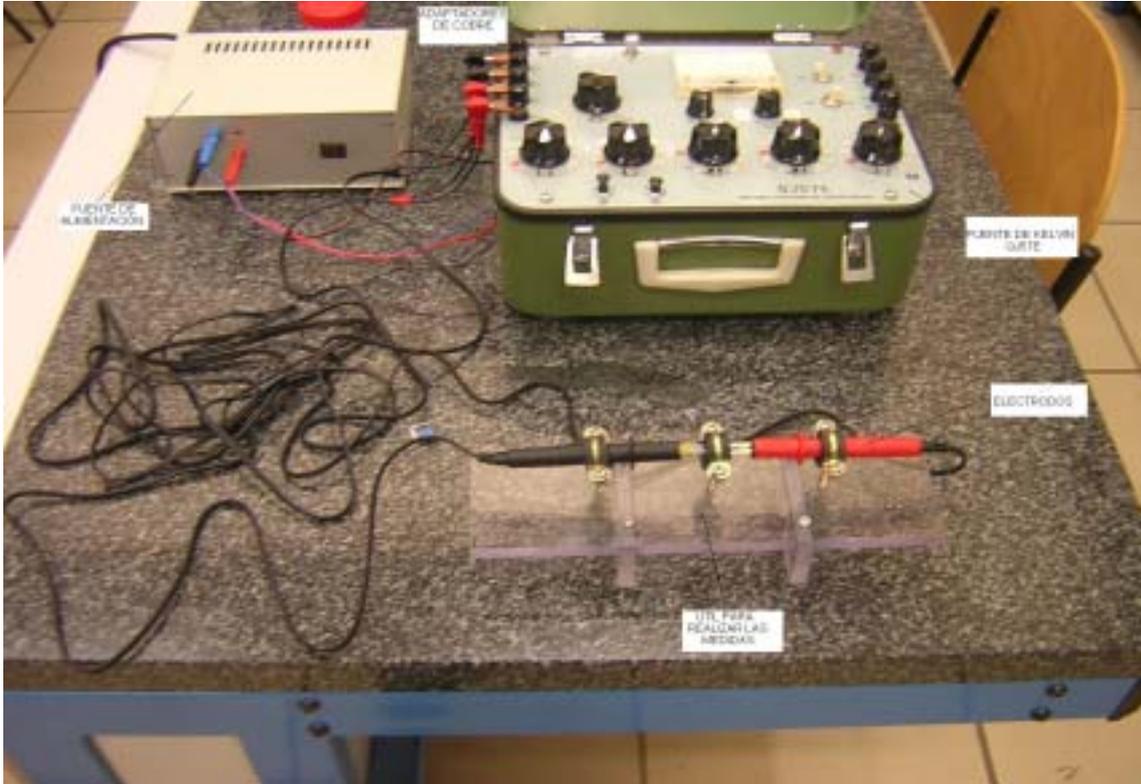


Figura 3.24 Esquema del montaje completo para realizar la medida de la resistencia de cada compacto

Las medidas se realizaron en 4 posiciones del compacto obteniendo 8 valores (2 en cada posición resultado del cambio de polaridad).

Debido a la geometría y disposición (configuración) de los punzones de medida ha sido necesario aplicar un factor de corrección geométrico $F = 2,55$ en las medidas de resistencia realizadas a todos los compactos porosos de los diferentes materiales objetos de estudio.

Finalmente la resistividad eléctrica se calcula a partir de la expresión:

$$\rho_E = R_{medida} \left(\frac{S_N}{H} \right)$$

3.9 DETERMINACIÓN DE INCERTIDUMBRES

El uso de distintos aparatos de medida ha introducido ciertos errores en los resultados que se han ido obteniendo para cada uno de los materiales objeto de estudio. La balanza, el calibre o el ohmiómetro han introducido incertidumbres en los valores de porosidad y resistividad.

Es claro que los datos recogidos a lo largo de los diferentes ensayos realizados en el laboratorio son experimentales y por tanto están afectados de error.

Es por ello por lo que hay que determinar las incertidumbres asociadas a la porosidad y la resistividad que son las de mayor interés.

- Porosidad

Al calcular la porosidad del material a partir de, $\Theta = 1 - \frac{M}{S_N \cdot H \cdot \gamma_0}$

la incertidumbre experimental se calcula como,

$$\Delta\Theta = \Theta \left[\frac{\Delta M}{M} + \frac{\Delta S_N}{S_N} + \frac{\Delta H}{H} \right]$$

Como la superficie es $S_N = \pi \cdot d^2 / 4$, el error que se produce al calcularla es, $\Delta S_N = S_N \cdot 2 \frac{\Delta d}{d}$

Siendo,

d , el diámetro del compacto.

H , altura del compacto.

M , el peso del compacto.

Por tanto ΔM , Δd e ΔH son los errores que se introducen debido a la precisión del instrumento con el que se realice la medición, es decir la balanza y el calibre.

- Resistividad eléctrica

Como se analizará en profundidad en el Capítulo de Resultados, la resistividad eléctrica se ha obtenido a partir de,

$$\rho_E = R_{medida} \left(\frac{S_N}{H} \right)$$

De manera que el error que se comete con el dato de resistividad es,

$$\Delta \rho_E = \rho_E \left[\frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta S_N}{S_N} + \frac{\Delta H}{H} \right]$$

ΔR es función de la precisión del instrumento con el que se mide, es decir, el Ohmiómetro.

- Resistividad relativa

Como la resistividad eléctrica relativa es la razón entre la resistividad obtenida en el laboratorio y la teórica de cada material registrada en la bibliografía, su error asociado será sencillamente,

$$\Delta\rho_R = \frac{\Delta\rho_E}{\rho_0}$$

Como para el ajuste se ha utilizado la resistividad eléctrica relativa, será también su error el que se indique a continuación junto con el resto de incertidumbres asociadas a cada una de las experiencias para los distintos materiales.