

Capítulo 3

Equipos

Contenido

3.1	LA MÁQUINA DE SINTERIZACIÓN ELÉCTRICA	20
3.1.1	CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS	22
3.1.2	CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS	23
3.2	LOS SENSORES	23
3.2.1	DESPLAZAMIENTO	23
3.2.2	FUERZA	24
3.2.3	INTENSIDAD	25
3.2.4	TENSIÓN	25
3.2.5	TEMPERATURA	26
3.3	EL PC	26
3.3.1	CONEXIONES MÁQUINA-PC	27
3.4	LAS MATRICES Y PUNZONES	29
3.4.1	MATRIZ CERÁMICA-METÁLICA	30
3.4.2	MATRIZ DE HORMIGÓN	30
3.4.3	MATRIZ HORMIGÓN-CERÁMICA	31
3.5	EL EQUIPO DE ACTIVACIÓN	32

3.1 La máquina de sinterización eléctrica

La modalidad de sinterización eléctrica que deseamos implementar aprovecha como fuente de calor, la energía térmica disipada por el propio espécimen (agregado de polvo o precompacto) debida al *efecto Joule*. La potencia disipada en forma de calor (P) es proporcional a la resistencia eléctrica del material (R), así como al cuadrado de la intensidad (I) de la corriente que lo atraviesa, esto es,

$$P = I^2 \cdot R$$

En el caso que nos ocupa, la resistencia eléctrica que ofrecen los especímenes a sinterizar se debe a dos factores:

- a la propia naturaleza resistiva del polvo,
- y a las resistencias de contacto entre las partículas.

La primera de ellas es muy pequeña en magnitud, pues los polvos son metálicos y los metales son excelentes conductores. Esta propiedad es, además, intrínseca y no puede alterarse exteriormente. El segundo factor, la resistencia de contacto, depende en gran medida de la naturaleza y espesor de las capas de dieléctricos (óxidos e hidróxidos) que envuelven, inevitablemente, las partículas de polvo. Por tanto, cabe esperar, en principio, y en cierta medida, que sí pueda ser alterada convenientemente.

Para que la disipación por efecto Joule sea importante, y se pueda lograr la sinterización, interesa que la resistencia eléctrica y la intensidad tomen los valores más altos posibles. Intentaremos pues, hacer pasar una corriente de intensidad elevada a través de un espécimen. No obstante, existen restricciones en este sentido, y la tensión aplicada (V), la intensidad que recorre el espécimen, y la resistencia eléctrica de éste han de verificar ineludiblemente la *ley de Ohm*,

$$V = I \cdot R$$

Esto significa que, para un determinado valor de V , sólo si la resistencia es pequeña conseguiremos valores grandes de la intensidad (que interviene elevada al cuadrado en la fórmula de la potencia). Así pues, queda claro que para conseguir que el material alcance

elevadas temperaturas y pueda sinterizar se requiere el paso de una fuerte intensidad de corriente, y aplicar una tensión tan alta como nos sea posible. Semejantes requisitos eléctricos los cumplen las máquinas destinadas a la soldadura por puntos.

Estas máquinas, desde el punto de vista eléctrico, constan, en esencia, de un transformador de una potencia igual o superior a los 100 kVA, cuyo secundario tiene en general una sola espira, y capaz de suministrar una tensión secundaria entorno a los 10 V e intensidades máximas que superan los 20 kA.

Las máquinas de soldadura incorporan, además, sistemas neumáticos que permiten la compresión. La presión es necesaria en nuestra aplicación para garantizar el contacto eléctrico y conseguir la densificación del polvo. Recordemos que la aplicación simultánea de calor y presión, es el principal atractivo de esta modalidad (además de los tiempos de procesado singularmente cortos, en lo que incidiremos a lo largo del presente trabajo). La presión de compactación debe ser fácilmente graduable así como debe estar coordinada con el paso de corriente, características que ya poseen las máquinas de soldaduras convencionales.



Figura 3.1 Máquina de soldadura por puntos

Por todos los condicionantes anteriores, podemos decir que una máquina de soldadura por puntos es adecuada para la realización de nuestro propósito, ya que es capaz de proporcionar una alta intensidad de corriente así como una compresión simultánea, gobernado todo por un sistema de control electrónico. No obstante, se requieren algunas adaptaciones

y elementos nuevos, así como un sistema de sensores que permitan el seguimiento de los parámetros relevantes del proceso. Además, en algunos casos ha sido necesario emplear un autotransformador eléctrico externo con el fin de reducir la resistencia eléctrica inicial de los polvos, ya que la máquina de soldadura era incapaz de hacer pasar la corriente por ellos.

En el presente proyecto, se ha utilizado una máquina de soldadura por puntos del fabricante *SERRA Soldadura S.A.* denominada *Serra Beta 27* Código 72.203 (fig. 3.1) cuyas características mecánicas y eléctricas describimos a continuación^[25].

3.1.1 Características mecánicas

La parte mecánica de la máquina de soldadura por puntos será la encargada de proporcionar la presión necesaria para garantizar el contacto eléctrico y la densificación de los polvos. Este dispositivo mecánico está formado por una serie de elementos que podemos agrupar en:

- *La unidad de esfuerzo* que reúne todos los elementos neumáticos.
- *La unidad desplazamiento de guía*, encargada del correcto desplazamiento tanto de la pluma inferior como de la superior.
- *El conexionado secundario*, que permite la continuidad eléctrica entre la parte móvil y la parte fija de la máquina.
- *El elevador hidráulico telescópico*, encargado del desplazamiento de la pluma inferior.

La unidad de esfuerzo está formada por un cilindro tándem accionado neumáticamente. Cada cilindro es capaz de proporcionar una carga de 750 kgf, y actuando conjuntamente, 1400 kgf. Existe una válvula de *accionamiento manual*, situada en la parte inferior delantera de los cilindros, y otra válvula selectora de esfuerzo, para el funcionamiento *simple/tándem* (fig. 3.2). El recorrido máximo de los cilindros es de 10 cm.

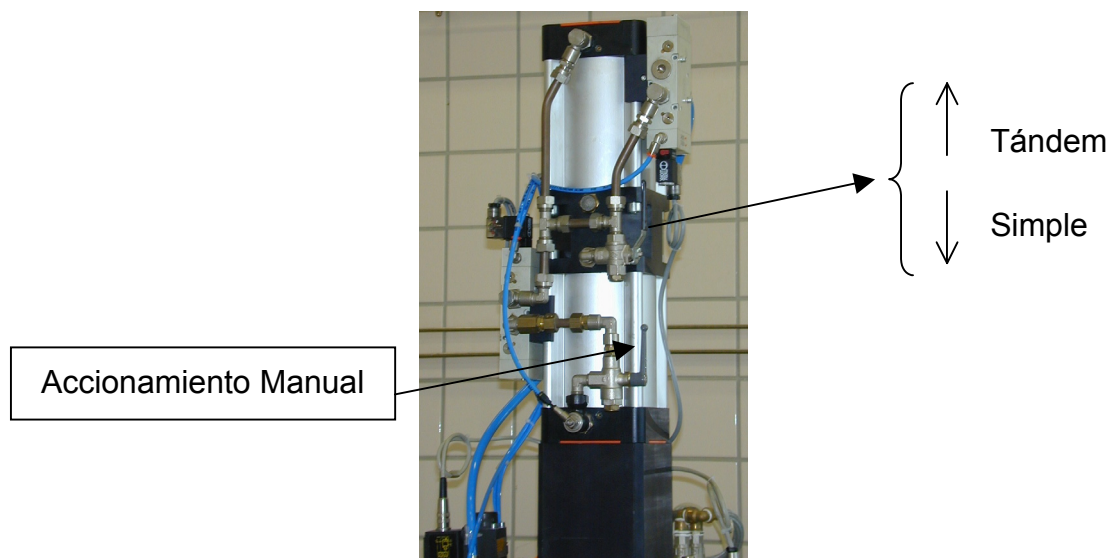


Figura 3.2 Unidad de esfuerzo neumática.

La presión neumática es proporcionada mediante una conexión a la red de aire comprimido del Laboratorio que no debe superar los 10 bares, pues la máquina dispone de una válvula de seguridad tarada a dicha presión.

3.1.2 Características eléctricas

Los elementos eléctricos son los siguientes:

- El transformador de soldadura.
- La plancha de montaje eléctrico.
- Unidad de potencia.
- Control electrónico.

El transformador de soldadura es capaz de proporcionar una potencia de 125 kVA al 50%, una intensidad máxima secundaria de 43 kA y una tensión secundaria de 8.8 V en punto nº1 y 11 V en punto nº 2, en vacío.

3.2 Los sensores

La máquina lleva instalados cinco sensores para el seguimiento del proceso de sinterización que vamos a realizar. A saber, *desplazamiento, fuerza, intensidad, tensión y temperatura del agua de refrigeración*, que pasamos a describir a continuación.

3.2.1 Desplazamiento

La máquina, lleva instalado un sensor de desplazamiento lineal con su correspondiente transductor de medida, capaz de medir el desplazamiento del cilindro neumático durante la sinterización.

Dicho sensor es de la casa *Analog*, modelo *Temposonics III rod-style (Model RH)*. Tiene un rango de medida de 50 mm. y como la carrera del cilindro es de 100 mm, lleva incorporado un útil mediante el cual podemos medir la zona deseada (figura 3.3).

Así podremos tener un seguimiento de la altura de los compactos durante todo el proceso de sinterización.

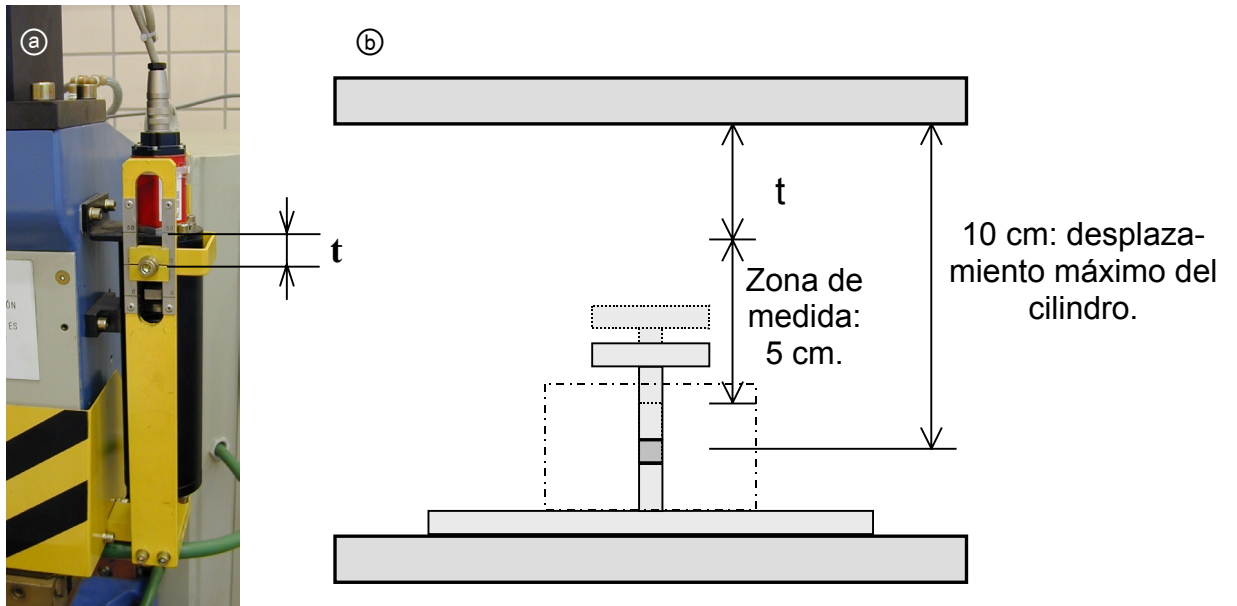


Figura 3.3 (a) Sensor de Desplazamiento y útil para regular la zona de medida. (b) t = posición relativa.

3.2.2 Fuerza

Mediante el amplificador de señal de la célula de carga, podemos medir la fuerza ejercida por el cilindro. Dicho amplificador de señal, de la casa *Penko*, modelo *SGM430* está situado en el interior de la consola derecha de la máquina (fig 3.4).



Figura 3.4 Amplificador de señal de carga.

Teniendo en cuenta que la máxima fuerza que es capaz de proporcionar el cilindro es de 1400 kgf, ajustamos el amplificador para adecuarnos al rango de medida (0-2000 kgf), para lo cual colocamos el *SPAN SELECT* del amplificador en la posición 2 mV/V, como

indica la figura 3.5. De esta forma, nos dará 10 V cuando la fuerza sea de 2000 kgf. Si lo colocamos en 1 mV/V tendríamos mayor precisión, pero solo podríamos medir hasta 1000 kgf.

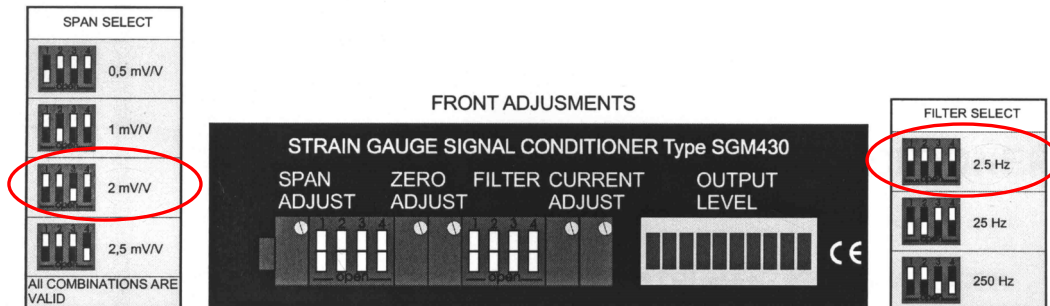


Figura 3. 5 Ajuste del amplificador.

Existen dos manómetros para el seguimiento de la presión, uno para la *presión de maniobra* y otro para la de *soldadura*.

3.2.3 Intensidad

La máquina incorpora un sensor que permite conocer la intensidad eficaz suministrada por el transformador en cada semiperiodo.

Los valores obtenidos, corresponden a la salida del transformador, y como la resistencia del compacto es mayor al inicio, tal intensidad de salida no es exactamente la que pasa por el espécimen sino la que el transformador intente que pase, por lo que el primer valor obtenido será necesario recalcarlo a partir de los valores de resistencia en el segundo instante y tensión en el primero, que si está medida en el compacto en cada instante.

3.2.4 Tensión

El transformador nos proporciona también los valores de tensión eficaz que mide en cada semiperiodo.

Se han cambiado los puntos de medida para acercarlos al espécimen que nos interesa y así reducir el error tal y como se muestra en la figura 3.6.

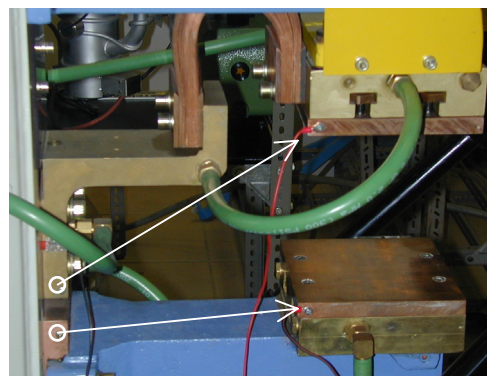


Figura 3.6 Medida de la Tensión.

El cero eléctrico no está regulado correctamente. Cuando la corriente es nula señala una tensión media aproximada de 0.2 V. Este *offset* será corregido mediante posterior tratamiento de datos, restando ese valor medio a todos los datos muestreados.

3.2.5 Temperatura

Se ha instalado un termómetro en la plancha inferior, para medir la temperatura inicial del sistema, mantenida por el sistema de refrigeración. Se ha tenido especial cuidado en aislar convenientemente el sensor de la plancha para evitar las posibles corrientes parásitas.



Figura 3.7 Termómetro y sonda.

3.3 EL PC

Para la programación de los parámetros de sinterización y tratamiento de los resultados obtenidos por los diferentes sensores, se ha ubicado un PC al lado de la máquina de soldadura.

Para la programación, haremos uso del programa CPC-300ib^[26], suministrado por el fabricante de la máquina de soldadura, y para el tratamiento de los datos, de la hoja de cálculo Excel.

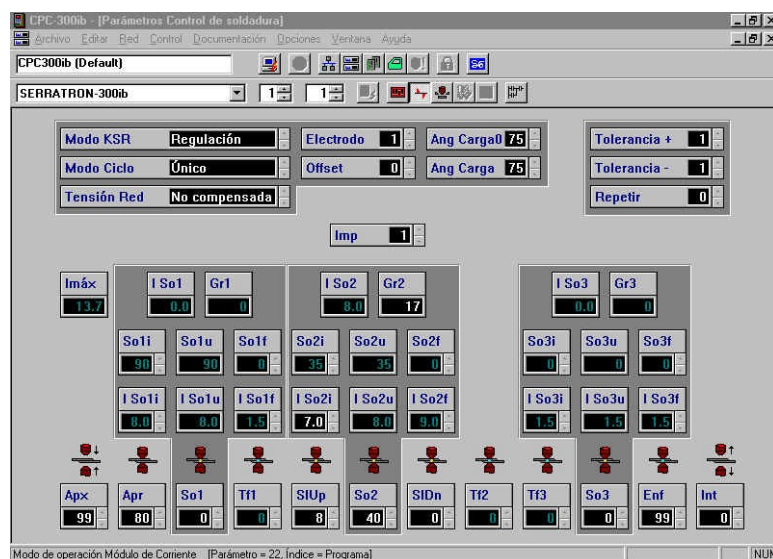


Figura 3.8 Página principal de CPC-300ib

Dicho PC debe tener instalada la *Office 97*, pues el programa CPC-300ib requiere las librerías del *Microsoft Access* para su correcto funcionamiento. Además, para el tratamiento de los datos con la hoja de cálculo, es necesario el archivo *SipS3dp.dll* en la carpeta *Windows*.

3.3.1 Conexiones Máquina-PC

Se han realizado las conexiones necesarias para establecer la comunicación entre máquina y PC, para lo cual se ha utilizado un hub que comunica la máquina de soldadura con el PC y ambos con el Servidor de la Escuela tal y como indica la figura 3.9.

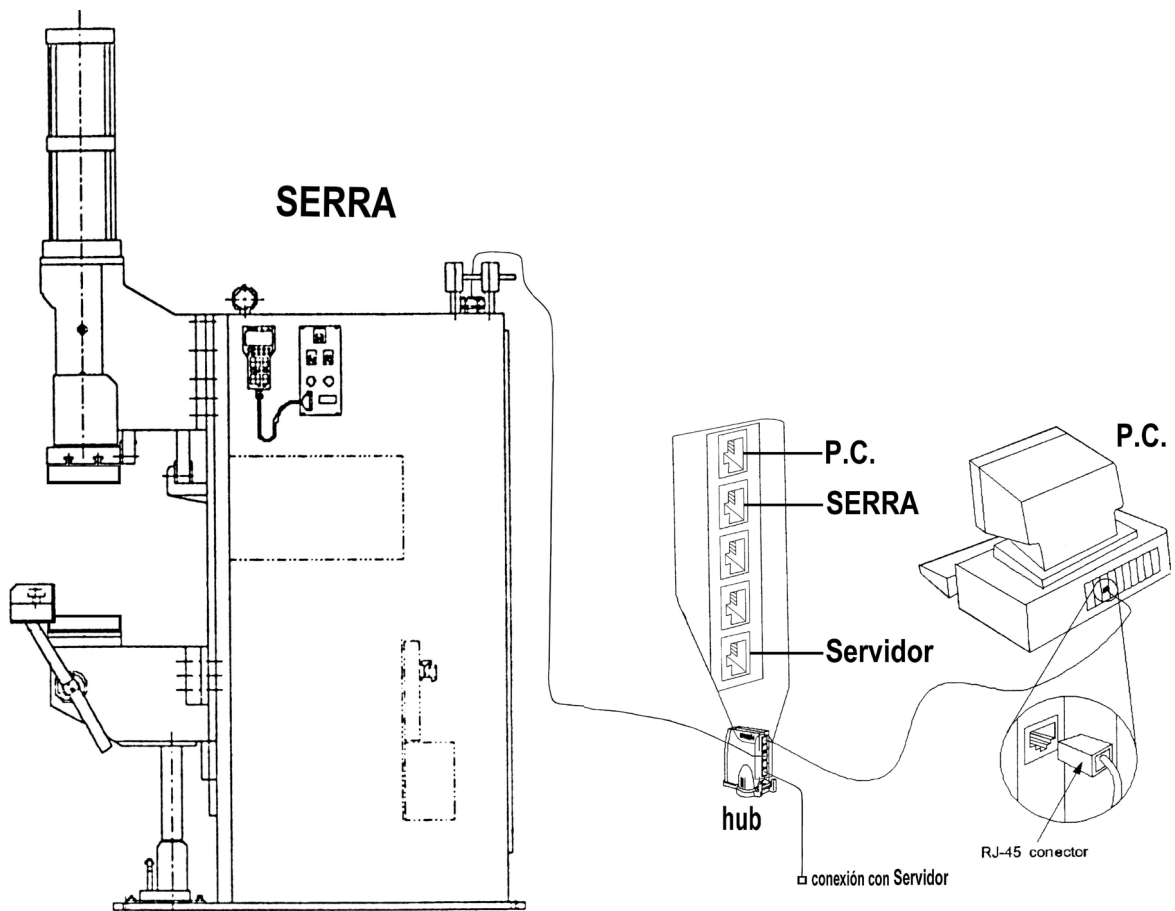


Figura 3.9 Conexiones PC-Serra-Servidor.

El hub utilizado, es de la casa *D-Link* modelo *DE-805TP* que opera a una velocidad de 10 Mbps., posee cinco puertos de salida y en su parte inferior tiene un interruptor con dos posiciones, “*Normal*” y “*Uplink*”. En su posición *Normal*, se usa para las conexiones entre ordenadores o máquinas, y en su posición *Uplink*, el puerto 5º queda reservado para las conexiones con otros hubs o redes de comunicaciones, como en nuestro caso.

Una vez establecida físicamente las comunicaciones se procede a la configuración del portal TCP-IP. El PC tiene asignado el número de IP 172.16.1.13.

En el lateral derecho de la máquina, existe un panel frontal de visualización de errores (figura 3.10).



Figura 3.10 Panel Frontal.

Pulsando la tecla « F », accedemos a la visualización del número IP, y para su edición, esperamos ocho segundos sin pulsar ninguna tecla.

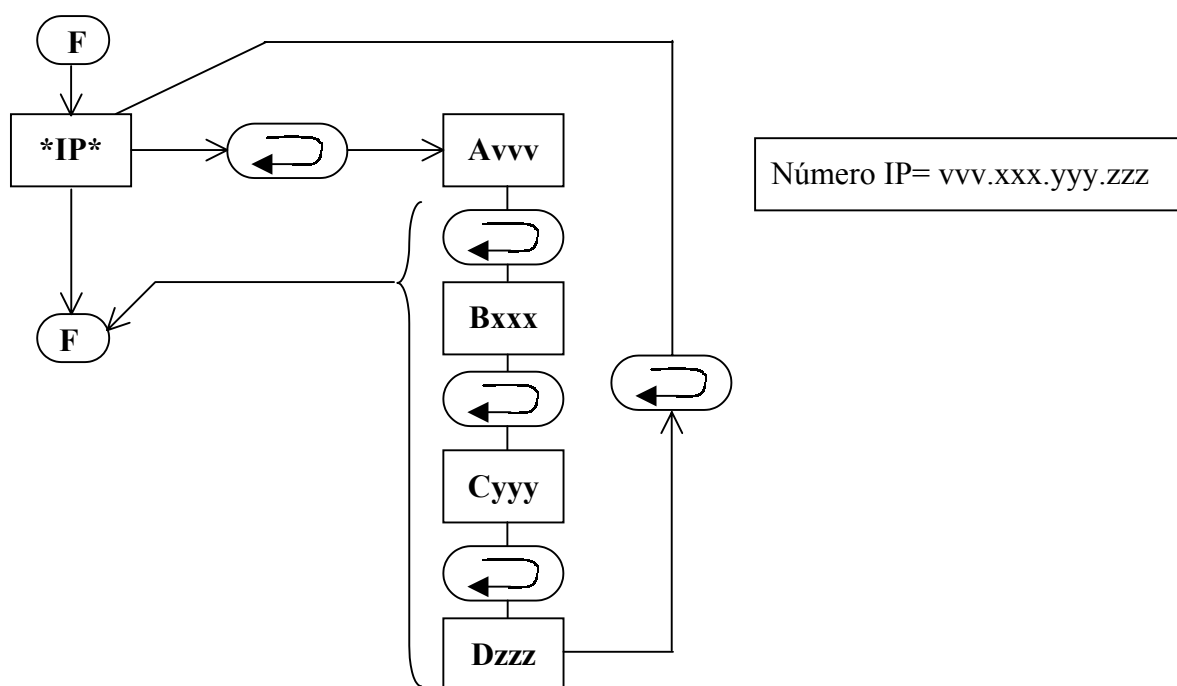


Figura 3.11 Edición de IP en SERRA.

Una vez dentro del submenú de cada número (Avvv, Bxxx, Cyyy o Dzzz), en el que los tres dígitos parpadean, pulsando simultáneamente las teclas « + » y « - » durante dos segundos, accedemos a la edición de cada dígito (sólo parpadea dicho dígito), que modificamos con las mismas teclas « + » o « - ». Para guardar el número, se pulsa la tecla «intro», y para pasar de un submenú a otro, se pulsa « intro » durante 2 segundos. Para salir, se vuelve a pulsar « F ».

En nuestro caso, el número de IP elegido es el 172.16.1.14.

Seguidamente, en el programa de control de la máquina CPC-300ib, configuramos el mismo número de IP. Se edita entrando en la ventana Red > Configuración.



Figura 3.12 Edición de IP en CPC-300ib.

3.4 Las matrices y punzones

Para la realización de los sinterizados es de especial importancia la elección de los materiales que se vayan a usar para la ejecución de las experiencias.

En todas las experiencias realizadas, obtenemos probetas cilíndricas de aproximadamente 12 mm de diámetro, para lo cual, se han usado diferentes punzones de aleación 98.9% Cu - 1% Cr - 0.1% Zr. Entre los punzones y el polvo metálico, se han intercalado obleas de una aleación de 75.3% W - 24.6% Cu.

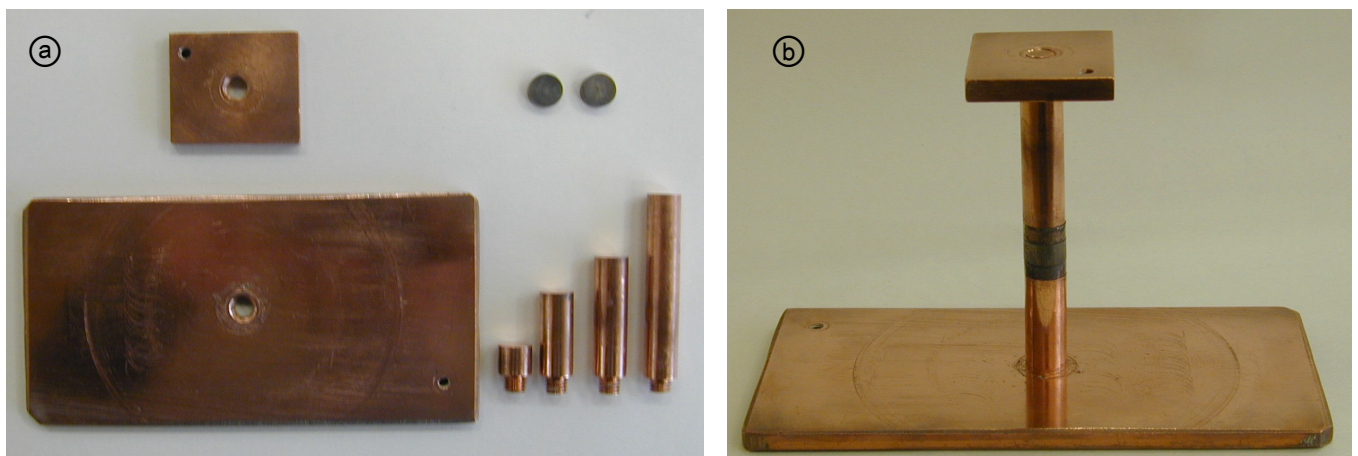


Figura 3.13 (a) Punzones y obleas, (b) conjunto montado.

Como continente de los polvos, la elección de la matriz se debe llevar a cabo con especial cuidado, pues el éxito de implementar esta modalidad de sinterización en la producción industrial requerirá una preparación de las experiencias, simple, rápida, limpia y barata.

Básicamente, la matriz que vayamos a utilizar, debe cumplir las siguientes propiedades:

- *Aislante eléctrico.* No debe dejar pasar la corriente eléctrica, para que así asegurar que toda la suministrada por la máquina, pasa a través de los polvos

metálicos, o al menos la parte en contacto con punzones y polvos debe ser aislante.

- *Resistencia mecánica.* Debe ser capaz de soportar las presiones a las que vamos a someter el espécimen sin deformarse, además resistir las presiones a altas temperaturas.
- *Resistencia térmica.* Las temperaturas que se alcanzan por efecto Joule pueden ser muy altas aunque en cortos periodos de tiempo, por lo que el choque térmico debe ser un factor a tener en cuenta.
- *Rugosidad superficial.* Las paredes en contacto con los punzones y polvos deben tener muy buena rugosidad superficial para evitar daños a éstos, un buen acabado superficial de los compactos que hagan fácil su extracción.
- *Geometría.* Debería ser cómodo y fácil de manejar.

Se han probado diferentes diseños de matrices que intentan cumplir todos los requisitos anteriores.

3.4.1 Matriz cerámica-metálica

Se aúnan un tubo cerámico de diámetro interior 12 mm y muy escasa rugosidad superficial, con un zuncho de acero que lo recubre y soporta las presiones a las que sometemos a la cerámica. Recubrimos la cerámica previamente con una lámina de cobre.

Combinamos así la resistencia mecánica del acero con la resistencia térmica y aislante de la cerámica. Sin embargo, este conjunto presenta el inconveniente de que es muy pesado, requiere mucho tiempo de montaje y la extracción del compacto es complicada.



Figura 3.14 Matriz cerámica-metálica montada.

3.4.2 Matriz de hormigón

Debido a los inconvenientes que presentaba la matriz de cerámica-acero se ha buscado otro material que sustituyera a la cerámica. Se eligió el hormigón por su capacidad como aislante y relativamente buena resistencia mecánica.

Se han realizado pruebas con cilindros de hormigón de áridos finos, para obtener buen acabado superficial. Como molde, usamos una base cilíndrica de aluminio con un vástago central que nos asegure la perpendicularidad del cilindro hueco que debemos dejar, y un tubo de PVC que recubre la base y donde introducimos el hormigón. El vástago central lo recubrimos con una goma para obtener la dimensión deseada y hacer más fácil su extracción (fig. 3.15). Recubrimos también la base del molde con cinta americana para que el cemento no se pegue.

Las proporciones cemento/áridos para la mezcla de hormigón eran de 1:3, con una relación agua/cemento de 0.4 en volumen. Tras verter el hormigón en el molde, es importante vibrar el conjunto para así evitar la mayor cantidad posible de poros interiores^[27].

Se ha dejado fraguar durante un mes y posteriormente se ha secado en horno durante 10 horas a 110 °C para eliminar el agua que quedaba atrapada. Esto último era necesario pues si no, al realizar la experiencia se observa como se evaporaba de forma brusca con la consiguiente pérdida de resistencia.

Para asegurar el aguante de la matriz, se aprieta exteriormente con abrazaderas metálicas.



Figura 3.15 Matriz de hormigón

Se ha intentado también que fragüe el hormigón en vacío para ver si se obtenía un compacto con pocos poros.

3.4.3 Matriz hormigón-cerámica

Observando las deficiencias de los dos anteriores modelos, se ha intentado mejorarlos uniéndolos, así se ha diseñado una matriz de hormigón, con el cilindro cerámico en su interior.

De esta forma, aprovechamos la escasa porosidad y baja rugosidad superficial de la cerámica y la buena resistencia a la compresión del hormigón. Los áridos del hormigón no tienen que ser ahora tan finos, lo que mejora su resistencia. El vástago lo recubrimos con aceite antes de introducir la cerámica y durante el vibrado hay que tener especial cuidado para que no entre hormigón para no complicar la extracción de la matriz una vez fraguada.



Figura 3.16 Matriz hormigón-cerámica con armadura metálica.

Para reforzar la cerámica e intentar que no se rompa, se han probado diferentes refuerzos, como fibra de vidrio, refuerzo metálico o abrazaderas. También se ha reforzado el hormigón con armadura metálica, para prevenir agrietamientos en el cuerpo de la matriz.

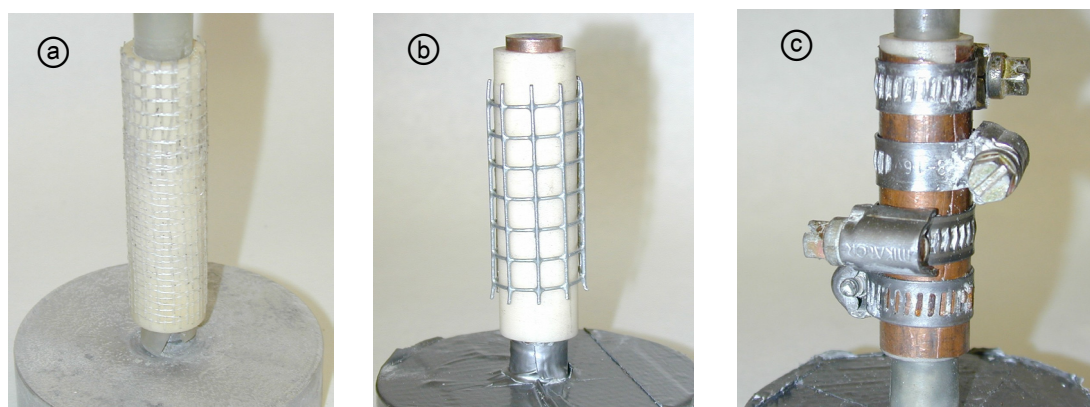


Figura 3.17 Cerámicas reforzadas con (a) fibra de vidrio, (b) malla metálica y (c) abrazaderas.

Como puede observarse en las anteriores figuras, se deja que el hormigón penetre en su parte inferior de la matriz, para así ayudar durante la extracción a que la cerámica no se desplace si está rota.

3.5 El equipo de activación

Los polvos metálicos tienen una gran tendencia a oxidarse debido a la alta relación existente entre la superficie y volumen que hace que tengan mucha capacidad de reaccionar. Estos óxidos, por lo general, son pésimos conductores eléctricos y se sitúan en la superficie del polvo. Esto hace que la intercara partícula-partícula esté formada por un material rico en óxido metálico que dificulta la circulación de la corriente eléctrica y, en definitiva, la imposibilidad de sinterización del espécimen.

Como ya se comentó anteriormente, la máquina de soldadura por puntos es capaz de proporcionar una gran intensidad de corriente eléctrica (alrededor de los 30.6 kA), pero a una tensión muy baja (máxima 10 V). Este hecho provoca que ante una dificultad al paso de la corriente, la máquina sea incapaz de aportar la energía necesaria que provoque la ruptura de las capas de óxido aislante. Por ello debemos romper las capas de óxidos mediante algún procedimiento externo a la máquina de soldadura. A este procedimiento de ruptura de las capas de óxidos la denominaremos **activación** del proceso de sinterización.

Se ha intentado un proceso de **activación eléctrica**. A la vez que se aplica la presión, mediante un elemento externo, se establece una diferencia de potencial entre los punzones superior a la que es capaz de aplicar la máquina.



Figura 3.18 (a) Autotransformador y (b) pinzas de activación eléctrica.

Esto se consiguió mediante un autotransformador de corriente eléctrica, (fig 3.18 (a)) El primario del autotransformador se conecta a la red eléctrica y la tensión de salida depende de un regulador que permite obtener de 0 a 220 V. Para limitar la intensidad que se alcanza en el secundario, dispusimos en el mismo un fusible limitador de corriente que impedía el paso de más de 20 amperios (la máxima intensidad que es capaz de soportar).

La salida del autotransformador termina en dos pinzas que se colocan en la matriz de sinterizado para asegurar el contacto eléctrico (fig. 3.18 (b)).