

# Capítulo 2

## Bases Teóricas

---

### Contenido

<b>2.1</b>	<b>LA CONSOLIDACIÓN DE POLVOS</b>	<b>9</b>
<b>2.2</b>	<b>EL PRENSADO EN CALIENTE</b>	<b>10</b>
<b>2.3</b>	<b>SISTEMAS DE PRENSADO EN CALIENTE</b>	<b>11</b>
2.3.1	EL PRENSADO UNIAXIAL EN CALIENTE	12
2.3.1.1	Calentamiento indirecto	12
2.3.1.2	Calentamiento directo	13
2.3.2	EL PRENSADO ISOSTÁTICO EN CALIENTE	14
<b>2.4</b>	<b>LA SINTERIZACIÓN POR RESISTENCIA ELÉCTRICA</b>	<b>15</b>
2.4.1	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	15
2.4.2	EVOLUCIÓN HISTÓRICA	15

---

# Bases teóricas

## 2.1 La consolidación de polvos

La compactación de polvos es un proceso por el cual las finas partículas de un material en polvo se unen mutuamente por la acción de una fuerza exterior, con o sin la aplicación de calor, para formar una pieza cohesionada. Este procedimiento de fabricación se conoce tradicionalmente con el nombre de *conformado por compactación*.

En aquellos tipos de conformado por compactación en los que sí se aplica calor (simultáneamente o con posterioridad a la aplicación de la presión), la etapa esencial es, sin duda, la *sinterización*; proceso por el cual las finas partículas se unen entre sí formando una pieza, simplemente por acción de la temperatura. La sinterización no es exclusiva de los procesos de conformado por compactación, y de hecho, no requiere que el polvo haya sido precompactado.

Si bien hoy día asistimos a una verdadera explosión de aplicaciones en la industria, el proceso de sinterización no es nada reciente, y ya era conocido hace miles de años. Los incas utilizaron la sinterización para su joyería de oro-platino. Los egipcios ya utilizaban materiales sinterizados (metálicos y cerámicos) desde el 3000 a.C. La enorme columna de Delhi en la India con sus 6.5 toneladas de peso, se fabricó hacia el 300 d.C. a partir de polvo de hierro (magnetita reducida). Secularmente se han venido fabricando monedas mediante la sinterización de polvos de cobre, plata y plomo.

La edad moderna de la sinterización comienza con Coodlidge, quien utilizó polvo de wolframio para fabricar un filamento duradero para la lámpara de Edison. Posteriormente, durante la década de 1930, se elaboraron con esta técnica bujías, carburos cementados, cojinetes de bronce poroso, aislantes eléctricos, y contactores eléctricos de grafito-cobre. Durante la década de 1940 la sinterización fue utilizada en la fabricación de aleaciones de wolframio, de combustible nuclear de dióxido de uranio, contactores eléctricos, aleaciones estructurales férreas y refractarias. En la última parte del siglo XX ha tenido lugar un enorme crecimiento de la práctica de la sinterización, especialmente en la creación de cerámicas técnicas. Se han dedicado grandes esfuerzos a la búsqueda de materiales con alta resistencia mecánica a elevada temperatura, con alta resistencia a la fractura, con alta resistencia al desgaste o con nuevas propiedades electrónicas. Hoy día, la sinterización se emplea en un amplio y diverso rango de productos entre los que se incluyen: implantes dentales, toberas de cohetes, alas de aeronaves pesadas, transducto-

res, turbocargadores, substratos semiconductores, palos de golf, etc. La mayoría de las aplicaciones modernas están orientadas hacia la consecución de los siguientes factores: economía de fabricación, mejora de propiedades y nuevas composiciones.

Si bien, como vemos, los materiales en polvo se emplean en multitud de aplicaciones de muy diversa índole, el presente trabajo se restringirá sólo al campo de la *pulvimetalurgia* (la rama de la metalurgia que estudia la fabricación y el procesado de los polvos metálicos) y dentro de ella, abordaremos únicamente una de las muchas modalidades de procesado que abarca: el *prensado en caliente*.

Aunque los términos *sinterización asistida por presión* (*Pressure Assisted Sintering*) y *prensado en caliente* (*Hot Pressing*) suelen utilizarse indistintamente, plantean realmente sutiles diferencias. Si en la *sinterización asistida por presión* la variable relevante del proceso es la temperatura y el objetivo primordial es el establecimiento de puentes de unión entre las partículas de polvo, en el *prensado en caliente*, la variable fundamental es la presión, y el objetivo primordial, la densificación. Es obvio, que su diferenciación resulta a veces muy difícil, porque generalmente se persigue la consecución de ambos objetivos, tanto la consolidación, como la densificación.

## 2.2 El prensado en caliente

Los orígenes del *prensado en caliente* como procedimiento pulvimetalúrgico se desconocen, pero casi con toda seguridad se remontan a la antigüedad. La tecnología actual comenzó con la fabricación de herramientas de diamante. La primera referencia escrita de este procedimiento se debe al ingeniero Paulin Gay en una patente de 1883. Desde entonces, no han cesado de surgir patentes basadas en esta técnica.

La principal ventaja de este procedimiento se presenta intuitivamente clara: a medida que la temperatura se aproxima a la temperatura de fusión del metal en polvo, su resistencia a la deformación va siendo cada vez menor, por lo que pueden conseguirse densificaciones totales (o muy próximas al 100%) empleando presiones relativamente bajas. No obstante, el principal atractivo de esta técnica no es el que se puedan emplear presiones más bajas (son pocos los casos en los que el procesado convencional de prensado en frío y sinterización resulta inviable porque requiera presiones excesivamente elevadas), la ventaja real, indirecta, reside en la posibilidad de alcanzar las densidades teóricas (o casi las teóricas) con presiones prácticas. En la fabricación de las herramientas de metal que contienen diamante industrial, por ejemplo, es difícil asegurar que no existe porosidad alrededor de las partículas de diamante a menos que se emplee el prensado en caliente. De hecho, puede decirse, que siempre que se conozcan bien las condiciones y las técnicas, y que los materiales sean susceptibles de sinterización, el prensado en caliente es la única forma de fabricar un compacto libre por completo de porosidad.

El método presenta otras ventajas adicionales, pero también algunos inconvenientes. Entre las ventajas podemos considerar las siguientes:

- A través del prensado en caliente se combinan el prensado y la sinterización en un solo paso, por lo que se elimina una etapa de procesado, y el tiempo extra requerido para la sinterización.
- No son relevantes los cambios dimensionales (*shrinkage*); el compacto prensado en caliente tiene forzosamente las dimensiones deseadas.

- Algunos tipos de polvo que no forman compactos consolidados cuando se emplea el prensado en frío, pueden lograrlo mediante el prensado en caliente.
- Normalmente se consiguen compactos con mejores propiedades físicas que si hubieran sido prensados en frío.

Como contrapartida, están presentes las siguientes dificultades prácticas:

- Los ritmos de producción son bajos. A priori, la velocidad del procesado en caliente no es comparable con la alta velocidad de una máquina automática de prensado en frío.
- A elevadas temperaturas, surgen dificultades derivadas de la indeseada soldadura del polvo con las paredes de los troqueles. La lubricación se convierte en un asunto especialmente delicado. A muy altas temperaturas, la elección de los materiales de la matriz llega a ser una cuestión muy limitadora, pues no es fácil encontrar materiales que sean lo suficiente resistentes, tengan la suficiente resistencia al desgaste y sean lo suficientemente inertes desde el punto de vista químico.
- Elevar la temperatura muy por encima de la ambiental requiere normalmente proteger al polvo con una atmósfera adecuada, lo que constituye un grave inconveniente desde el punto de vista práctico. Existen, no obstante, muchas situaciones en las que el prensado en caliente al aire libre es perfectamente posible.
- Se deben prever dispositivos para la expulsión del compacto y se debe tener en cuenta el tiempo de enfriamiento, normalmente bajo una atmósfera protectora.

Para ilustrar cómo las dificultades señaladas pueden ser superadas, resulta útil revisar ahora las técnicas prácticas del prensado en caliente que han sido empleadas o se emplean habitualmente.

## 2.3 Sistemas de prensado en caliente

Inicialmente el proceso de prensado en caliente consistía simplemente en rellenar un molde de grafito con el polvo a sinterizar, taponarlo con unos émbolos también de grafito, y aplicar calor, manteniendo la presión constante, hasta alcanzar la temperatura de sinterización. Desde entonces, se han desarrollado y utilizado experimentalmente muchos sistemas de prensado en caliente, muchos de ellos con fines industriales.

Atendiendo a la forma en que se aplica la presión, podremos distinguir:

- el **Prensado uniaxial en caliente** (*Axial Hot Pressing*) y
- el **Prensado isostático en caliente** (*Hot Isostatic Pressing*)

Ambos métodos persiguen objetivos similares: el conformado definitivo de la pieza, su consolidación (sinterización) y una densificación total.

### 2.3.1 El prensado uniaxial en caliente

El *prensado uniaxial en caliente* es el método pulvimetalúrgico más antiguo de compactación en caliente. El polvo, o un compacto preformado, es colocado en una matriz rígida y compactado mediante la acción de unos punzones (de simple, o doble efecto).

Los materiales para los troqueles deben seleccionarse teniendo en cuenta la resistencia y la naturaleza química del polvo en las condiciones del prensado en caliente. El grafito es el material más común, permitiendo temperaturas de prensado de hasta 2500 °C. Las matrices que han de soportar presiones muy altas se fabrican a veces de carbono reforzado con fibra de carbono, con wolframio, con aleaciones de cobalto, con aceros refractarios y con materiales cerámicos.

Las presiones de compactación típicas pueden llegar hasta los 100 MPa para las matrices de acero y algo menores para las matrices de grafito. Para los procedimientos que aprovechan la presencia de una fase líquida, se prefieren presiones más bajas, para evitar que el líquido emigre a la superficie del compacto. Los tiempos de procesado pueden variar desde algunos segundos (con las técnicas más rápidas), hasta de una o varias horas (con las más lentas). El prensado axial en caliente es un método de fabricación importante para cierto tipo de cerámicas y también para la fabricación de composites con base metálica. Sin embargo, actualmente está cediendo terreno al prensado isostático en caliente, debido a que sus ritmos de producción son más bajos, sus presiones son más limitadas y, además, no se distribuyen uniformemente.

El calentamiento del polvo, o del compacto, puede realizarse directa o indirectamente. Por esta razón, los distintos métodos habitualmente empleados, pueden clasificarse según se observa en la figura 2.1.

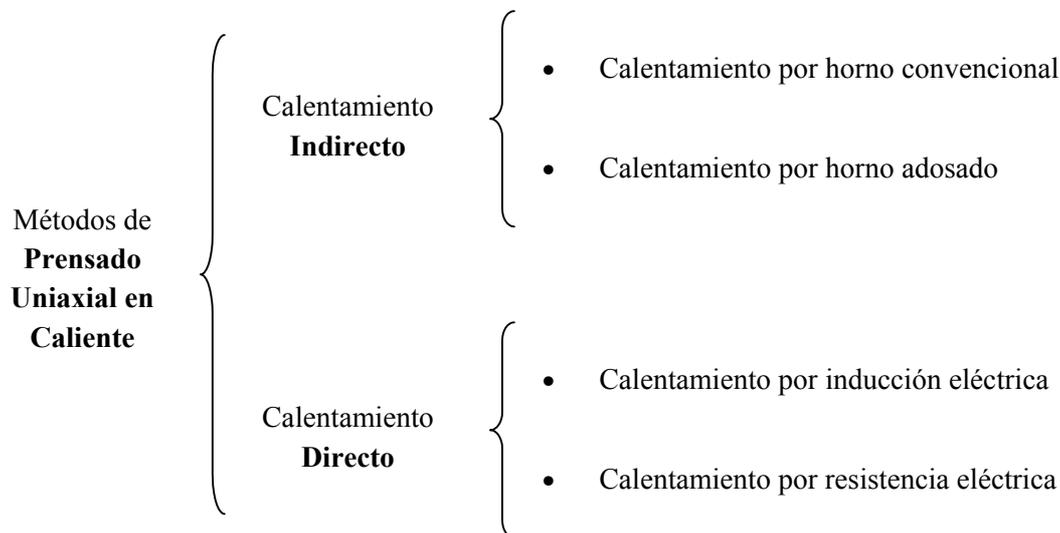


Figura 2.1 Clasificación de los métodos de prensado en caliente

#### 2.3.1.1 Calentamiento indirecto

El método más simple de prensado en caliente consiste en introducir en el interior de un horno una matriz fabricada con un material resistente al calor y cargada con el polvo metálico (o la mezcla de polvos), trasladarla a la prensa una vez calentada, y prensar allí el polvo mientras la matriz retiene aún el calor. Este sencillo método tiene,

sin embargo, ciertos inconvenientes: las matrices son pesadas y caras, son necesarias muchas matrices, pues los ritmos de producción son bajos, se requieren sistemas adicionales para trasladar las pesadas y calientes matrices, el horno debe ser potente para calentar, en tiempos razonables, las grandes masas metálicas de las matrices, etc.

Una técnica igualmente simple, y que elimina la mayor parte de las dificultades anteriores, consiste en aplicar la presión simultáneamente al calentamiento. Esto puede conseguirse adosando un horno a la propia matriz. El método puede permitir llegar a temperaturas más altas (próximas a la de fusión), pues no es necesario la manipulación ni el traslado de las pesadas matrices. Además, si las temperaturas son más altas pueden emplearse presiones más bajas, y los troqueles pueden ser no-metálicos, más ligeros y también mucho más baratos.

El horno puede ser de muchos tipos; quizás el más común sea el horno de gas (gas carbónico, propano, acetileno). Su principal ventaja es su economía y mayor rapidez que los hornos eléctricos por radiación. Un método elegante, pero no necesariamente mejor, es calentar la matriz (normalmente de grafito) mediante el paso de corriente eléctrica en la dirección de prensado o perpendicularmente a ella. La propia matriz actuaría como horno de calentamiento. El principal problema es que las intensidades de corriente requeridas pueden ser muy elevadas, sin olvidar que, como en los casos anteriores, se ha de esperar el tiempo necesario para que el compacto alcance la temperatura de equilibrio. Otro método que también utiliza la corriente eléctrica es el calentamiento de la matriz por inducción de alta frecuencia. Los equipos suelen ser caros y, como el caso anterior, aparecen problemas asociados con la medida de la temperatura.

### 2.3.1.2 Calentamiento directo

Ya dijimos que una de los principales inconvenientes del prensado en caliente es la dificultad de encontrar materiales apropiados para los troqueles, que deben mantener las adecuadas propiedades de resistencia mecánica a la temperatura de trabajo. Esta dificultad puede ser superada, al menos parcialmente, calentando únicamente el material que debe ser prensado y no la matriz que lo contiene.

No existen razones por las que la fuente eléctrica de calor no sea el propio compacto, ya sea el calentamiento por *conducción* (efecto Joule) o por *inducción*. A primera vista esto es una idea atractiva, puesto que permitiría reducir el consumo energético (pues no hay que calentar la gran masa de la matriz) y permitiría, además, utilizar matrices térmicamente aislantes que conservarían el calor, reduciendo las pérdidas por radiación.

En el calentamiento del polvo por inducción se deben cumplir tres requisitos fundamentales para que el procedimiento sea viable:

1. los polvos deben ser eléctricamente conductores y haber alcanzado alta densificación,
2. para la inducción deben utilizarse frecuencias del orden de los megahercios, y
3. las matrices y los punzones deben ser cerámicos (en general, no conductores).

Con estas condiciones el calentamiento directo por inducción es posible y, además, muy rápido. El control de la temperatura puede resultar difícil; su medida con pirómetros ópticos directos sólo es posible si las matrices cerámicas son transparentes. La instalación de termopares en la frontera matriz / compacto es mecánicamente difícil y, además, el sensor puede proporcionar medidas falsas como consecuencia de la autoinducción. Otro inconveniente importante es que los equipos necesarios para proporcionar la alta frecuencia suelen ser costosos.

El calentamiento por resistencia eléctrica del polvo se consigue haciendo pasar una corriente eléctrica a través del polvo mientras que simultáneamente puede estar aplicándose presión. Debido a los tiempos de procesado tan extremadamente cortos (del orden de segundos) propios de este tipo de prensado en caliente, los métodos convencionales para la medida de la temperatura y de su distribución en el compacto, tales como pirómetros o termopares, no pueden ser utilizados. La determinación de la densidad, microestructura y propiedades del material resultante sólo puede lograrse a través del método de ensayo y error aplicado a cada material.

Esta técnica, si bien puede parecer una solución muy atractiva, se enfrenta, sin embargo, a algunas dificultades, a saber:

- a. La resistencia eléctrica del polvo y del compacto cambia considerablemente al variar la densidad y la temperatura. Esto exige por lo tanto, sofisticados aparatos electrónicos para el control de la temperatura, pero cuya tecnología ya está desarrollada y suficientemente contrastada en el campo de la soldadura.
- b. La distribución de la temperatura en el interior del compacto puede ser irregular, particularmente debido al enfriamiento que provoca la pared de la matriz.
- c. Incluso la distribución de la corriente dentro del compacto llega a ser extremadamente compleja, a menos que el compacto tenga una forma muy simple.
- d. En el ámbito teórico no se dispone de modelos que describan la evolución de las variables del proceso, por lo que no se puede conocer la distribución de temperaturas dentro del compacto durante el proceso.

### 2.3.2 El prensado isostático en caliente

El *prensado isostático en caliente* (HIP) es un proceso de compactación en caliente bajo condiciones de presión isostática. Pueden conseguirse condiciones próximas a las isostáticas mediante un prensado axial en caliente sumergiendo el compacto en un medio apropiado que transmita la presión de modo cuasi-omnidireccional, por ejemplo, un lecho de polvo cerámico. Las condiciones completamente isostáticas requieren, sin embargo, un fluido para la transmisión ideal de la presión en todas las direcciones. En el rango de temperaturas para la compactación en caliente de los materiales de mayor interés, pueden emplearse gases para este propósito. La presión externa sólo es efectiva si el medio que transmite la presión no puede penetrar a través de los canales que suponen los poros abiertos del compacto poroso. Esto nos obliga a sellar los poros, lo que puede conseguirse mediante una bolsa flexible. Para temperaturas superiores, sin embargo, esta solución puede no resultar útil. Una alternativa consiste en la eliminación de la porosidad abierta mediante sinterización sin presión y la aplicación de una gran presión para la reducción de la porosidad residual.

Aunque el HIP es, hoy día, una técnica objeto de intensa investigación, no profundizaremos más en ella, pues se aleja del objetivo de este trabajo.

## 2.4 La sinterización por resistencia eléctrica

### 2.4.1 Descripción del proceso

Ya dijimos que el calentamiento del polvo puede lograrse, de modo directo, haciendo pasar una corriente eléctrica a través del material al tiempo que se aplica presión. La temperatura deseada se consigue gracias a la energía calorífica disipada por efecto Joule. El método es adecuado tanto para polvos sin compactar como para precompactos. Lenel<sup>[1]</sup>, utilizando corrientes de alta intensidad y baja tensión, lo denominó **sinterización por resistencia eléctrica bajo presión** (*Resistance Sintering under Pressure*). No obstante, son muchas las variantes que han surgido a partir de esta idea y hoy día se barajan una gran cantidad de nombres. Si la corriente eléctrica que se hace pasar a través del material es de alta intensidad y alta tensión, procedente, por ejemplo, de la descarga de un banco de condensadores, el método se denomina frecuentemente **sinterización por descarga eléctrica** (*Electrical Discharge Sintering*). Si la corriente eléctrica empleada es de alta frecuencia el método recibe el nombre de **sinterización por chispas** (*Spark Sintering*). No obstante, todos ellos tienen en común el hecho de que el calentamiento se realiza de modo directo mediante el paso de corriente eléctrica y aprovechando la resistencia eléctrica del polvo. Por eso, utilizaremos la denominación más general dada por Lenel<sup>[1]</sup> para englobar a todas las variantes.

Las diferencias más significativas entre esta técnica y el prensado en caliente convencional son:

1. El calor es generado en el interior del propio polvo y no cedido por la matriz.
2. El polvo y la matriz están fríos inicialmente.
3. Las presiones utilizadas pueden ser altas, aunque inferiores a las empleadas en el prensado en frío convencional.
4. Los tiempos de sinterización son muy cortos, usualmente, una fracción de segundo y a lo sumo, de unos pocos segundos.
5. El enfriamiento que sigue a la sinterización es rápido, como el propio de un temple.

Además del calentamiento por efecto Joule, la corriente eléctrica produce otros efectos más complejos como: microdescargas entre las partículas, fusiones parciales e incluso conversión del metal en plasma. Todo ello confiere al procedimiento características propias que lo hacen muy diferente de la sinterización convencional, entre las que cabe destacar su rápida cinética, y que complican enormemente su modelado teórico. Si añadimos a todo ello la gran cantidad de variantes que existen, puede comprenderse por qué este procedimiento, pese a no ser tan reciente, aún se encuentra en una fase muy poco desarrollada, sobre todo, en el ámbito teórico.

### 2.4.2 Evolución histórica

La sinterización por resistencia eléctrica de polvos metálicos ha sido sugerida repetidas veces a lo largo del siglo XX. En una patente de 1933, Taylor<sup>[2]</sup> realizó un primer intento de compactación de polvos metálicos haciendo pasar a través de ellos una corriente eléctrica. Utilizó para ello un dispositivo consistente en un tubo de vidrio, que

contenía el polvo metálico, taponado por encima y por debajo por dos émbolos. El polvo era calentado por el paso de la corriente eléctrica que lo atravesaba, al tiempo que se aplicaba presión. El aparato fue concebido principalmente para el prensado en caliente de los carburos cementados. Aunque en esta patente se evidencia claramente el principio de la sinterización por resistencia bajo presión, no ofrece, sin embargo, mucha ayuda práctica. Se menciona que el periodo de sinterización es de un segundo o de una fracción de segundo, que las presiones pueden ser bajas, del orden de la atmosférica o algo más altas, ejercidas por palancas, pero nada se dice acerca de los valores de la densidad de corriente.

En 1940, Jones<sup>[3]</sup> sugirió la utilización de una máquina de soldadura por puntos para este método. Esta idea fue recogida por Cremer<sup>[4]</sup> para la compactación de materiales no féreos tales como el cobre, el latón, el bronce y el aluminio. La matriz metálica era aislada del polvo por medio de un revestimiento aislante. Empleando una densidad de corriente de 62 kA/cm<sup>2</sup>, presiones de 69 a 138 MPa consiguió unos tiempos de sinterización de 1 a 2 ciclos de una corriente de 60 Hz de frecuencia. En 1945 Ross<sup>[5]</sup> propone una modificación del método anterior consistente en la utilización de corrientes y presiones que variaban gradualmente.

La sinterización eléctrica bajo presión fue estudiada intensamente en el *Rensselaer Polytechnic Institute*. Con estos estudios se intentó comprender las características básicas del proceso y aprender en qué aspectos la sinterización por resistencia bajo presión difería de los otros procesos pulvimetalúrgicos. Con este fin, se investigó la aplicación de la sinterización por resistencia a un gran número de diferentes materiales, tales como el níquel y el cobalto con aleaciones de alta temperatura como base, metales refractarios, molibdeno, titanio, zirconio y algunas de sus aleaciones, carburos cementados y otros CERMETS.

Las interesantes ideas desarrolladas por Lenel en 1955<sup>[1]</sup>, en las que se utilizaban corrientes de muy alta intensidad y baja tensión durante periodos de tiempo muy cortos (0.1 a 0.5 s) parecían abrir las puertas a los procesos de prensado en caliente automatizados y de gran velocidad. Los compactos pequeños eran prensados en matrices recubiertas internamente con cerámica bajo presiones en el rango de los 77 a los 154 MPa. Se hacía pasar una corriente a través del polvo desde unos electrodos compuestos formados por un punzón de aleación de cobre y una oblea de metal refractario en contacto directo con el polvo. Las corrientes empleadas tenían intensidades que oscilaban entre 15 y 25 kA con tensiones de 10 a 40 V, en forma de uno o dos trenes de pulsos, de distinta duración. Se recomendaba que el primer tren aplicase una tensión más elevada, para provocar la ruptura de las resistencias de contacto. Una vez producida la ruptura, convenía disminuir la tensión para evitar la fusión.

Una variante de este método, la denominada **Sinterización por chispas** (*Spark Sintering*), utiliza precisamente las descargas de chispas eléctricas entre las partículas de polvo para activar los gases que las rodean y promover así la creación de cuellos de enlace entre ellas. Esta variante, que fue concebida como un proceso más económico y práctico<sup>[6, 7]</sup> ha demostrado ampliamente la viabilidad de la sinterización de polvos metálicos en un corto intervalo de tiempo (de 5 a 30 s)<sup>[8, 9, 10]</sup>. Una corriente eléctrica de alta densidad (una combinación de corriente alterna de frecuencia moderadamente alta y de corriente continua) se hace pasar a través del polvo sometido a presiones relativamente bajas. Boesel<sup>[11]</sup> experimentó con una presión de partida de entre 2.8 y 3.5 MPa que aumentaba hasta el valor final de 13.4 MPa para mejorar la densificación. Este y otros estudios parecen confirmar que el tamaño de grano no cambia apreciablemente durante el proceso de sinterización.

Otro dispositivo de compactación de mayor potencia fue diseñado por Shephard y Croft<sup>[12]</sup>, y Hull-Daniels<sup>[13]</sup> para la compactación de polvos refractarios tales como  $TiB_2$  y SiC. Ellos denominaron al método “sinterización por resistencia de impulsos” (*Impulse Resistance Sintering*). Aplicaron al espécimen de polvos una corriente rectificada de 40 V y 3 kA. Dado que la matriz empleada era de grafito la mayor parte de la potencia se disipaba a través de la matriz. La compactación se debía, por tanto, a la sinterización provocada por el calentamiento exterior. Parece así que este dispositivo no proporciona ninguna ventaja frente a los procesos de compactación por calentamiento por inducción. En su trabajo, los autores concluyeron que la medida de la temperatura no podía ser una buena guía del progreso de la sinterización por resistencia y que la densidad relativa de los diferentes componentes en una mezcla parecía tener un considerable efecto sobre la densidad final.

Todos los métodos mencionados hasta aquí empleaban una fuente eléctrica de baja tensión y alta intensidad. Se han ideado, no obstante, otras técnicas que también utilizan la corriente eléctrica como medio directo de calentamiento, pero procedente de la descarga de un banco de condensadores. El método proporciona alta tensión y alta intensidad y se conoce con el nombre de **sinterización por descarga eléctrica** (*Electric Discharge Sintering*). Saito y col.<sup>[14]</sup> comprobaron que los compactos preprensados sometidos a descarga mejoraban notablemente su densificación durante una posterior sinterización tradicional en horno. Emplearon para la descarga eléctrica un condensador de 60  $\mu F$  cargado hasta 15 kV. Concluyeron que la mejora en la densificación se debía a que la descarga lograba eliminar las capas de óxido superficiales de las partículas metálicas. Las medidas de las resistencias eléctricas antes de la descarga ( $70\Omega$  a 58.8 MPa) y después (menor de  $0.01\Omega$ ), así lo constataban.

Al-Hassani y col.<sup>[15, 16, 17]</sup> realizaron un extenso trabajo sobre compactación de polvos metálicos por descarga de alta tensión y alta densidad de corriente procedente de un banco de condensadores. Observaron que el compacto de polvo, alojado en un tubo de vidrio, no quedaba pegado a las paredes como consecuencia de la poderosa fuerza magnética transitoria que se creaba por el paso de la corriente de alta frecuencia<sup>[18]</sup>. Pese a la importancia y extensión de estos trabajos, no se trataron los aspectos metalúrgicos del problema.

Un estudio metalúrgico de materiales compactados por disipación directa de energía eléctrica a través del espécimen de polvo fue realizado por Hara y Akechi<sup>[19]</sup> recuperando la vieja idea de Lenel (baja tensión, alta intensidad). Los parámetros empleados en su compactación fueron: presión de 98 a 127 MPa, tensión de 2 a 5 V y corrientes continua y alterna durante un tiempo de 0.5 a 3 s. Concluyeron que con polvos de titanio se requería una presión mayor de 98 MPa para conseguir una densificación superior al 96%. Comprobaron que con el aumento de la potencia de entrada aumentaba la temperatura, la densificación y mejoraba la resistencia a la tracción.

Los investigadores soviéticos también han desarrollado un extenso trabajo sobre varias modalidades de la sinterización eléctrica. Algunos de sus trabajos esbozaban tímidos avances en el modelado teórico<sup>[20, 21]</sup>. En un excelente trabajo G.L. Burenkov y col.<sup>[22]</sup> estudiaron el empleo de materiales alternativos para los revestimientos de las matrices destinadas a la fabricación de carburos cementados de base Cu-Sn. Tales materiales debían sustituir a los costosos revestimientos cerámicos empleados por Lenel y a las matrices de grafito, empleadas por la gran mayoría de los investigadores, que introducían pérdidas. Proponían un excelente sustituto, barato y permitía una media de 10 ciclos. Desafortunadamente, el material propuesto, un cemento-asbestos, hoy día ha caído en desgracia. No obstante, su trabajo permite imaginar futuras vías de investiga-

ción. Una gran parte de los trabajos soviéticos en esta dirección está sin traducir del ruso, lo que constituye un factor limitante.

Más recientemente la sinterización eléctrica se ha venido utilizando en la fabricación de composites<sup>[23]</sup>, y otras aplicaciones dirigidas a inhibir a mantener un tamaño de grano nanométrico durante la sinterización. Para este propósito, una técnica rapidísima como es cualquiera de las distintas modalidades de la sinterización eléctrica, resulta de vital importancia. En esta dirección se desarrollan los recientes trabajos de Moriguchi y col.<sup>[24]</sup>, por citar sólo algún ejemplo.