

CAPÍTULO 22: PULVIMETALURGIA

22.1. INTRODUCCIÓN

Esencialmente, los metales pueden ser preparados sólo de dos maneras para darle forma útil, a saber: fundición o técnicas con polvos llamada **Pulvimetalurgia**.

El atractivo mayor de la Pulvimetalurgia (PM) es la habilidad de fabricar piezas de formas complejas con excelentes tolerancias y de alta calidad con relativamente bajo costo. En resumen, la PM toma polvos metálicos con ciertas características como tamaño, forma y empaquetamiento para luego crear una figura de alta dureza y precisión. Los pasos claves incluyen la compactación del polvo y la subsiguiente unión termal de las partículas por medio de la sinterización. El proceso utiliza operaciones automatizadas con un consumo relativamente bajo de energía, alto uso de materiales y bajos costos capitales. Estas características hacen que la PM se preocupa de la productividad, energía y materiales primas. Consecuentemente, el área está creciendo y reemplazando métodos tradicionales de formar metales. Además, PM es un proceso de manufactura flexible capaz de entregar un rango amplio de nuevos materiales, microestructuras y propiedades. Todo esto crea un nicho único de aplicaciones para la PM, como por ejemplo compuestos resistentes al desgaste

Las aplicaciones de la PM son bastante extensivas. Algunos ejemplos del uso de polvos metálicos: filamentos de tungsteno para ampolletas, restauraciones dentales, rodamientos auto-lubricantes, engranes de transmisión de automóviles, contactos eléctricos, elementos de combustible para poder nuclear, implantes ortopédicos, filtros de alta temperatura, pilas recargables, y componentes para aeronaves. La tabla 1 provee una colección de usos típicos de componentes provenientes de la PM.

Tabla 1 Ejemplos de usos de Polvos Metálicos

APLICACIÓN	EJEMPLOS DE USO
abrasivos	ruedas pulidoras metálicas, equipos de molienda
aeroespacio	motores de jet, escudos de calor, boquillas de turbina
automóviles	válvulas, engranes, varillas
químicos	colorantes, filtros, catalíticos
construcción	techado de asfalto, calafatear
eléctrico	contactos, conectores
electrónico	tintas, paquetes microelectrónicos, lavatorios de calor
hardware	candados, herramientas, herramientas de corte
tratamiento de calor	calderas, termocuplas, bandejas de correa
industrial	absorción de sonido, herramientas de corte
uniones	soldadores, electrodos, llenado de soldadura

Tabla 1: continuación



APLICACIÓN	EJEMPLOS DE USO
lubricación	grasas
magnético	relays, imanes, núcleos
manufactura	moldes, herramientas, rodamientos
medicina/dental	implantes de cadera, fórceps, amalgamas
metalúrgico	recubrimiento metálico, aleaciones
nuclear	escudos, filtros, reflectores
equipos de oficina	copiadores, cámaras, fotocopiadores
artillería	fusiles, munición, penetradores
personal	vitaminas, cosméticos, jabones, lápices
petroquímico	catalíticos, brocas
plásticos	herramientas, moldes, llenadores, cemento, superficies de desgaste
impresión	tintas, laminates
pirotécnicos	explosivos, combustible, colorantes, bengalas

22.2. HISTORIA

Los primeros usos de polvos metálicos han sido rastreados hacia varios lugares. Por ejemplo, polvos de oro fueron fusionados sobre joyas por los Incas, y los Egipcios utilizaron polvos de acero en el año 3000 AC. Otro ejemplo de uso temprano es la Columna de Delhi en la India la que data al año 300 DC. Esta columna fue hecha de 6.5 toneladas de acero en polvo.

Inicialmente se usó la pulvimetalurgia para obtener piezas de aquellos metales difíciles de fundir industrialmente debido a sus elevados puntos de fusión. La primera aplicación directa de ella parece haber sido en la manufactura de lingotes de platino en el siglo XIX, al mismo tiempo, se fabricaron monedas de polvos de cobre, plata y plomo acuñadas y sinterizadas. En 1855 Towsend empezó a usar las amalgamas dentales (polvo de plata en mercurio). Pero no fue hasta principios del siglo XX que tuvo lugar un desarrollo serio del proceso con la manufacturación de alambre de tungsteno para filamentos de lámparas (Coolidge). En los años 30 se desarrollaron rodamientos porosos de bronce y contactos eléctricos de grafito-cobre. Luego siguieron los materiales de carburos sinterizados para herramientas (por ejemplo, WIDIA: carburo de tungsteno en cobalto), aleaciones estructurales férreas y aleaciones de metales refractarios.

Desde los años cuarenta, varios materiales menos comunes han sido procesados desde polvos incluyendo metales refractarios y sus aleaciones (Nb, W, Mo, Zr, Ti y Re). Adicionalmente, el crecimiento de metales estructurales ha avanzado igual en el período. La mayoría de las piezas estructurales producidas de polvos son basadas en hierro.



Igual de emocionante ha sido la evolución de las aplicaciones, inicialmente, componentes basados en polvos fueron seleccionados simplemente por su bajo costo. Más recientemente, la principal razón de seleccionar una ruta de PM ha sido el mejoramiento de la calidad, homogeneidad o propiedades en conjunto de costo atractivo y productividad. Las superaleaciones de altas temperaturas de níquel, la dureza específica de aleaciones de aluminio para aeronaves y compuestos de aluminio con expansión termal controlada son algunos buenos ejemplos de esta evolución. No solo podrán ser fabricados con mejor economía de material por medio de polvos, sino también por nuevas y mejores composiciones que están siendo desarrollados así aprovechando el control químico y de la microestructura. La expansión de los procesos de PM en las áreas que requieren materiales de alta calidad y propiedades únicas crearán más oportunidades para el futuro.

Hoy en día este proceso ya no está confinado al tratamiento de materiales muy refractarios o que no pueden obtenerse por otra vía, sino que se ha extendido de manera que incluye la manufactura de aleaciones que pueden producirse también por fundición. Por ejemplo, los imanes ALNICO (Al + Ni + Co) que pueden fabricarse por fusión pero puede producirse una aleación magnéticamente superior empleando metalurgia de polvos. En las piezas fundidas la presencia de porosidad interna puede considerarse como un defecto serio, pero si se obtiene un grado controlado de porosidad este sería de mucha utilidad en productos tales como los cojinetes autolubricados y en filtros, sólo posible con el uso de polvos de tamaño adecuado.

Cabe señalar, que el término Pulvimetalurgia se aplica también al procesamiento de materiales cerámicos y compuestos cerámico-metal.

22.3. VENTAJAS

La fabricación de objetos sólidos a partir de polvos, sin pasar por la fase líquida, ha sido usada cuando hay problemas técnicos tales como:

- 1) Alto punto de fusión (tungsteno, molibdeno), o gran diferencia entre los puntos de fusión de los elementos de aleación.
- 2) Fácil contaminación del metal fundido por la atmósfera o por el crisol o material del molde
- 3) Obtención de un tamaño de grano demasiado grande y/o estructuras segregadas durante la solidificación que dificulta la laminación o extrusión posterior del material.

Una segunda ventaja importante es la habilidad de producir aleaciones o combinaciones de materiales (por ejemplo metales con cerámicas) que no son controlables por relaciones en diagramas de fases (solubles mutuamente), como sería el caso de la solidificación de un líquido. Por ejemplo, escobillas para motores eléctricos de cobre - carbono y herramientas de corte metal - cerámicas. La tercera razón es de índole **económica**. Piezas pequeñas tales como engranajes, bujes, etc. pueden hacerse con dimensiones muy precisas por prensado y sinterizado de polvos. La ventaja reside principalmente en la eliminación o minimización del maquinado. La



materia prima se aprovecha prácticamente en un 100% puesto que no hay pérdidas a través de cada una de las etapas de fabricación. El proceso asegura la uniformidad de las dimensiones y de las propiedades de las piezas a través, de las operaciones repetitivas, idénticas para series extremadamente grandes.

22.4. ETAPAS DEL PROCESO

Si se somete el polvo metálico a una presión suficientemente elevada, tiene lugar un cierto grado de aglomeración entre las partículas aún a temperatura ambiente. Si se calienta la masa compactada, se mejora la coherencia entre las partículas, por sinterización. La temperatura usada es mayor que la de recristalización, pero menor que la de fusión, aunque puede exceder, en algunos casos, la de fusión de algunos de los metales componentes, en consecuencia esto se funde y se convierte en la matriz aglomerante para las partículas del otro metal. Por lo tanto, las etapas del proceso de pulvimetalurgia son:

1. Producción de polvo de los metales que serán utilizados en la pieza
2. Mezclado de los metales participantes
3. Conformado de las piezas
4. Sinterizado de las piezas
5. Mecanizado
6. Tratamientos térmicos

22.4.1. OBTENCIÓN DE LOS POLVOS

Si no se dispone de una cantidad adecuada de materia prima en forma de polvo ninguno de los productos podría ser hecho en forma comercial.

Los polvos se pueden producir de varios modos que pueden clasificarse en tres grupos métodos físicos, químicos y electrolíticos.

Entre el primer método vale la pena mencionar la simple **pulverización mecánica** por Maquinado, (limado) y para materiales frágiles la molienda y el triturado etc. Otro método es la **atomización** que consiste en hacer pasar un chorro de metal fundido frente a una corriente de aire o gas inerte comprimido o agua. Se ha usado para obtener polvo de Cu, Zn, Pb. Al y Fe. **Condensación** del vapor del metal también ha sido usada para el Zn, Cadmio y magnesio. Entre los métodos químicos destaca la reducción del óxido de tungsteno y otros metales refractarios en el estado sólido con una corriente de hidrógeno. También es aplicado por el fierro en la reducción directa obteniéndose el hierro esponja. Otros procesos químicos muy usados son el proceso de **hidruro** y el de **carbonilo**. Algunos metales pueden hacerse combinar con hidrógeno formando hidruros. Los hidruros de Ta, Nb y Zr son estables a temperatura ambiente pero comienzan a disociarse en hidrógeno y el metal puro en forma de polvo a 350°

C. Similarmente el Fe y el Ni se combinan con CO formando carbonilos volátiles,

$\text{Ni}(\text{CO})_4$, que se descomponen luego en una cámara fría, de manera que se depositan esferas de metal muy puro. El método de deposición electrolítico es usado principalmente para producir polvo de cobre. El polvo obtenido de este modo tiene forma dendrítica.

22.4.2. MEZCLADO DE POLVOS

MOLINO DE BOLAS

Es el método más ampliamente utilizado para la reducción de tamaños de partículas y el mezclado de polvos.

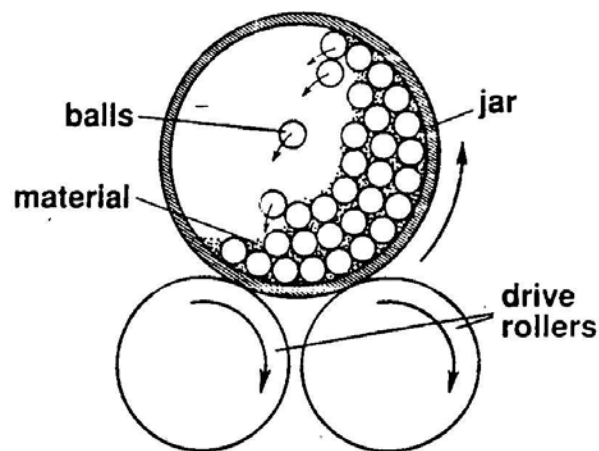


Figura 1: Esquema de un molino de bolas

DESCRIPCIÓN

- carga 25, 30-40%
- contenedor
- medio de molienda (50%)
- medio de mezcla

}	seco
	húmedo

EFICIENCIA:

Efecto cascada $v \leq 30\sqrt{r}$ (r : radio contenedor en metros), velocidades mayores hacen que el medio de molienda se centrifugue solidario al cilindro.

La rapidez con que se realiza la molienda está determinada por la densidad, dureza y el tamaño relativo, tanto de las partículas de polvo como del medio de molienda

Medios de molienda: WC, acero, ZrO_2 , Al_2O_3 , Si_3N_4 , sílice, porcelana. Bolas, cilindros cortos, barras.

Ventajas: sencillo, barato, polvos activos.

Problemas: **CONTAMINACIÓN** por desgaste de contenedor y medio de molienda.

- Proceso largo
- Distribución de tamaños amplia
- Difícil tamaños pequeños

ATRITOR

Como en el molino de bolas hay:

- Contenedor
- Medio de molienda
- Carga
- Medio de mezcla

Las bolas se agitan por unos brazos montados en un eje.

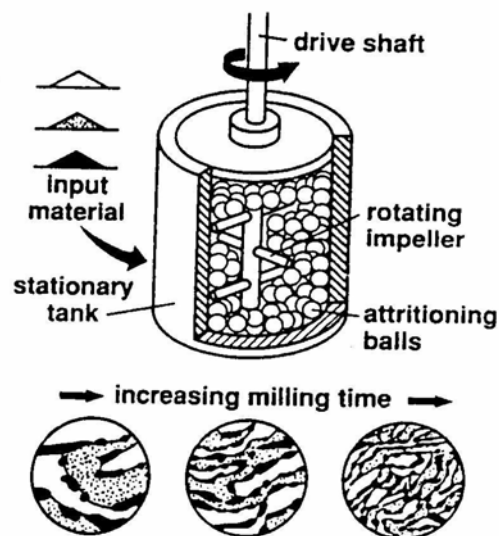


Figura 2: Esquema de un atritor

Con respecto al molino de bolas es:

- Más rápido
- Obtiene menores tamaños de partícula ($< 1 \mu\text{m}$)
- Se produce menos contaminación
- Se puede realizar en seco, húmedo, vacío o con atmósfera controlada.

22.4.3. CONFORMADO DE LOS POLVOS

En esta etapa se pretende dar CONSISTENCIA y FORMA a los polvos. En realidad se trata de producir una pieza en "verde" que se pueda manipular.

Las principales técnicas para la consolidación de polvos y producción de formas sin

aplicación de temperaturas elevadas son:

Prensado: unidireccional
isostático

Conformado plástico: extrusión
moldeo por inyección

PRENSADO UNIAIXIAL

La compactación unidireccional es el método más común de obtener el conformado y la consolidación de polvos cerámicos, como paso previo a la densificación a elevadas temperaturas. Puede definirse como el conformado y la compactación simultánea de un polvo granular, mediante su compresión confinado en una matriz rígida. La práctica extensiva de la compactación unidireccional se debe a su capacidad de generar de forma rápida y fácilmente automatizable, compactos con tolerancias muy ajustadas y características controladas.

SECUENCIA DE COMPACTACIÓN

Los pasos que se siguen en la compactación uniaxial de un polvo son:

- 1- Llenado de la matriz
- 2- Posicionamiento de los punzones
- 3- Entrada del punzón superior
- 4- Compactación
- 5- Cese de la aplicación de presión
- 6- Extracción del compacto en verde

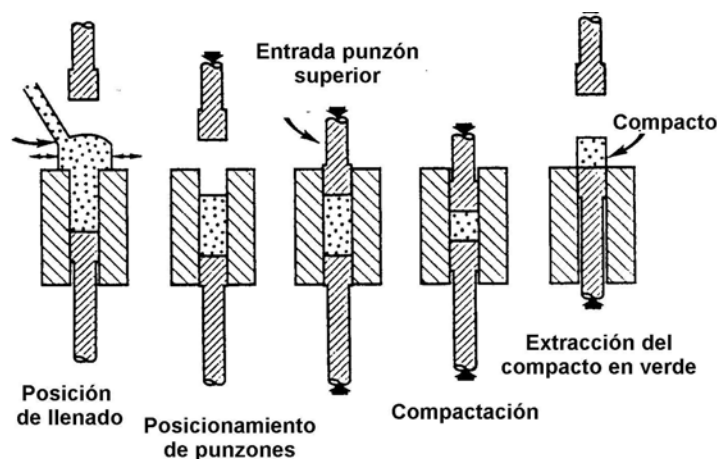


Figura 3: Secuencia de compactación

PRENSADO ISOSTÁTICO EN FRÍO (CIP)

La compactación isostática en frío es una aplicación del teorema de Pascal, según el cual cualquier presión aplicada sobre un fluido se transmite por igual en todas sus direcciones. Con la compactación isostática se reducen de manera sustancial los problemas de uniformidad que se daban en el prensado unidireccional, debidos al rozamiento entre el polvo, las paredes de la matriz y los punzones. Al evitarse este problema se pueden compactar grandes volúmenes de polvo con relaciones altura/diámetro elevadas. También es posible la obtención de compactos con formas tan complicadas como lo permita la fabricación del molde, ya que la compactación isostática mantiene la forma que el polvo adquiere en el llenado del molde. Al mismo tiempo, la compactación isostática es más eficiente que la unidireccional, obteniéndose densidades más elevadas para una misma presión aplicada.

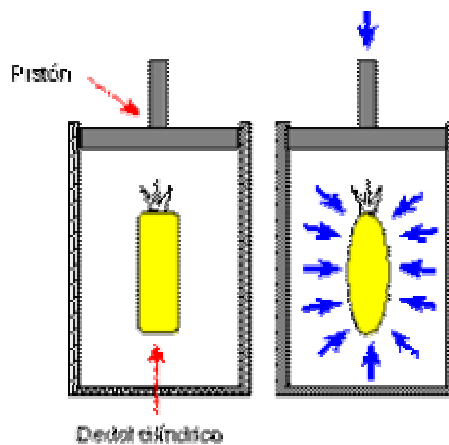


Figura 4: Compactación isostática en frío

22.4.4. SINTERIZACIÓN

"Proceso por el cual un conjunto de partículas, compactadas o no, se aglomeran o unen químicamente formando un cuerpo coherente bajo la influencia de una temperatura elevada."

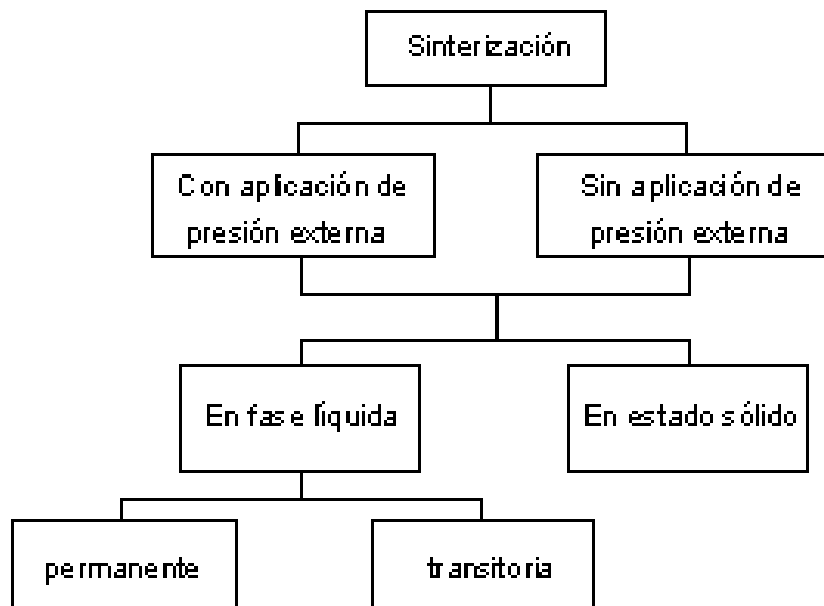


Figura 5: Distintos procesos de sinterización

22.5. MANUFACTURA DE HERRAMIENTAS DE CARBURO

Los carburos usados son los de tungsteno, titanio, molibdeno y tantalio embebidos y aglomerados en cobalto o níquel.

En el caso de carburo de tungsteno aglomerado en cobalto, las materias primas son carbono (como negro de humo), óxido de tungsteno y óxido de cobalto en polvo. Primero se reducen los óxidos en una corriente de hidrógeno. El polvo de tungsteno se muele y luego de mezclarlo con el negro de humo se calienta a 1500°C en atmósfera neutra. El carburo producido se muele en un molino de bolas a un tamaño de 20 μm . Luego se mezcla íntimamente con el polvo de cobalto. Puede también agregarse una pequeña cantidad de glicerina a la mezcla como lubricante en el proceso de compactado.

Las presiones de compactado son de 1.5-2 ton/cm^2 . La sinterización se efectúa en atmósfera controlada y en dos etapas la primera a 1000°C, con lo que adquiere suficiente resistencia como para ser conformado por los métodos ordinarios de máquinas de herramientas. La sinterización final generalmente se hace sobre 1350°C con lo cual, tal como lo indica el diagrama parte de la pieza se encuentra en estado líquido, que se infiltra durante el proceso de sinterización, produciendo así una estructura más densa. Al enfriarse la pieza se separa el carburo de tungsteno de la solución sólida γ (cobalto) que se deposita sobre el carburo de tungsteno sin disolver.

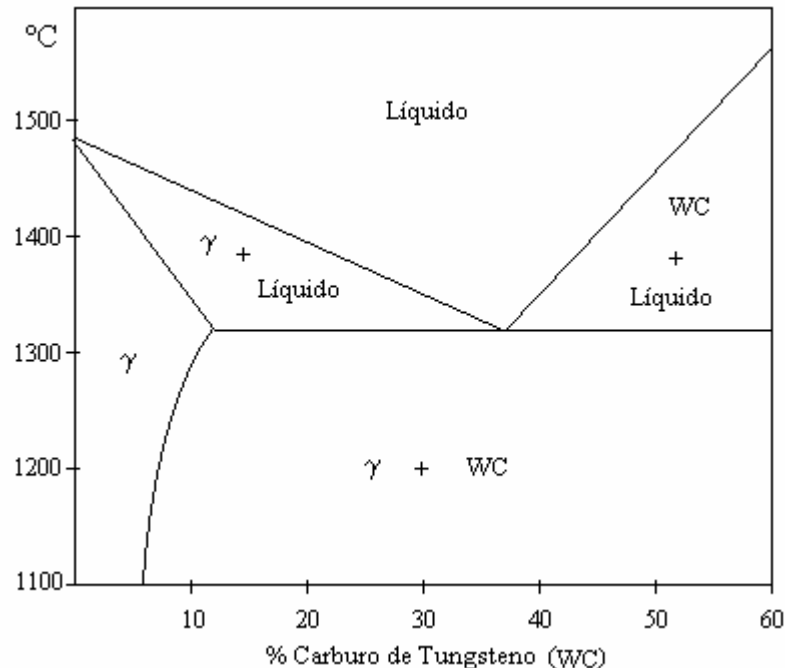


Figura 6: Diagrama Co-WC

22.6. LIMITACIONES DEL PROCESO

Aunque el costo de los polvos metálicos es elevado, esto es contrarrestado en gran medida por la ausencia de desperdicios. En los procesos de fundición, se tienen desperdicios en forma de volatilización, incorporación a la escoria, oxidación, salpicadura del metal, jitos, mazarotas y montantes y canales de alimentación.

Las pérdidas de polvo son inferiores al 0.5%. Aún más importante es la precisión con que puede controlarse la composición y la pureza, pues no se producen inclusiones de escorias ni burbujas o rechupes

Entre las limitaciones principales se encuentra el hecho que las formas complicadas, como las posibles en fundición, no pueden ser hechas directamente por compactado pero si por compactación isostática en frío (CIP) y que los polvos metálicos carecen de capacidad para fluir en la forma que los hacen los metales fundidos. Sin embargo, en muchos casos es económico producir una forma simple por metalurgia de polvos y maquinarlo luego a la forma más complicada.

Otras limitaciones de la Metalurgia de Polvos son:

- 1) La resistencia y tenacidad de las partes producidas por metalurgia de polvos son inferiores a las partes producidas por fundición o forja. La fragilidad es función de la porosidad.



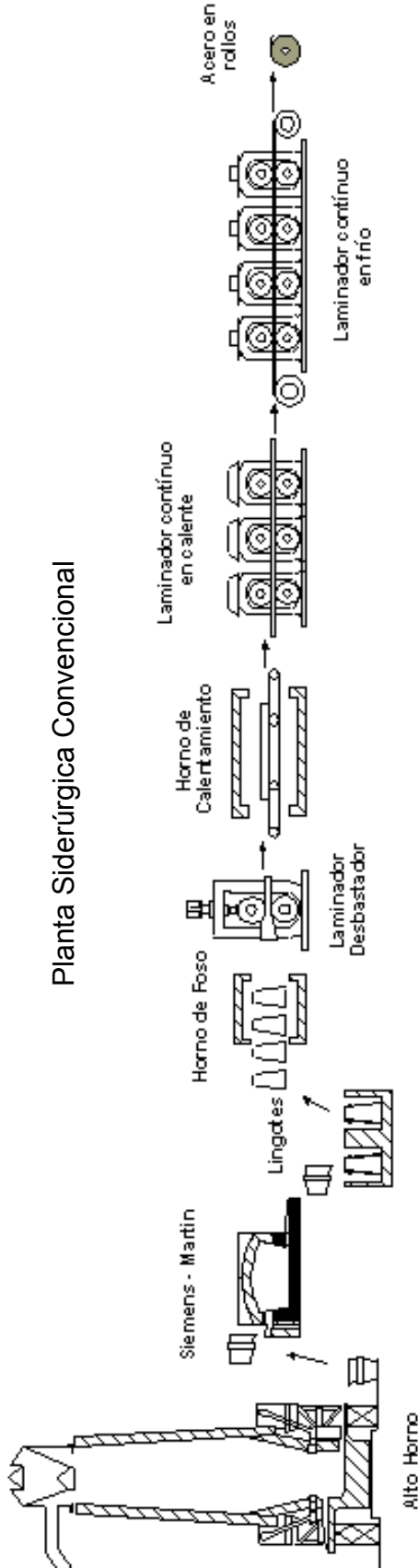
- 2) Los costos iniciales de matrices y herramientas son elevados y deben ser contrarrestados por una alta producción. El desgaste de herramientas también se traduce en altos costos de mantención.
- 3) El tamaño de los productos está limitado por el costo de grandes prensas y herramientas requeridas en el compactado.
- 4) Debido a la fricción y a la tendencia que tienen los polvos metálicos a pegarse a las paredes del molde se produce con frecuencia falta de homogeneidad en las propiedades.
- 5) Algunos metales son difíciles o imposibles de comprimir, tienden a soldarse en frío con el dado.
- 6) Algunos polvos metálicos presentan serios riesgos de explosión o combustión cuando están suspendidos en el aire.

22.7. PULVIMETALURGIA: ALTERNATIVA A PROCESOS CONVENCIONALES

Las figuras 7 y 8 muestran esquemáticamente como se puede adaptar al proceso de laminado de polvos para ser usado en una planta Siderúrgica como alternativa al proceso convencional. Varias compañías Siderúrgicas están haciendo estudios con esta alternativa. No hay duda que la inversión inicial de capital para la planta de laminación de polvos es menor para igual capacidad. El problema se centra más bien en la obtención del polvo con suficiente pureza y a un precio adecuado. Una planta de tamaño piloto ya se encuentra operando.

Una aplicación comercial de este proceso se usa para cobre en Filipinas. El polvo se obtiene por proceso hidrometalúrgico y reducción gaseosa. La planta produce 14.000 tons. En planchas, tubos y alambres de cobre.

Planta Siderúrgica Convencional



Planta Siderúrgica basada en Reducción Directa y Laminado de Polvo

