

# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

---

---

FACULTAD DE QUÍMICA

FACULTAD DE QUÍMICA **CONTROL DIMENSIONAL DE LAS**

**PIEZAS SINTERIZADAS**



BIBLOTECA

## TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:  
**INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

PRESENTA:  
**LAURA SÁNCHEZ NIETO**

CENTRO UNIVERSITARIO

QUERÉTARO, QRO., 26 DE MARZO DE 1999.

*Si te encuentras una lucesita siguela  
Si te conduce al pantano  
ya saldrás de él.*

*Pero si no la sigues,  
Toda la vida te mortificarás  
Pensando que acaso era tu estrella.*  
*séneca*

Doy gracias a Dios porque nunca me abandono y me permitió llegar a esta etapa de mi vida.

Gracias a mis padres porque siempre confiaron en mí y aunque se que hubo momentos en que se sintieron decepcionados nunca dejarón de creer en mí. nunca en la vida me cansare de agradecerles porque lo más valioso que tengo son ustedes, sus enseñanzas, sus ejemplos, sus consejos, sus regaños, todos los buenos momentos con que han llenado mi vida, porque siempre me respetaron, porque trabajan tanto y todo su trabajo es para mí y para mis hermanos, porque nosotros somos su prioridad.

Gracias por todas las noches de desvelo, ya fuera en la primaria cuando me enseñabas a escribir y a leer mamá o en la secundaria cuando simplemente me acompañabas mientras yo terminaba de estudiar.

Gracias por todas esas horas de espera papá cuando me llevabas o me esperabas cuando salía de la secundaria o de la casa de una amiga, o cuando salía tarde de la universidad. Son muchos los detalles que guardo en mí corazón y quiero que sepan que son lo mejor que me ha pasado en mi vida y se que gracias a ustedes hoy escribo estas líneas de agradecimiento, no les puedo dedicar esta tesis porque esta tesis es suya, les pertenece por todo lo que han hecho por mí.

## **INDICE**

1. INTRODUCCION	1
2. JUSTIFICACION	5
3. OBJETIVO	7
4. FUNDAMENTOS	8
4.1 PROPIEDADES	10
4.2 MEZCLADO	31
4.3 COMPACTACIÓN	32
4.4 SINTERIZADO	39
5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	56
6. DESARROLLO EXPERIMENTAL	60
7. ANALISIS DE RESULTADOS	66
8. CONCLUSIONES	74
9. INDICE DE FIGURAS	76
10. BIBLIOGRAFIA	78

## INTRODUCCION

La metalurgia de polvos es un proceso muy antiguo, el cual consiste muy genéricamente en: la mezcla de polvos, compactación y sinterizado de la pieza. Este es un proceso que se puede utilizar para casi cualquier tipo de pieza, sin embargo, por lo regular casi siempre se fabrican piezas de dimensiones no muy grandes.

Este proceso ofrece algunas ventajas sobre otros métodos de conformado de materiales. A nivel económico, producir una pieza por medio del sinterizado es más costoso que una pieza que se fabrica por fundición, sin embargo, a nivel de producción industrial es más económico fabricar piezas sinterizadas que por fundición, sobre todo si se trata de piezas con geometría compleja.

Sin embargo, este no es un proceso que se desarrolle ampliamente por las industrias ya que a nivel nacional solo existen tres o cuatro empresas que se dediquen a la fabricación de piezas por medio del sinterizado. En el estado de Querétaro solo existe una empresa llamada SINTERMEX.

La primera industria metalúrgica que se dedico al proceso de sinterizado opero en la ciudad de México en el año de 1963, tiempo después esta empresa se traslada a la ciudad de Querétaro en el año de 1980, comenzando a operar hasta el año de 1984. Esta empresa se ubica en el Parque Industrial Benito Juárez, acceso II y tiene el nombre de SINTERMEX S.A. DE C.V.

Los pasos que se desarrollan para la fabricación de piezas sinterizadas son:

1. - Almacén de materia prima
2. - Selección y peso de materia prima

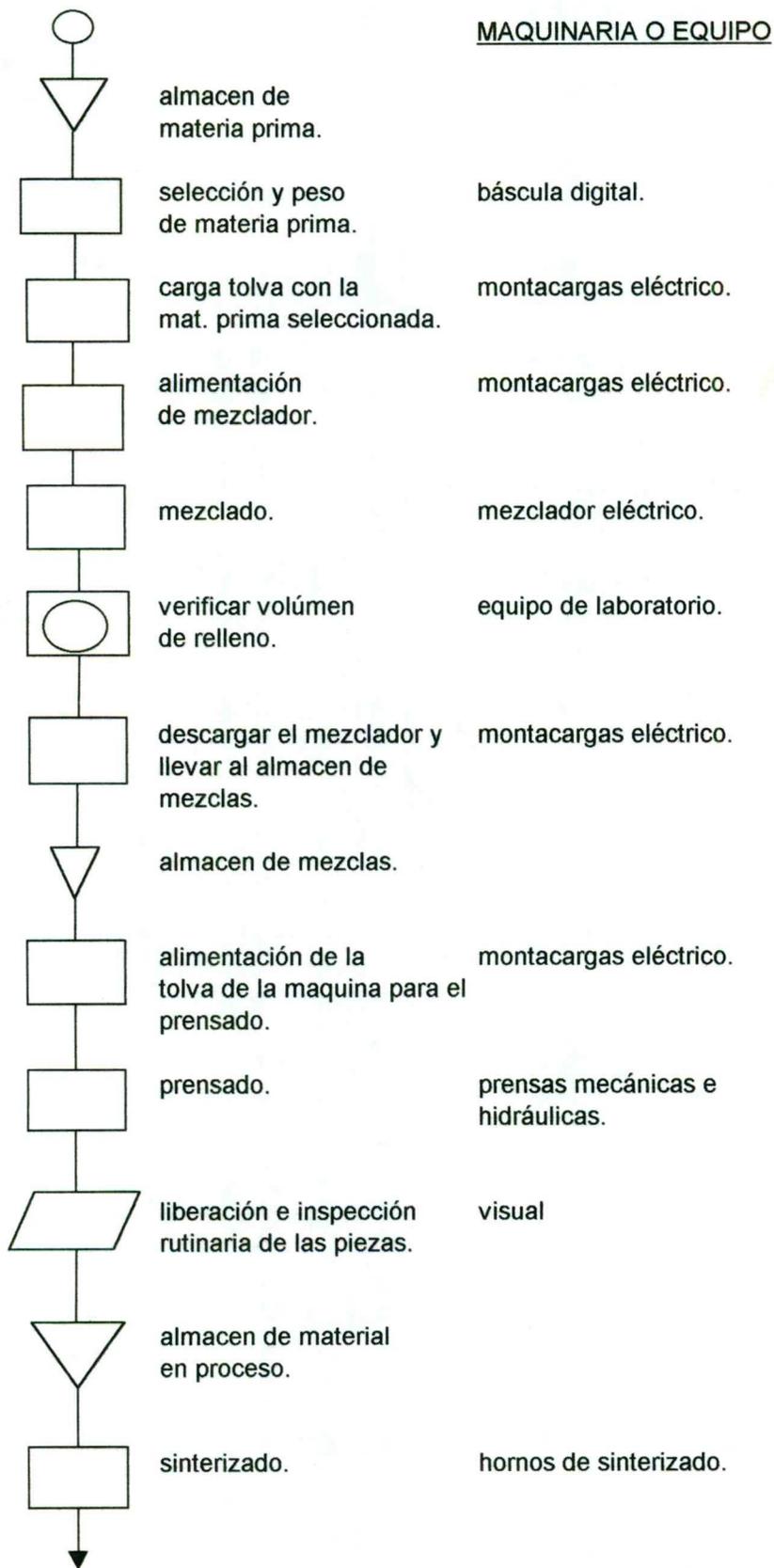
3. - Cargar tolva con la materia prima seleccionada
4. - Alimentación de mezclador
5. - Mezclado
6. - Verificar volumen de relleno
7. - Descargar el mezclador y llevar al almacén de mezclas
- 8.- Almacén de mezclas
- 9.- Alimentación de la tolva de la maquinaria para el prensado
- 10.- Prensado
- 11.- Liberación e inspección rutinaria de las piezas
- 12.- Almacén de material en proceso
- 13.- Sinterizado
- 14.- Liberación e inspección rutinaria de las piezas
- 15.- Almacén de material en proceso
- 16.- Calibrado
- 17.- Procesos secundarios (roscado, ranurado, barrenado, rectificado, vibrado, impregnado, horno tratamiento de vapor).
- 18.- Liberación e inspección rutinaria de las piezas
- 19.- Inspección final y empaque.

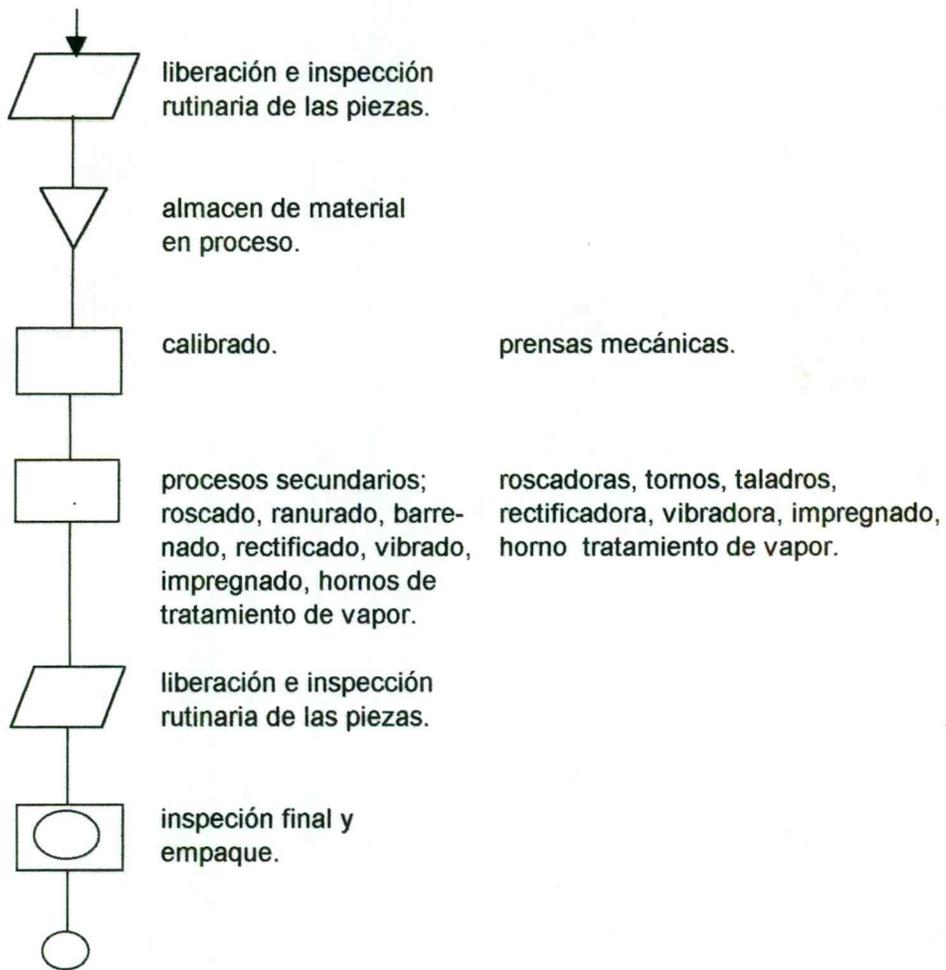
Esta empresa produce principalmente piezas automotrices de acero bajo carbono y bronce.

Actualmente, SINTERMEX exporta aproximadamente el 40% de su producción y es considerada la principal fabricante de piezas sinterizadas a nivel nacional.

A continuación se presenta el diagrama de flujo con todos los pasos que se desarrollan para la fabricación de piezas sinterizadas en la empresa SINTERMEX.

DIAGRAMA DE FLUJO  
(descripcion detallada)





## JUSTIFICACIÓN

Durante el desarrollo de cada uno de los pasos que se llevan a cabo para obtener una pieza por medio del sinterizado, surgen problemas y defectos que deben ser controlados para así poder obtener una buena producción (que llene las especificaciones del cliente).

En la etapa en la cual la pieza es sometida al proceso de sinterizado, ocurren varios fenómenos, uno de ellos es que la pieza se modifica dimensionalmente, por lo que, en todos los casos este cambio se toma en cuenta cuando se hacen las consideraciones necesarias para fabricar una pieza.

Algunas veces este cambio dimensional es mayor de lo que se esperaba y se sobrepasan los límites permitidos.

En este trabajo veremos como los diferentes tipos de polvos que se mezclan para formar la pieza (el efecto que produce cada uno de ellos dependiendo las proporciones en que se mezclen), el tiempo de sinterizado y/o las condiciones durante el mismo, pueden afectar el crecimiento dimensional de las piezas.

En la empresa SINTERMEX este es uno de los problemas que afectan la producción de algunas de las piezas automotrices que se fabrican.

Cuando este crecimiento dimensional de las piezas es mayor del calculado, es necesario que sea sometida a un proceso de recompactación o calibrado por medio de prensas mecánicas para volver a estar dentro de los parámetros requeridos.

Por todo lo que se menciona en los párrafos anteriores, el desarrollo de este trabajo es importante, porque el crecimiento dimensional de las piezas fuera de rango es perjudicial para la empresa, ya que provocan que se tenga que llevar a cabo una etapa más para la fabricación de una pieza (recompactación), lo cual ocasiona un aumento de tiempo,

consumo energético, personal y costos en producción (el 85% de la producción que sale del horno de sinterizado es sometido al proceso de calibrado).

Obviamente esto se puede evitar logrando controlar el crecimiento dimensional de la pieza sinterizada y una vez controlado el crecimiento, se puede tener una mejor producción fabricando piezas con aseguramiento de calidad dentro de los parámetros requeridos, se disminuiría el tiempo de producción ya que independientemente de los procesos secundarios a que tengan que ser sometidas las piezas ( roscado, ranurado, barrenado, vibrado, impregnado, tratamiento de vapor) se elimina una etapa que es el calibrado y todo lo anterior se resume en un ahorro económico muy importante para la empresa.

**NOTA: TODA LA INFORMACIÓN SOBRE LA PRODUCCIÓN DE PIEZAS SINTERIZADAS PROPORCIONADA POR LA EMPRESA SINTERMEX ES SOLO PARA EL USO Y DESARROLLO DE ESTE TRABAJO.**

## **OBJETIVO**

Estudiar un determinado tipo de pieza que presente un problema de crecimiento después del que pasa por el proceso de sinterizado y hacer un análisis de mezclas con todas las pruebas necesarias (desde el mezclado hasta el sinterizado) para encontrar las condiciones y/o características a las cuales se pueda obtener la pieza dentro de los parámetros de crecimiento que se requieren y así evitar modificaciones del herramental (específicamente los dados). Cumplir así con el objetivo principal de eliminar la recompactación (calibrado), con lo cual se obtendrían mejores resultados de productividad.

## FUNDAMENTOS

La metalurgia de polvos, como su nombre lo indica, es un proceso por medio del cual se obtienen metales en forma de polvos, los cuales, dependiendo de las propiedades que se busquen, se pueden obtener por medio de los siguientes métodos:

1. Los *métodos mecánicos*, tales como el mecanizado y molienda produciendo polvos relativamente gruesos.
2. Con el procedimiento por *proyección* se fabrican partículas gruesas vertiendo el metal fundido a través de una criba y dejando que los perdigones caigan en agua. Algunas veces este procedimiento se emplea como una etapa intermedia en la producción de polvo fino.
3. El procedimiento por *granulación* consiste en la formación de una película de óxido sobre partículas individuales cuando el baño de metal se agita en contacto con el aire. Este método produce polvo relativamente grueso con un elevado porcentaje de óxido.
4. En el proceso por *atomización*, el metal fundido se hace pasar a través de un pequeño orificio y se pulveriza mediante una corriente de aire comprimido, vapor o gas inerte. Este procedimiento se aplica para metales tales como fierro, estaño, cinc, cadmio, aluminio y otros que tengan un punto de fusión relativamente bajo, obteniéndose polvos metálicos con finura controlada y con un tamaño uniforme en las partículas (Sintermex utiliza polvos obtenidos por este método).
5. Los polvos metálicos pueden también fabricarse por el procedimiento de *condensación de vapores*, en el cual el metal se calienta hasta el estado de vapor, y después de enfriarse éste se condensa en forma de polvo sólido.
6. En el *procedimiento al carbonilo* los polvos metálicos se fabrican mediante la formación de un gas carbonilo, el cual se obtiene pasando gas óxido de carbono sobre un metal esponjoso a la presión y temperatura conveniente. El carbonilo formado puede ser un gas o un líquido formado a temperatura ambiente.
7. En el *procedimiento de reducción de óxidos* para fabricar polvos metálicos, el metal es un óxido, como por ejemplo, óxido de hierro o minerales de hierro tales como magnetita y hematita. El polvo formado por este procedimiento da partículas de naturaleza esponjosa (Sintermex utiliza polvos obtenidos por este método).
8. En el procedimiento por *deposición electrolítica*, los polvos metálicos se obtienen por deposición del metal por electrólisis. El polvo electrolítico es bastante resistente a la oxidación, y al almacenarlo retiene esta característica hasta que ha sido prensado y sinterizado.

9. Los polvos fabricados por *precipitación química* son los de estaño, plata, selenio y telurio. En este procedimiento el polvo metálico se precipita de una solución mediante otro metal.

Algunas de las formas de polvos obtenidos por alguno de los métodos mencionados anteriormente se muestran a continuación.

a)



b)

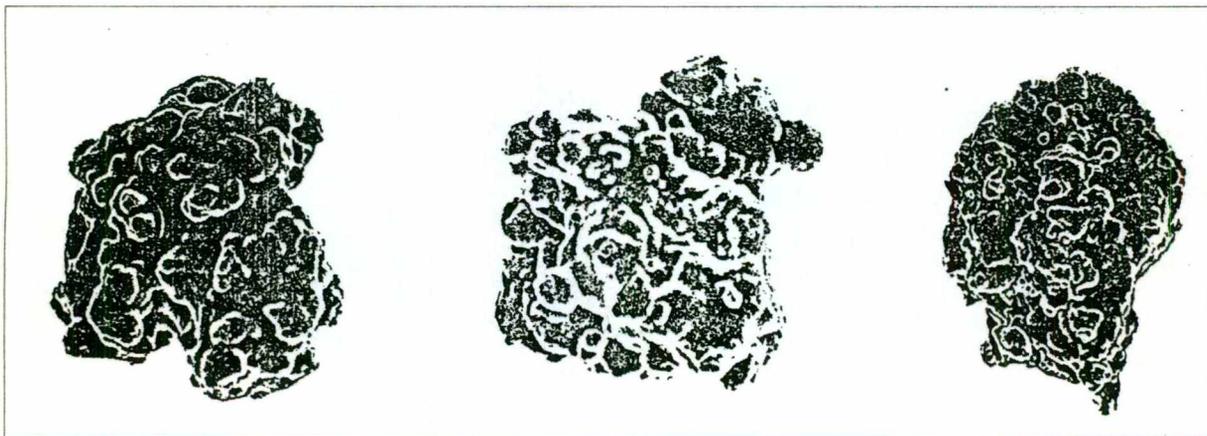


Fig. 1.- a) Fierro reducido (fierro esponja)  
b) Fierro atomizado.

## PROPIEDADES

Las propiedades que se cuidan y buscan en los polvos metálicos son:

### *Propiedades mecánicas*

#### 1. - Fluidez.

Es el tiempo en segundos que una cantidad de 50 g. de polvo seco se necesita para pasar por la abertura de un embudo estandarizado. Para el caso de mezclas la velocidad del flujo esta influenciada por el tipo, cantidad de lubricante y/o componentes adicionados al polvo metálico. Esta propiedad nos indica que tan rápida puede ser llenada la cavidad del dado con el polvo metálico en el proceso de compactación. Fig. 1

#### 2. - Densidad aparente.

Se determina haciendo pasar el polvo a través de un embudo, para caer dentro de una pequeña copa, el polvo debe rellenar por completo el volumen de la copa. La densidad aparente es el resultado del peso del polvo contenido en la copa dividido entre el volumen de la misma ( $25\text{cm}^3$ ). Esta propiedad esta influenciada por el tipo, cantidad de lubricante y/o componentes adicionados al polvo metálico. La densidad aparente de un polvo es una propiedad de gran importancia para las operaciones de moldeado y sinterizado. Los polvos con baja densidad aparente requieren un ciclo mayor de compresión y cavidades más profundas para producir un aglomerado de densidad y tamaño dados. Fig. 1.

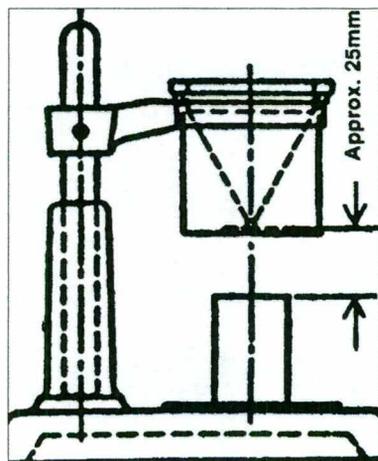


Fig.2.- Embudo y copa utilizados para medir la fluidez y densidad aparente.

### 3. - Compresibilidad.

La compresibilidad es la capacidad que tienen los polvos para ser compactados a diferentes presiones. Este valor se va a ver afectado por la forma y tamaño de la partícula de polvo. Esta propiedad está influenciada por el tipo y cantidad de lubricante en el polvo metálico.

Las propiedades que se cuidan y buscan en las piezas compactadas y sinterizadas a partir de los polvos metálicos son:

#### *Propiedades metalúrgicas.*

##### 1. - Composición química.

La composición química de un polvo metálico no tiene tanta importancia como sus propiedades físicas. No obstante, la composición y especialmente las impurezas influyen muchísimo en las características de todo polvo metálico.

En la empresa SINTERMEX se fabrican diferentes tipos de piezas automotrices, por lo que se trabaja con diversas mezclas.

Los componentes de las mezclas de polvo son seleccionados de acuerdo a las propiedades físicas que se desean, así como, para controlar el cambio dimensional durante el sinterizado.

Los polvos de metal que se utilizan en esta empresa (entre los más empleados) son:

- a) Hierro: F1, F3, F4, F6, F8.
- b) Grafito: G1, G2.
- c) Bronce: B1, B2, B3.
- d) Cobre: C3
- e) Sulfuro de manganeso: M1

y como lubricantes:

- f) Estearato de zinc: L1
- g) Cera (N,N'Etilen bissteramida): L3

Algunas propiedades de los polvos utilizados se muestran en las siguientes tablas.

**PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS DE POLVOS UTILIZADOS EN LA EMPRESA  
SINTERMEX**

CODIGO	No. PROVEEDOR	ANALISIS QUIMICO		ANALISIS FISICO		
			MIN.	MAX.		MIN.
F1	ANCOR MH-100	%CARBON	0.06	DENSIDAD APARENTE (g/cc)	2.48	2.63
		H <sub>2</sub> PERDIDO	0.3	FLUIDEZ (seg/50g)		35.00
		% SULFURO	0.18	MALLA +60		trazas
				MALLA -60/+100		16.00
				MALLA -325	15.00	35.00
				ESFUERZO EN VERDE (psi)	1600.00	
				DENSIDAD EN VERDE (tsi)	6.38	
F3	ATOMET 28	% CARBON	0.10	DENSIDAD APARENTE (g/cc)	2.80	2.90
		% OXIGENO	0.25	FLUIDEZ (seg/50g)		30.00
				MALLA +60		0.10
				MALLA -60/+70		0.20
				MALLA -70/+100		12.00
				MALLA -325	15.00	30.00
				DENSIDAD EN VERDE (g/cc)		6.70
		COMPRESIBILIDAD (tsi)		35.50		
		ESFUERZO EN VERDE (psi)	1400.00			
F4	ANCOR MH-818	%CARBON	0.02	DENSIDAD APARENTE (g/cc)	1.70	1.85
		H <sub>2</sub> PERDIDO	0.015	MALLA +70	0.0	0.0
		% SULFURO	0.45	MALLA -70/+80	4.0	1.0
				MALLA -80/+100	15.0	12.0
				MALLA -100/+200		56.0
				MALLA -200/+325		23.0
				MALLA -325	20.0	8.0
F6	ATOMET 1001	% CARBON	0.010	DENSIDAD APARENTE (g/cc)	2.85	3.0
		% OXIGENO	0.15	FLUIDEZ (seg/50g)		30.0
		% SULFURO	0.014	MALLA +60		trazas
		% MANGAN.	0.15 0.22	MALLA -60/+100		20.0
				MALLA -325	15.00	35.0
				DENSIDAD EN VERDE (g/cc)		6.8
				COMPRESIBILIDAD (tsi)		33.0
		ESFUERZO EN VERDE (psi)	1150.00			
F8	ANCORMET 101	%CARBON	0.15 0.05	DENSIDAD APARENTE (g/cc)	2.45	2.65
		H <sub>2</sub> PERDIDO	0.30	FLUIDEZ (seg/50g)		35.00
		% SULFURO	0.018	MALLA +60		trazas
				MALLA -60/+100		16.00
				MALLA -325	15.00	35.00
				ESFUERZO EN VERDE (psi)	1800.00	
				DENSIDAD EN VERDE (tsi)	6.18	

**PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS UTILIZADAS EN LA EMPRESA  
SINTERMEX**

CODIGO	No. PROVEEDOR	ANALISIS QUIMICO		ANALISIS FISICO	
		MIN.	MAX.	MIN.	MAX.
B1	BRONCE NB-10	% ESTAÑO	9.50 10.50	DENSIDAD APARENTE (g/cc)	3.00 3.35
				FLUIDEZ (seg/50g)	35.00
				MALLA +100	1.0
				MALLA -100/+325	balance
				MALLA -325	45.00 70.00
				ESFUERZO EN VERDE (g/cc)	500.00
B2	BRONCE 5092X	% ESTAÑO	9.50 10.50	DENSIDAD APARENTE (g/cc)	3.15
				FLUIDEZ (seg/50g)	35.00
				MALLA +100	1.0
				MALLA -100/+325	
				MALLA -325	45.00 70.00
				ESFUERZO EN VERDE (g/cc)	500.00
B3	BRONCE HG-3	% ESTAÑO	9.50 10.50	DENSIDAD APARENTE (g/cc)	2.80 3.00
		LUBRICANTE	0.50	FLUIDEZ (seg/50g)	30.00
				MALLA +100	1.5
				MALLA -100/+325	BALANCE
				MALLA -325	40.00
C3	COBRE 165C	% COBRE	99.3	DENSIDAD APARENTE (g/cc)	2.60 2.80
		% H2 PERDIDO	0.30	FLUIDEZ (seg/50g)	30.00
				MALLA +150	1.0
				MALLA -150/+200	10.00 20.00
				MALLA -200/+325	BALANCE
				MALLA -325	50.00 65.00
	SULFURO DE Mn	% MnS	62.50 65.00		
		% AZUFRE	33.50 36.50		
L1	ESTEARATO DE ZINC 135			DENSIDAD APARENTE (g/cc)	3.08
				FLUIDEZ (seg/50g)	31.00
				ESFUERZO EN VERDE (psi)	1187.00
				DENSIDAD EN VERDE (gr/cc)	6.69
L3	CERACER 126			DENSIDAD APARENTE (g/cc)	3.04
				FLUIDEZ (seg/50g)	37.80
				ESFUERZO EN VERDE (psi)	1553.00
				DENSIDAD EN VERDE (gr/cc)	6.71

## 2. - Microestructura.

Conocer la microestructura de las piezas sinterizadas es de gran ayuda para evaluar algunas de las propiedades físicas y mecánicas de las mismas. Algunas de las características que se pueden encontrar al realizar una metalografía son: tamaño de grano, contenido de carbono combinado, inclusiones, carburación y decarburación, porosidad y distribución de los poros, transformación de la estructura y grado de enlace.

Algunas de las propiedades metalográficas son:

### FIERRO

La sinterización del fierro implica la estabilidad de partículas enlazadas cerca del área de contacto y el crecimiento de estos enlaces. Esto es seguido por el crecimiento del grano y el incremento de los límites de grano formados por los enlaces. Enseguida viene la esferoidización de los poros y eventualmente la desaparición de los poros pequeños y posible crecimiento de poros alargados. Oponiéndose a la formación de enlaces los que pueden ser residuos de lubricante, impurezas y superficies de óxidos.

El tamaño de grano tiene una influencia importante sobre las propiedades físicas del fierro. Con un decremento del tamaño de grano, generalmente la resistencia a la tensión se incrementa, pero con la disminución del tamaño de grano y las propiedades magnéticas se mejoran. Finalmente los poros dispersados tienen un gran efecto negativo sobre las mejoras de las propiedades magnéticas que engruesan los poros.

### FIERRO-CARBON

La sinterización de la mezcla de fierro-grafito implica tres pasos. El primero es la estabilidad y crecimiento del enlace fierro-fierro, después la difusión del carbono dentro de fierro, y finalmente la esferoidización de los poros.

Además de la importancia de la estabilidad del enlace fierro-fierro, la cantidad de carbono combinado formado durante el sinterizado es el principal factor que afecta las propiedades del acero sinterizado. El tiempo de sinterizado también influye en el esfuerzo y cambio dimensional.

Para aumentar propiedades de esfuerzo a la tensión y la dureza de un fierro sinterizado hay que adicionarle carbono. Esto es logrado por adición de polvo de grafito al polvo de fierro antes de la compactación y sinterizado. El carbono, que es un elemento de aleación intersticial, se disuelve muy rápidamente dentro de la estructura del polvo de hierro durante el sinterizado. Sin embargo, para lograr sinterizar el contenido de carbono se requiere de mucho cuidado en el control de la atmósfera para no decarburar.

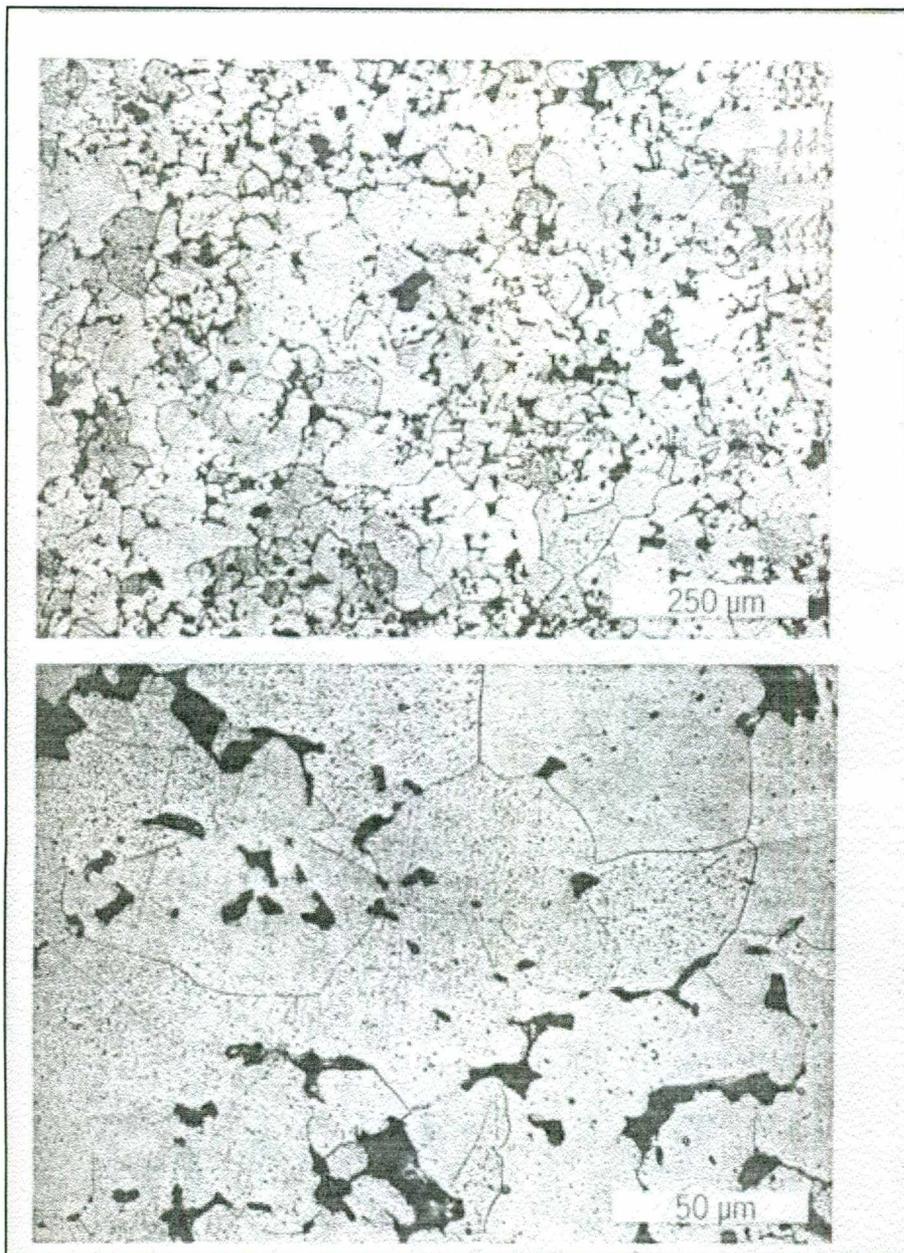


Fig. 3. - Microestructura de un polvo de hierro atomizado (ABC100.30) compactado a 392 N/mm<sup>2</sup> con una densidad de 6.88 g/cc. Ambos materiales fueron sinterizados por 30 min. a 1120°C en una atmósfera de amoníaco disociado.

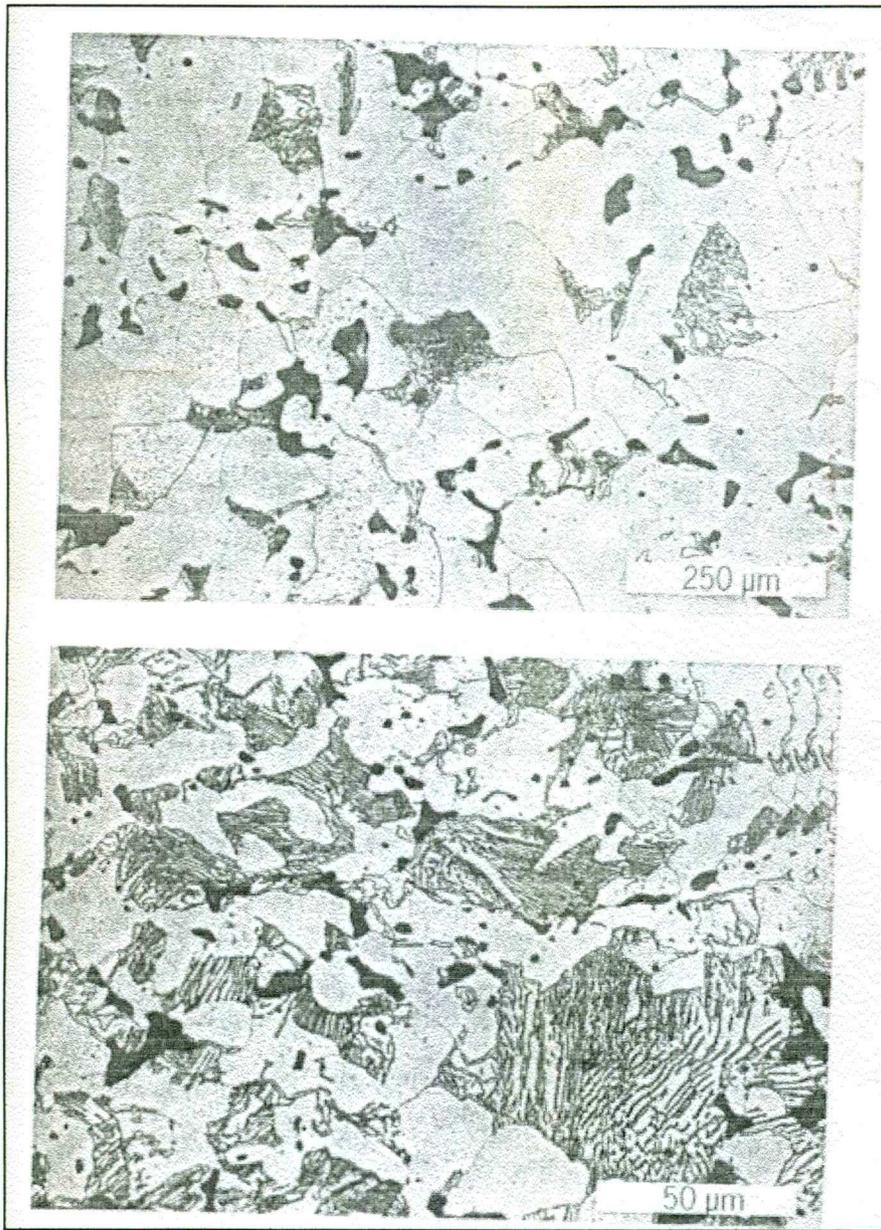


Fig. 4. - Muestra la microestructura de dos aceros sinterizados fierro-carbono conteniendo 0.2 y 0.5 % en peso de carbón disuelto respectivamente. Areas de ferrita y perlita son claramente visibles. Ambos materiales fueron compactados a  $589 \text{ N/mm}^2$  de un polvo de fierro atomizado (ASC100.29), sinterizado por 30 min. a  $1120^\circ\text{C}$  en endogas, y teniendo un a densidad de sinterizado de 7.15 y 7.10 g/cc respectivamente.

A partir de la presencia de poros, esta microestructura es prácticamente idéntica a la que corresponde a un acero de hierro convencional. Este efecto de carbono disuelto sobre el esfuerzo a la tensión, elongación y cambio dimensional de hierro sinterizado se muestra en el diagrama de la fig. 6. Un buen sinterizado de un acero al carbono, contiene cerca de 0.8% en peso de carbono. Con un contenido austenítico menor de 0.8% C una parte se transforma en ferrita cuando pasa por la fase  $A_3$  y por debajo del punto eutectoide ( $A_1$ ), los residuos dentro de la ferrita y cementita forma una estructura laminar llamada perlita, con un contenido exacto de 0.8% C se transforma directa y completamente a perlita cuando pasa por la zona del punto eutectoide. Cuando se tiene un contenido mayor a 0.8% C una parte se transforma en cementita (secundaria) cuando pasa por la zona  $A_{cm}$  y por debajo de la línea eutectoide, estos residuos se transforman directamente en perlita.

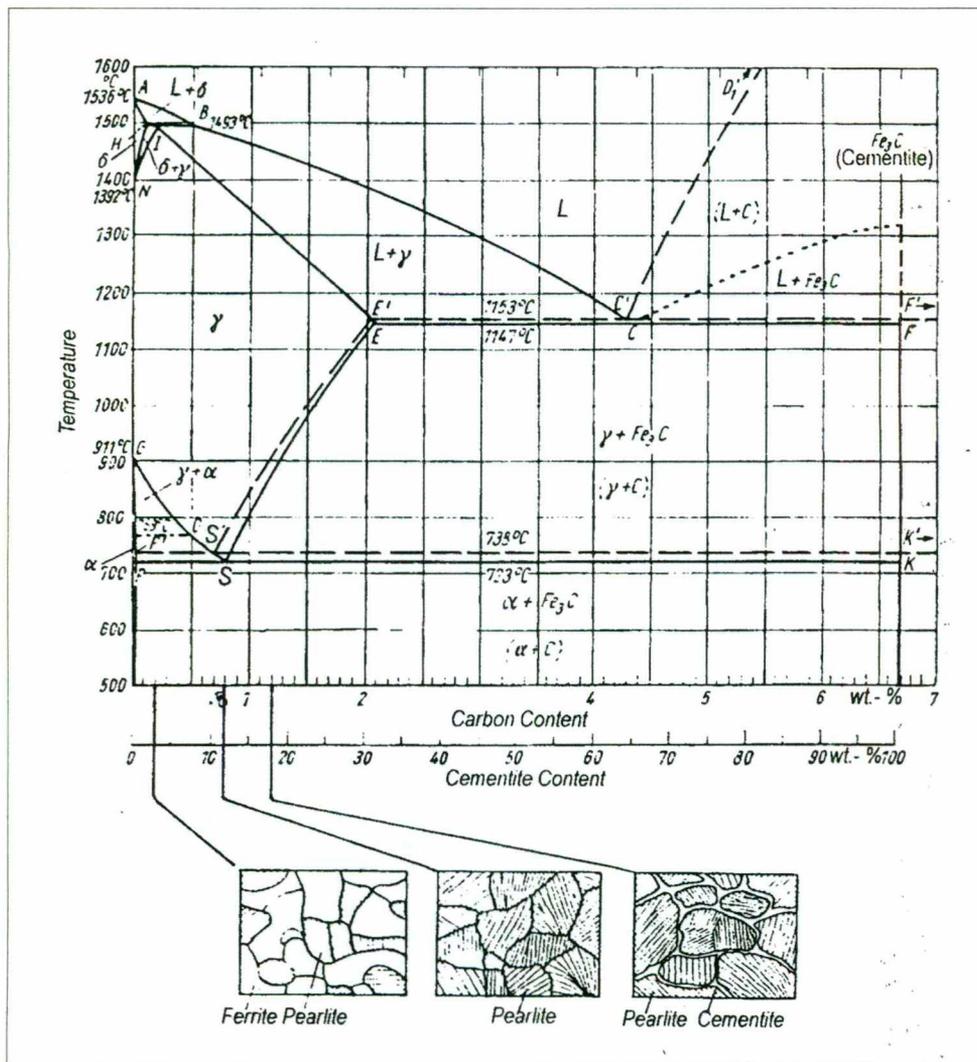
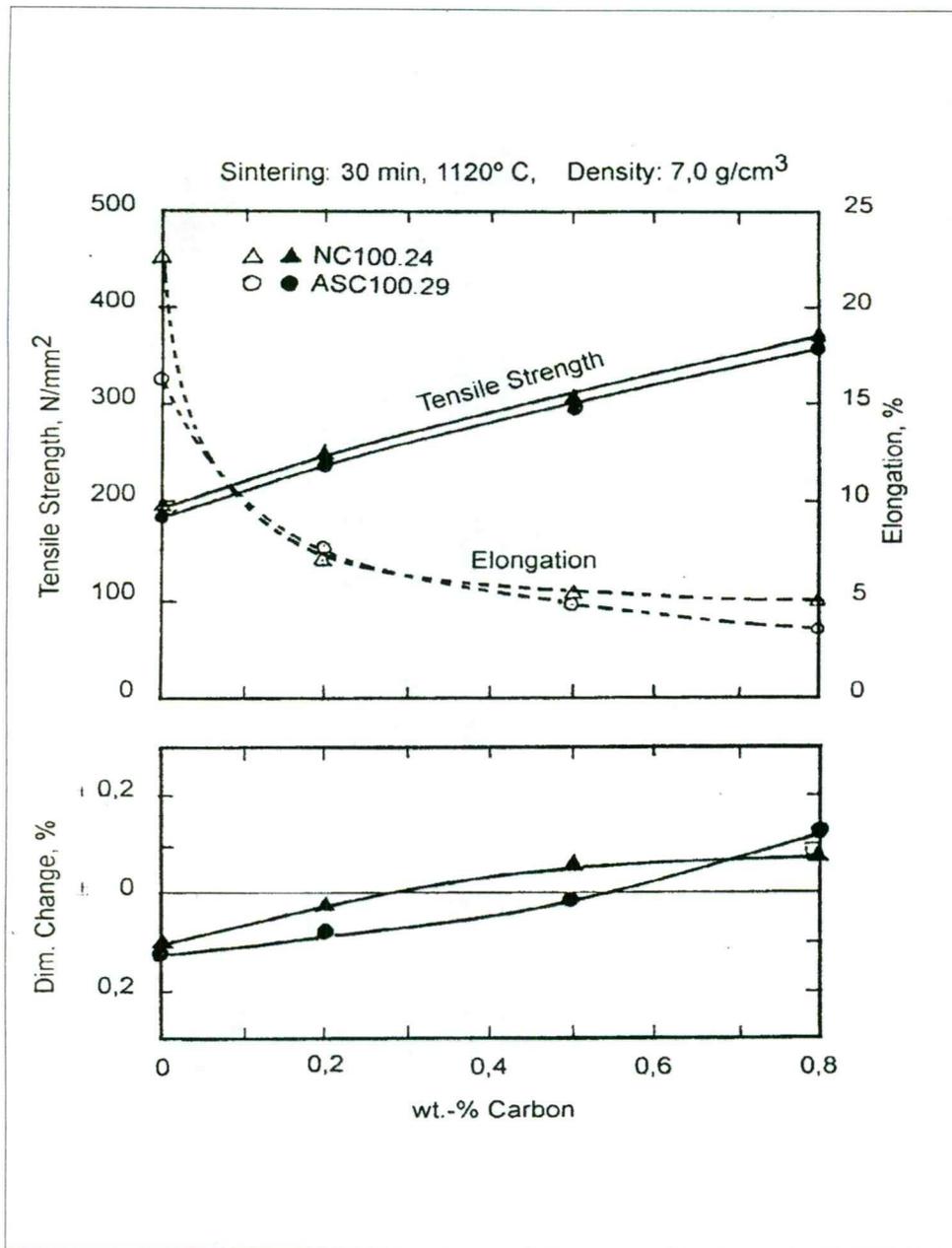


Fig. 5.- Diagrama de equilibrio Hierro-Carbono.



\*Fig. 6. - Influencia del contenido de carbón sobre las propiedades del fierro sinterizado.

## FIERRO-COBRE

La sinterización de la mezcla de hierro-cobre implica lo siguiente:

- Enlazamiento sólido de hierro-ferro
- Enlazamiento sólido de cobre-ferro
- Fusión del cobre
- Difusión del cobre
- Solución y precipitación del hierro en el líquido de cobre

El momento en el que ocurre cada uno de estos fenómenos y la velocidad a la cual ocurre es complicado de estudiar, pero por simple examinación metalografica se puede obtener una imagen muy aproximada pero no exacta del grado de sinterizado.

Generalmente la temperatura de sinterizado es de 2000-2050°F aproximadamente y 7.5-9.0% de cobre es soluble en el hierro y si la temperatura es bastante alta o el tiempo de sinterizado es muy largo, esta cantidad de cobre puede disolverse sin dejar cobre libre. Sin embargo, con las condiciones de sinterizado algo de cobre libre no se disuelve. El cobre que es fundido puede disolver alrededor del 3% de hierro a la temperatura de sinterizado.

La solubilidad del cobre en el hierro decrece al bajar la temperatura y es menor al 0.1%. Esto significa que el cobre que se disuelve en el hierro a la temperatura de sinterizado debe precipitarse fuera de la solución cuando la temperatura decrece. Este precipitado llega a ser mejor como la temperatura a la cual se forma el decrecimiento. Una rápida velocidad de enfriamiento, baja la temperatura a la que esta se forma.

Cuando el material de hierro-cobre es atacado con 2-5% de nital o picral, la presencia de cobre precipitado es indicado por un color café. La parte de color es proporcional a la cantidad de precipitado. Algunas veces el color café es alterado por manchas azules, pero usualmente la parte de cobre difundido y grado de precipitación es aun visible.

La difusión del cobre dentro del hierro causa el crecimiento del compactado. El fenómeno de cobre residual disolviendo algo de hierro y precipitando es el proceso de contracción. Este proceso va simultáneamente con la difusión del cobre predominando solo en la etapa temprana del sinterizado.

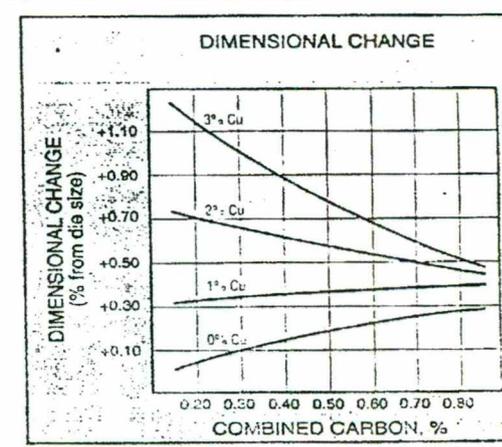
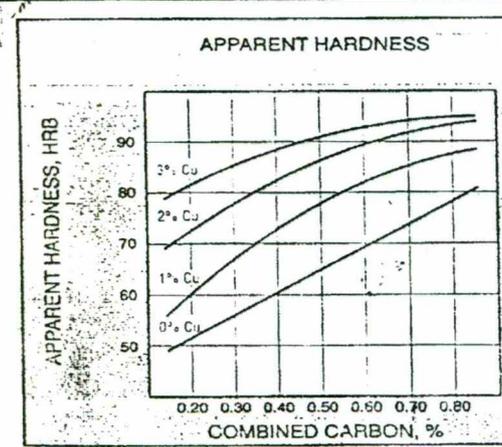
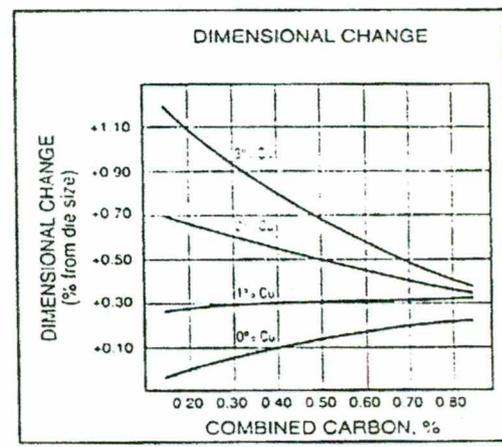
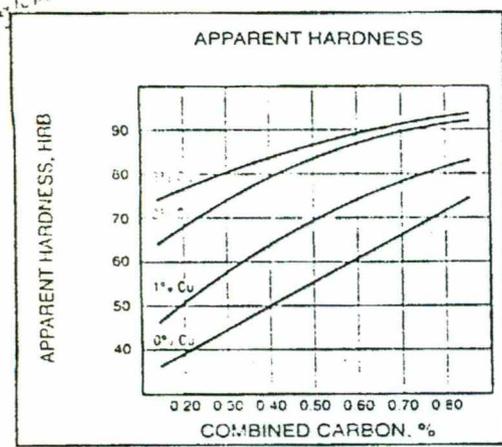
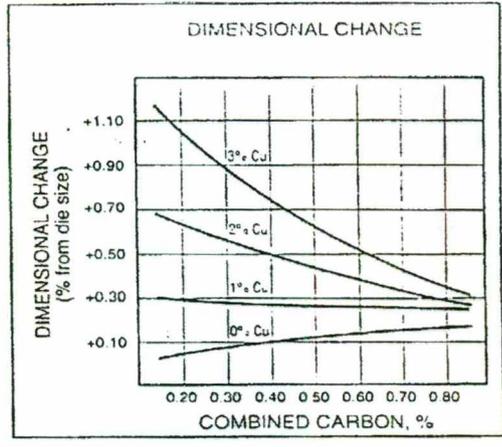
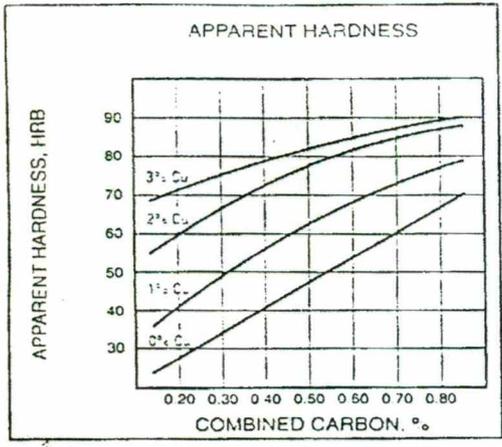


Fig. 7.- Representación gráfica del cambio dimensional en el cobre las dos primeras corresponden a una densidad de 6.8, las de en medio de 7.0 y las últimas a 7.2 g/cc.

El cobre es adicionado al polvo de fierro base en cantidades de 1.5-4% en peso.

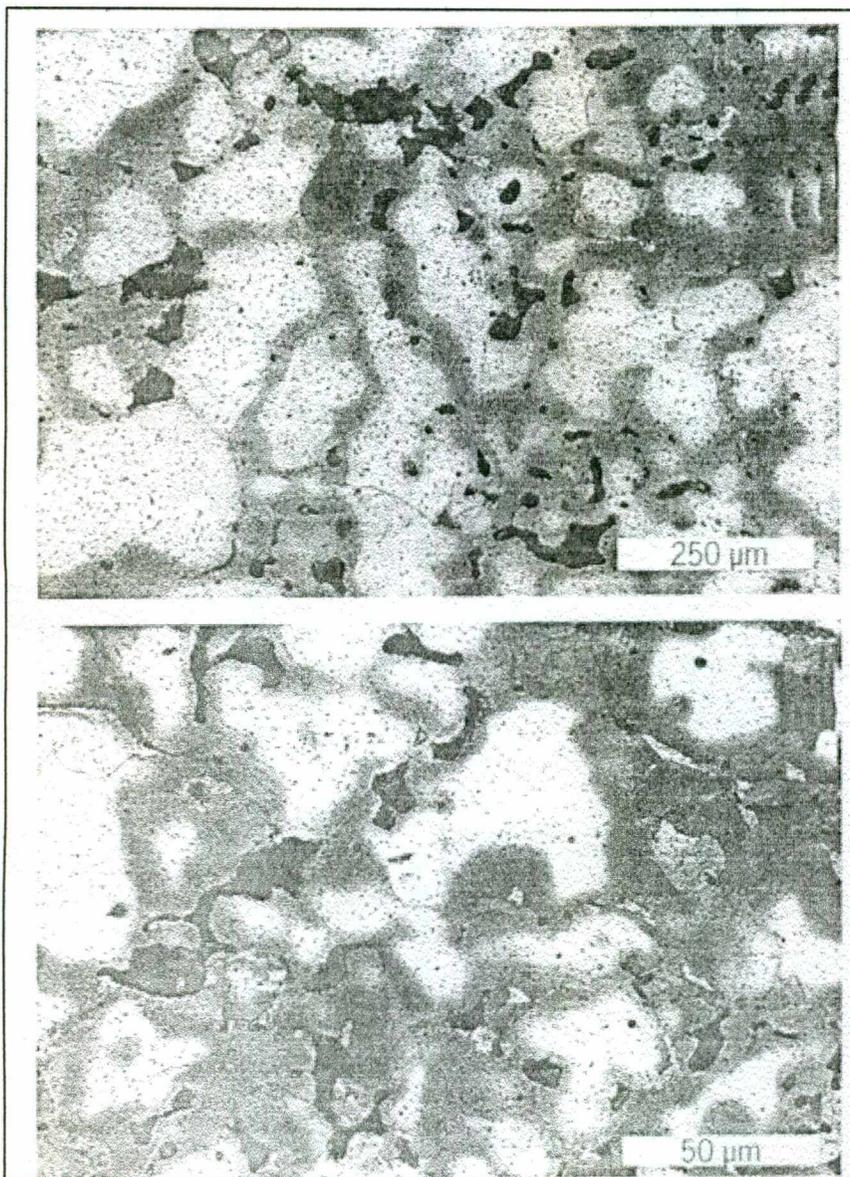


Fig. 8. - Microestructura de dos materiales que contienen fierro-cobre, conteniendo 2 y 4%de cobre respectivamente, compactado a una densidad aproximada de 7 g/cc,y sinterizado durante 30 min. A 1120°C. Como se puede ver, no esta distribuido homogéneamente en la matriz del fierro después del sinterizado.

## FIERRO-COBRE-CARBONO

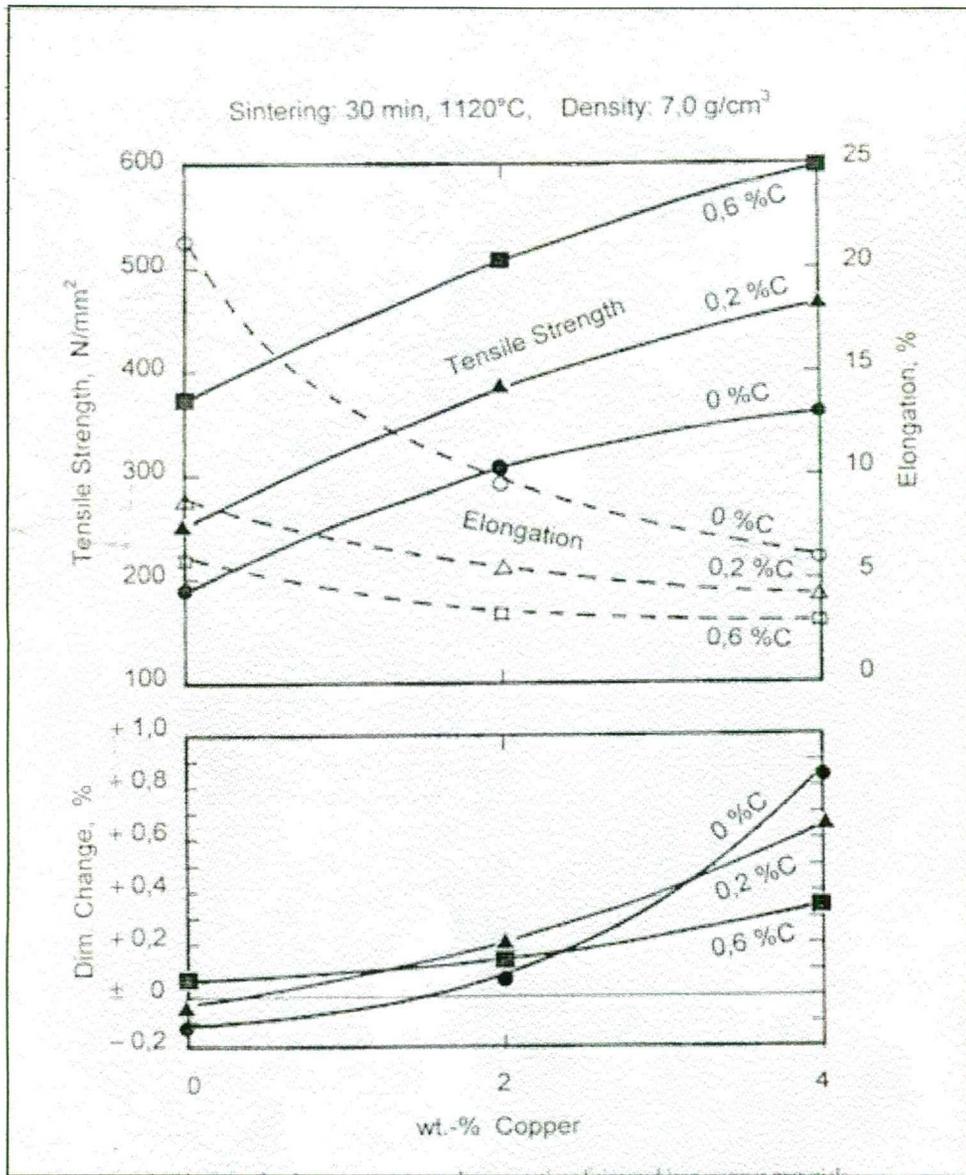
El sinterizado de materiales de Fe-Cu-C involucra el fenómeno asociando en ambos Fe-C y Fe-Cu con la posible adición de la fase líquida sinterizando debido a la formación de un eutéctico Fe-Cu-C que se forma alrededor de 1104°C. Siempre y cuando el eutéctico sea formado subsecuentemente por causa de la difusión dentro del sólido. Esto no es una evidencia metalográfica directa de la formación.

Aunque el carbón puede tener pequeño efecto en la solubilidad del cobre en el hierro, la velocidad de solución decrece, así el cobre libre presenta un alto grado cuando el carbono este presente.

Durante el sinterizado, la difusión del carbón comienza a más baja temperatura que la difusión del cobre. Generalmente el carbón esta completamente combinado antes de que el punto de fusión de cobre (1082°C) sea alcanzado. El efecto de la cantidad de carbón combinado es similar al de la mezcla de Fe-C.

Debido a que la cantidad de cobre que difunde es menor por la presencia del carbón, esto es más oportunamente para el fenómeno de solución-precipitación que debe ser activado. Este resultado disminuye el crecimiento. El eutéctico Fe-Cu-C, cuando es formado, fomenta la disminución de crecimiento.

En las siguientes ilustraciones se pueden apreciar algunos de los efectos.



\*Fig. 9. - El diagrama ilustra el efecto del carbono adicionado sobre el esfuerzo a la tensión, elongación y cambios dimensionales en material hierro -cobre.

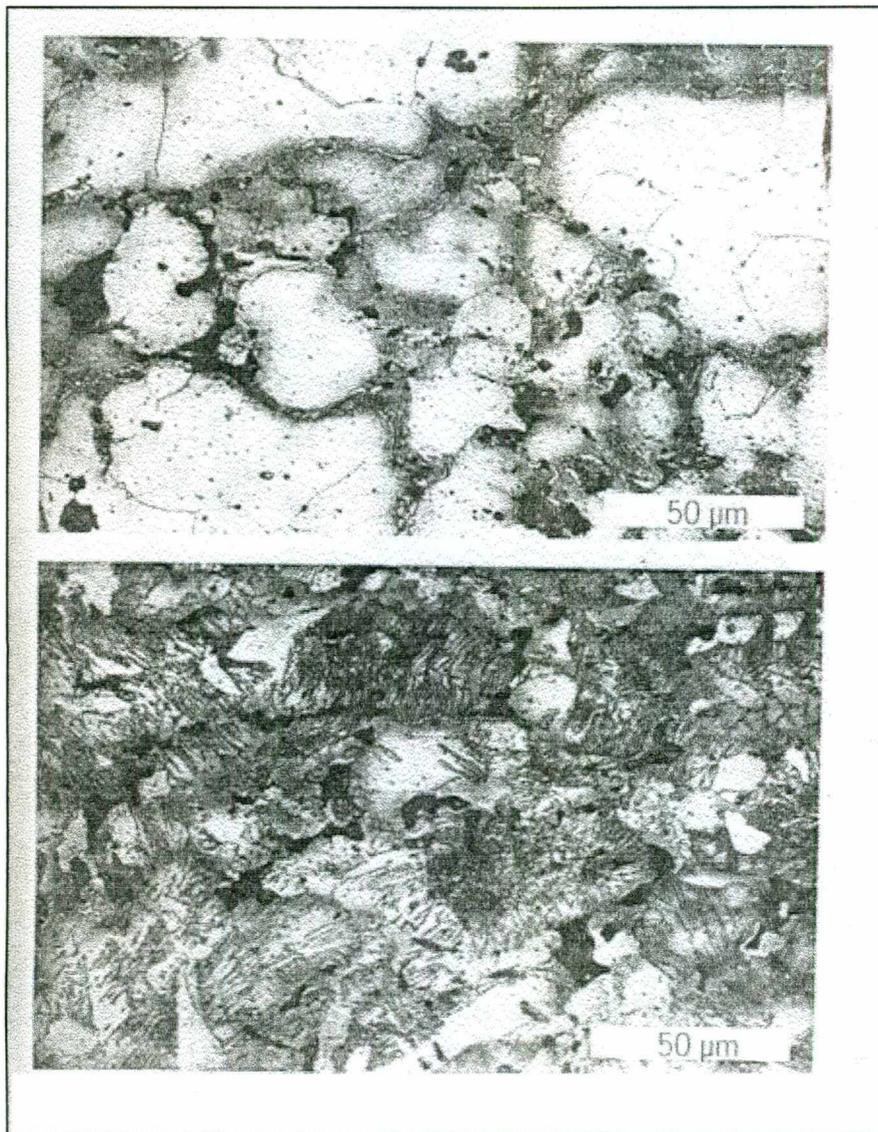
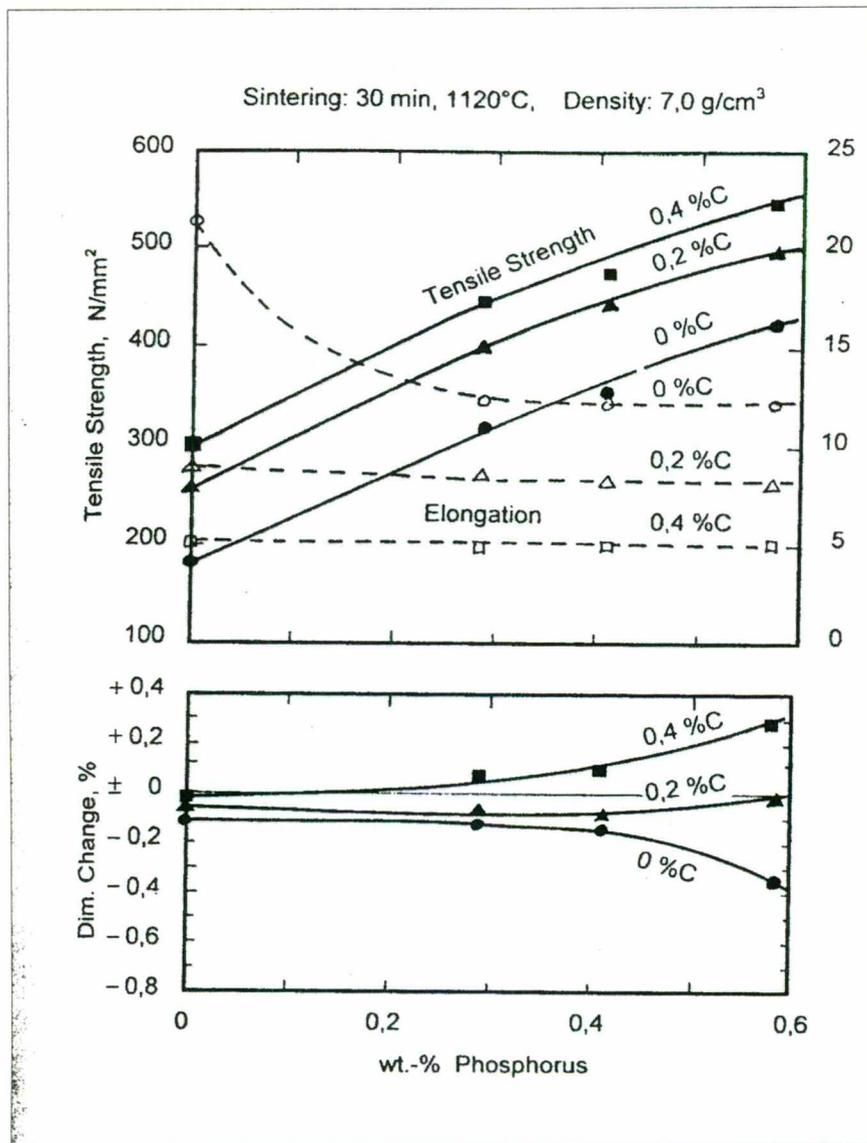


Fig. 10. - Microestructuras de dos materiales que contiene hierro-cobre con 2% cobre y 0.2 respectivamente y 0.6% de carbono, compactado a una densidad de aprox. 6.9 g/cc, y sinterizado por 30 minutos a 1120°C en endogas.

## FIERRO-FOSFORO-CARBONO

Dentro de la metalurgia del polvo, el fósforo ocasiona un incremento en el esfuerzo, aquí, el fósforo es normalmente adicionado al polvo de hierro como un polvo fino de  $Fe_3P$  que, comparado con otros componentes de fósforo, es relativamente suave y menos perjudicial a la herramienta de compactación.

Durante el sinterizado. El fósforo y el hierro forman un punto eutectico (10% P, 1050°C) que rápidamente infiltra el sistema de poros del compactado y realza el proceso de sinterizado.



\*Fig. 11. - Influencia del fósforo y carbón sobre el esfuerzo a la tensión, elongación y cambios dimensionales.

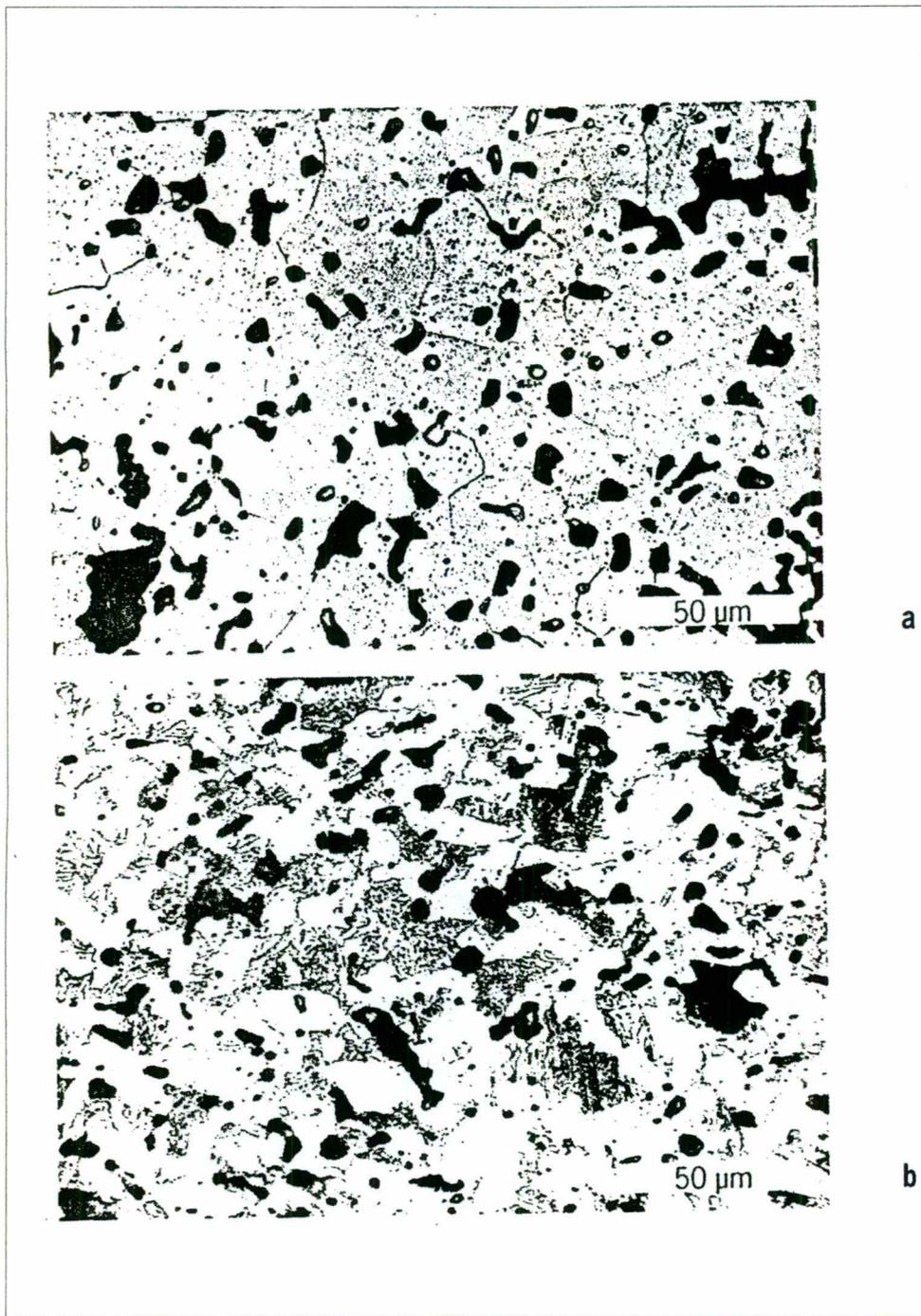


Fig.12. -Microfotografía de dos materiales sinterizado con 0.45% de fósforo, uno y otro con 0.5% de carbón. Note que los redondos- de poros de medio tamaño y la ausencia de poros pequeños.

Una comparación de este diagrama con el de la fig. 9, es que en ambos casos, el polvo de hierro base es NC100.24 como se puede ver, adicionando 0.3%-0.6% de fósforo tiene un efecto similar en el esfuerzo a la tensión y elongación con la adición de 2-4% de cobre. Sin embargo, adicionando fósforo el efecto de cambio dimensional durante el sinterizado es mucho menor el grado del cobre adicionado y produce contracción antes de que crezca la parte sinterizada.

### FIERRO-COBRE-NIQUEL-CARBONO

Adicionando níquel a las mezclas de hierro-cobre y hierro-cobre-carbono, se tiene aproximadamente el mismo efecto sobre el esfuerzo a la tensión y elongación como si se incrementara el contenido de cobre. Sin embargo, la ventaja principal en la sustitución de algo de cobre con níquel es una considerable reducción del cambio dimensional durante el sinterizado.

Un polvo fino de níquel mezclado con hierro y carbono, normalmente no difunde completamente durante la etapa del sinterizado, sinteriza a temperaturas elevadas alrededor de 1149°C.

En las siguientes gráficas se ilustra las condiciones del cambio dimensional.

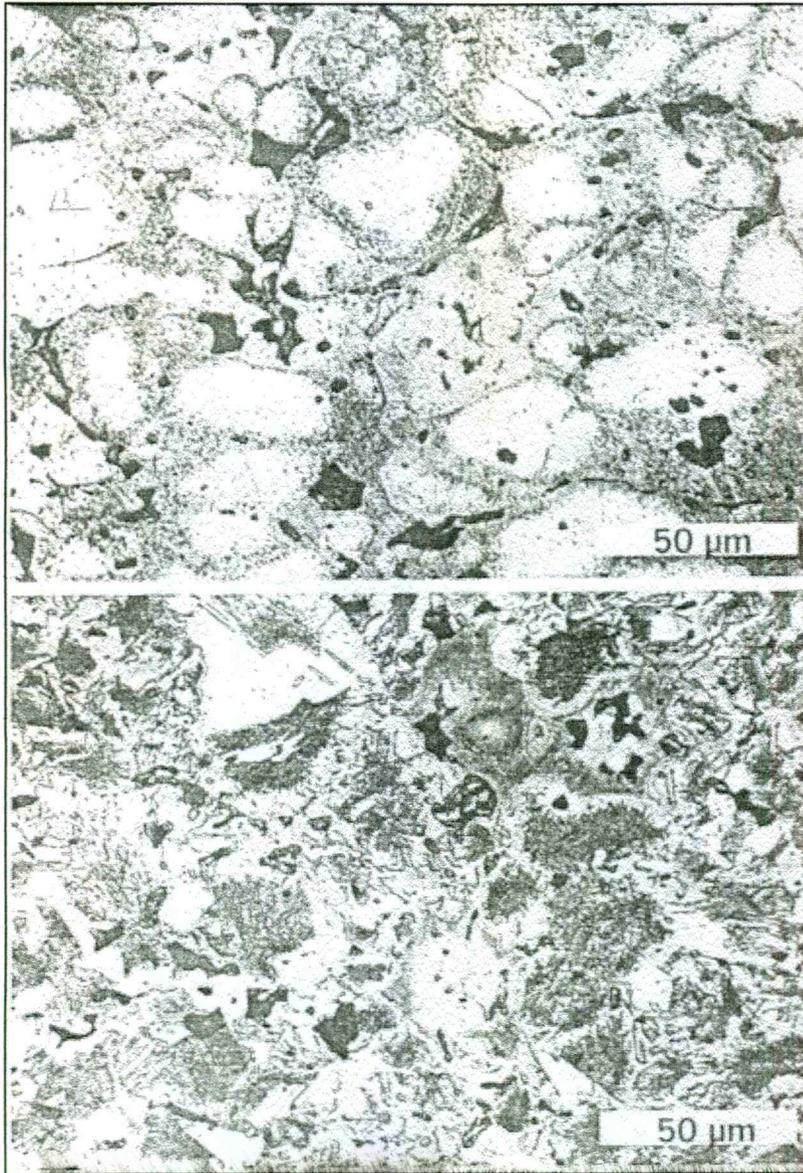


Fig. 13. - Microestructura de dos materiales sinterizados de base fierro, uno contiene 2.5% de cobre + 2.5% níquel y otro que contiene 2.5% cobre + 2.5% níquel + 0.6% carbón.

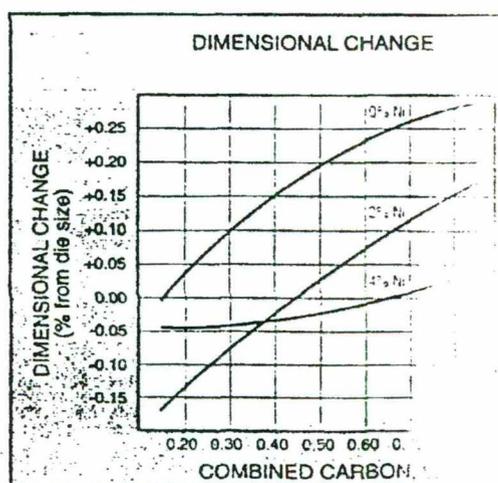
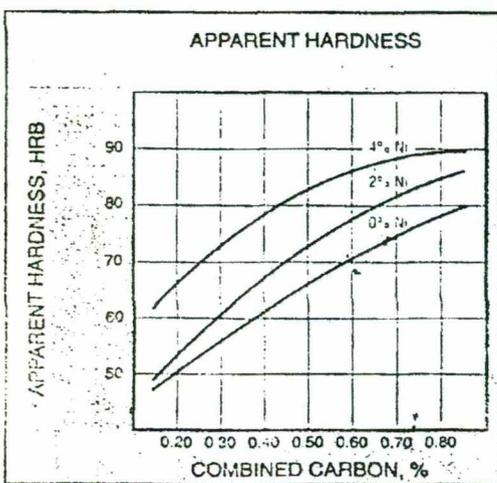
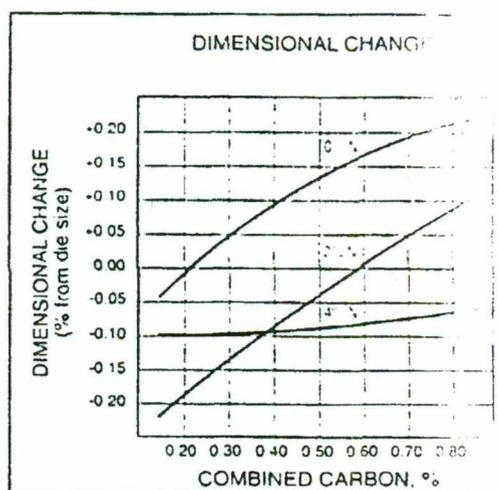
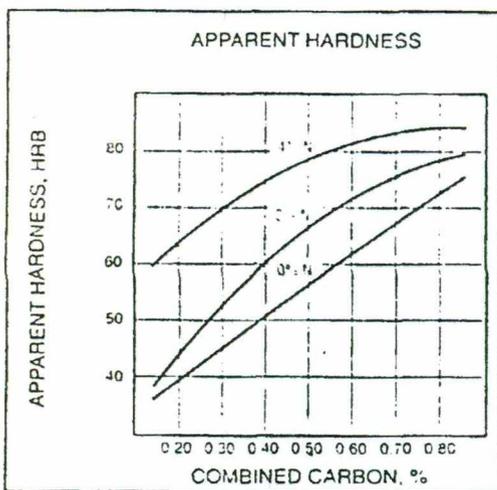
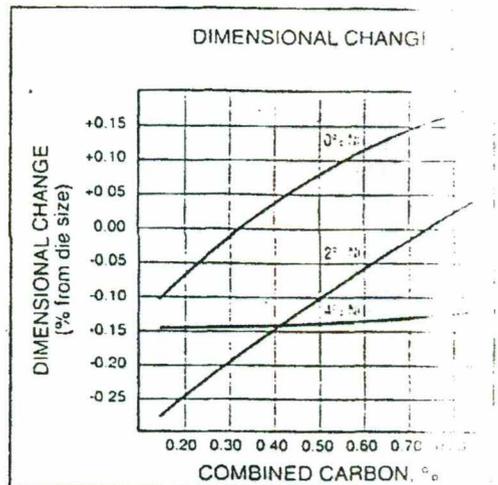
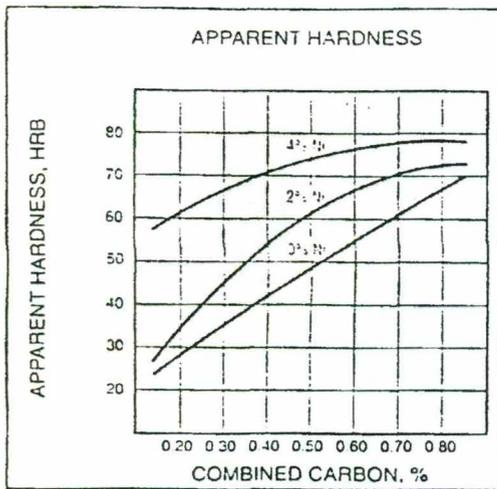


Fig. 14.- Comportamiento del níquel en el cambio dimensional.

\*FOLLETIN INFORMATIVO, QMP, ATOMET 1001, SINTERED PROPERTIES, NICKEL STEELS, PAG. 3

## *Propiedades geométricas*

### 1. -Distribución del tamaño de partícula.

La distribución del tamaño de la partícula es importante en la compactación del polvo e influirá en su comportamiento durante el moldeo y el sinterizado. En general, se prefiere un polvo más fino sobre un polvo más grueso, ya que los metales más finos tienen menores tamaños de poros y mayores áreas de contacto, lo cual resulta generalmente en mejores propiedades físicas después de sinterizar, sin embargo, este tipo de polvos no siempre se utilizan, esto se debe a que el obtener un polvo fino es más costoso (económicamente), pero como ya se mencionó, dependiendo las características de la pieza, se pueden utilizar mezclas de polvos; finos, gruesos, esféricos, en forma de hojuelas, etc. por ejemplo, en el caso de la fabricación de filtros se prefieren polvos grandes y de forma esférica.

La distribución del tamaño de la partícula se especifica en términos de un análisis de cribado, o sea, la cantidad de polvo (100 g. generalmente) que pasa a través de una serie de mallas.

En las tablas de las páginas 12 y 13 se dan algunos valores de granulometría de polvos que se utilizan en la empresa SINTERMEX.

### 2. - Forma externa de la partícula.

La forma de la partícula es muy importante, ya que de esta depende que se alcancen los valores de densidad deseados. Polvos que consisten de partículas finas o partículas de alta porosidad interna, sinterizan más rápidamente que el polvo que consiste de partículas compactas toscas. Aquí, tenemos un dilema: polvos finos son generalmente más difíciles de compactar que polvos toscos, y la compactación hace que los polvos finos se reduzcan más durante el sinterizado que la compactación hecha en polvos toscos. Esta propiedad también influye en las características de empaquetamiento y flujo de los polvos. Las partículas de forma esférica tienen excelentes cualidades de sinterizado y dan como resultado características físicas uniformes del producto final.

El polvo esférico fino es muy efectivo para aumentar la densidad aparente.

Por todo lo antes mencionado, se prefiere un polvo más fino sobre un polvo más grueso, ya que los más finos tienen menores tamaños de poros y mayores áreas de contacto.

### 3. -Porosidad de la partícula o productos finales.

La porosidad de productos finales va a depender, como ya se ha mencionado de la forma y tamaño de la partícula, así como la densidad obtenida en la compactación.

#### 4. - Propiedades mecánicas.

Las propiedades mecánicas de las piezas sinterizadas son de gran importancia porque dan información sobre las condiciones en que se encuentra la misma.

Algunas de estas propiedades son:

- En verde: presión de compactación (Mpa), esfuerzo en verde.
- En sinterizado: esfuerzo de ruptura ( $N/mm^2$ ), esfuerzo a la tensión (Mpa), cambio dimensional (% del tamaño), dureza (HRB).
- Tratamiento térmico: esfuerzo a la ruptura transversal (Mpa), esfuerzo a la tensión, dureza (HRc).

### **MEZCLADO**

En la etapa del mezclado, lo que se busca es obtener la homogeneización de los polvos que se van a utilizar para obtener un producto. La combinación de los polvos metálicos se hace de acuerdo a las características y a las propiedades físicas que requiere el producto. El tiempo de mezclado puede variar dependiendo del tipo mezcla, en la empresa SINTERMEX se utiliza un tiempo de 15 minutos, evitándose el sobremezclamiento, ya que puede disminuir el tamaño de la partícula y se puede provocar un endurecimiento por trabajado de la misma.

Cuando la mezcla de polvos cumple con el tiempo requerido dentro de la mezcladora, se deben de cuidar ciertas características, como son:

- a) Densidad aparente
- b) Fluidez

Estas dos pruebas se explican dentro de las propiedades mecánicas de los polvos y se realizan de la misma manera.

c) Volumen de relleno.- esta prueba consiste en hacer pasar 100 g. de la mezcla por medio de un embudo, la mezcla se deposita dentro de una probeta graduada, cuando todo el polvo ha pasado por el embudo, se toma la probeta con cuidado para no testearla y no provocar que el polvo se asiente para ver cuantos ml de polvo ocupan 100 gr. de la mezcla.

Esta prueba es importante, ya que con esto se determina que cantidad de polvo que es necesario para rellenar la cavidad del dado en el proceso de prensado.

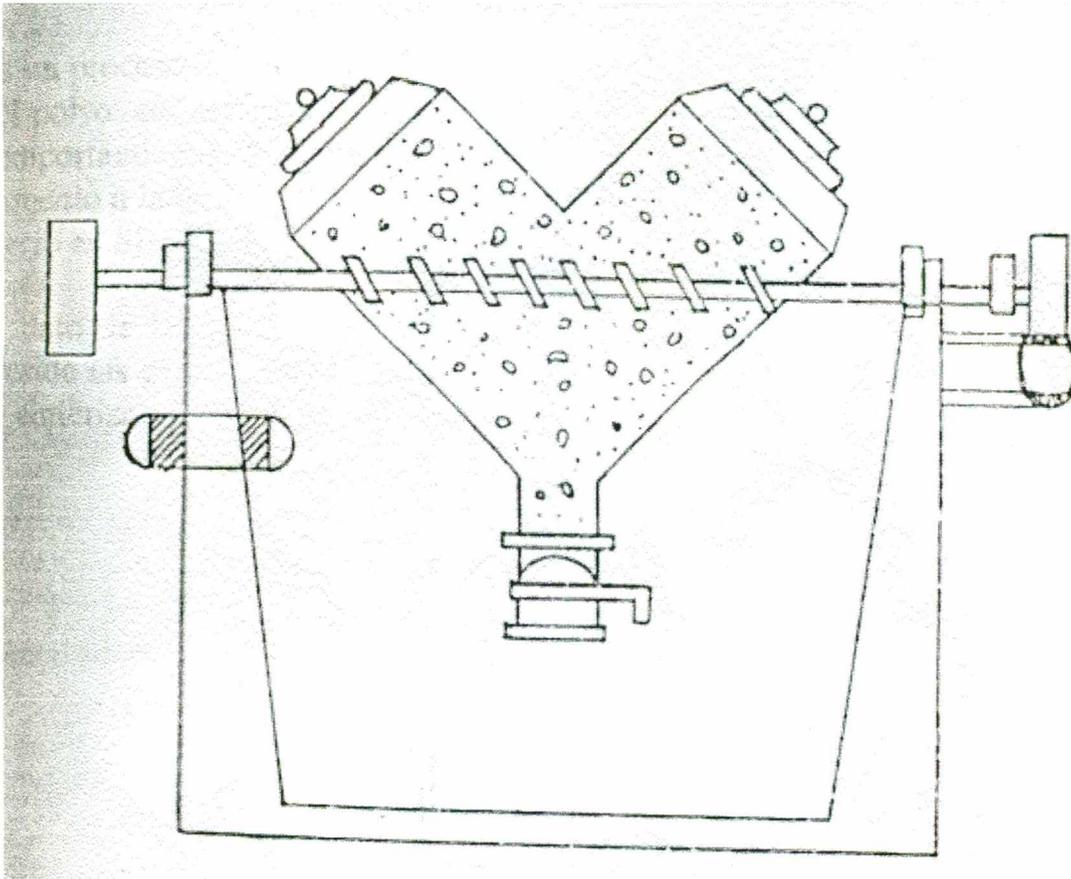


Fig. 13.- Mezcladora eléctrica

## COMPACTACIÓN

El siguiente paso es la compactación, el cual es el proceso en donde las partículas de polvo son expuestas a una determinada presión, por medio de un troquel. El propósito del compactado es consolidar el polvo en la forma deseada y tan cerca como sea posible a las dimensiones finales, teniendo en cuenta cualquier cambio dimensional que resulte del sinterizado; el compactado se ha diseñado también para impartir el nivel y tipo de porosidad deseado y proporcionar una adecuada resistencia para la manipulación.

La recuperación (spring back) es la expansión elástica de un polvo compactado cilíndricamente después de la expulsión del dado de compactación. El spring back se incrementa cuando la presión del compacto aumenta y esta influenciado por el tipo y cantidad de lubricante en la mezcla, y por el coeficiente de elasticidad del material del dado con el cual el polvo es compactado.

El valor del spring back es importante porque se puede calcular las dimensiones exactas de la herramienta de compactación en relación con las dimensiones requeridas del compactado.

$$\% \text{ spring back} = ((D_v - D_m) / D_v) * 100 \dots\dots (1)$$

$D_v$  = diámetro en verde del compactado

$D_m$  = diámetro de la matriz utilizada para compactar el polvo

Las propiedades de resistencia del sinterizado aumentan con un incremento en la densidad, pero la economía decae con un incremento en la energía de gasto y en la herramienta de compactación. La habilidad para obtener una densidad presionada satisfactoria determina a menudo la factibilidad de manufactura en la metalurgia de polvos.

A nivel laboratorio se han obtenido curvas de densidad-presión, donde se muestra una relación directamente proporcional, es decir, a mayor presión mayor densidad, como se ilustra en la fig. 16, aunque no solamente con un aumento de presión se incrementa la densidad del polvo en verde, sino también con el crecimiento del tamaño de la partícula o densidad aparente, con la disminución de la dureza y resistencia de las partículas y con el decremento de la velocidad de compactado.

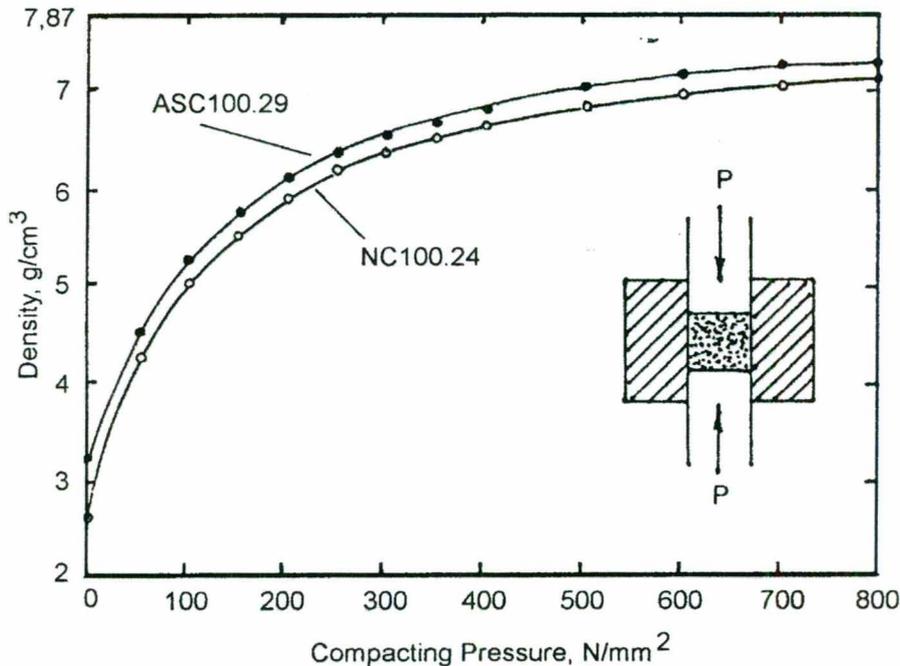


Fig. 16. - Curvas de Densidad-Presión para dos hierros de polvo comercial compactado en un dado teniendo un diámetro interno de 25 mm. Adicionando lubricante: 0.75% de Zn-estearato.

Handbook 1, material and powder properties, chapter 3, characteristics and steel powders, pag. 3-5

El ciclo de compactación puede ser dividido en 3 partes:

- a) Llenado del dado
- b) Densificación del polvo
- c) Remoción del compactado del dado

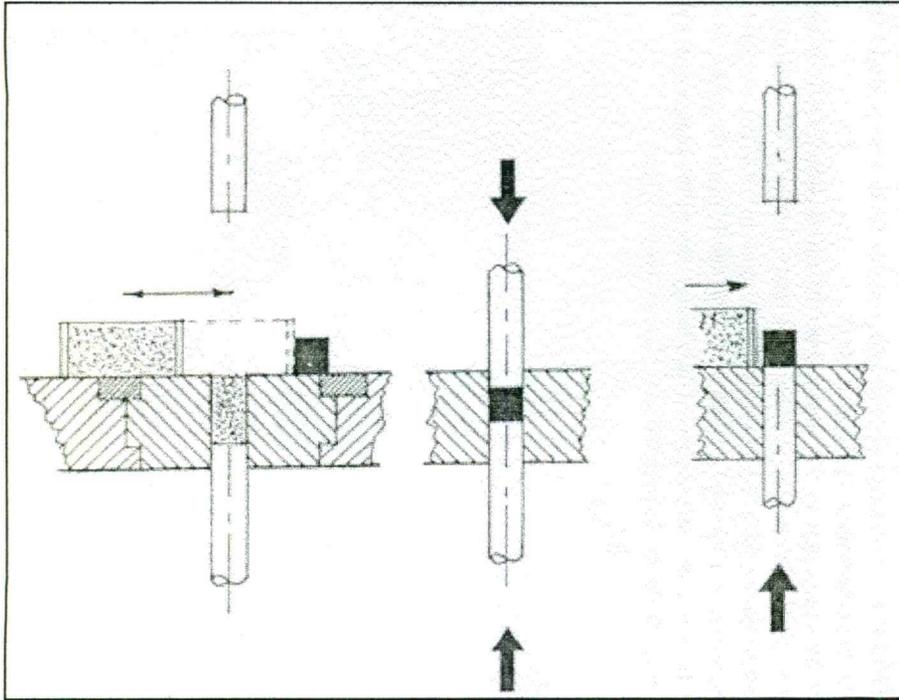


Fig. 17. - Ciclo de compactación

#### *Llenado del dado*

El polvo cae o fluye por gravedad desde el dispositivo de llenado dentro de la cavidad del dado.

Los siguientes procesos que se llevan a cabo dentro del mecanismo de compactación son importantes, para cuando se cargan cavidades de troquel con polvos de metal: el llenado de espacios entre las partículas más grandes por partículas más pequeñas, el rompimiento de puentes o bóvedas, y el deslizamiento y rotación mutua de partículas.

Es casi trivial mencionar que teniendo cavidades de sección ancha es más fácil llenar con polvo que teniendo una sección estrecha. En casos donde la cavidad del dado consiste de varias partes, teniendo diferentes perfiles y profundidades, la densidad de llenado del polvo

es muy variable debido a la variación del flujo en el llenado y el comportamiento del polvo. También puede suceder que la densidad de llenado en partes estrechas es más bajo en la parte inferior que en la superior. Tal variación en la densidad de llenado puede resultar de la variación en las densidades de compactación. Para compensar la variación en la densidad de llenado entre las diferentes partes de la cavidad del dado, se debe realizar un pre-ajuste.

### *Densificación del polvo*

Debido a la presión que se ejerce sobre el polvo comienza el proceso de densificación, que es un acercamiento entre las partículas, es decir, se forma un enlace, el cual, se obtienen por medio de las fuerzas de Van der Waals, sin embargo; es un enlace débil, por lo tanto, se dice que las piezas obtenidas después de la compactación están en verde.

Debido a la fricción entre el polvo y la pared del dado, el compactado es más denso en sus dos extremos, cerca del punzón de compactación, que en el centro. La localización de la densidad más baja en un compacto aparece a la vista como una zona mate u opaca sobre la superficie lateral brillante del compacto.

Para evitar la fricción que se da en esta parte del proceso, el utilizar lubricantes ayudan y protegen las herramientas contra un desgaste excesivo y, además, para facilitar la fluidez y prensado de los polvos.

En la mayoría de los casos, es mejor para las propiedades del compactado, si la zona de más baja densidad, se localiza aproximadamente a la mitad del camino entre la parte superior e inferior del compacto. Este es el caso donde la densificación toma lugar entre lo alto y bajo del punzón que se mueve simétricamente relativo al dado de compactación. El movimiento simétrico del punzón puede, en un principio, ser logrado en tres diferentes caminos, como se ilustra en la fig. 18.

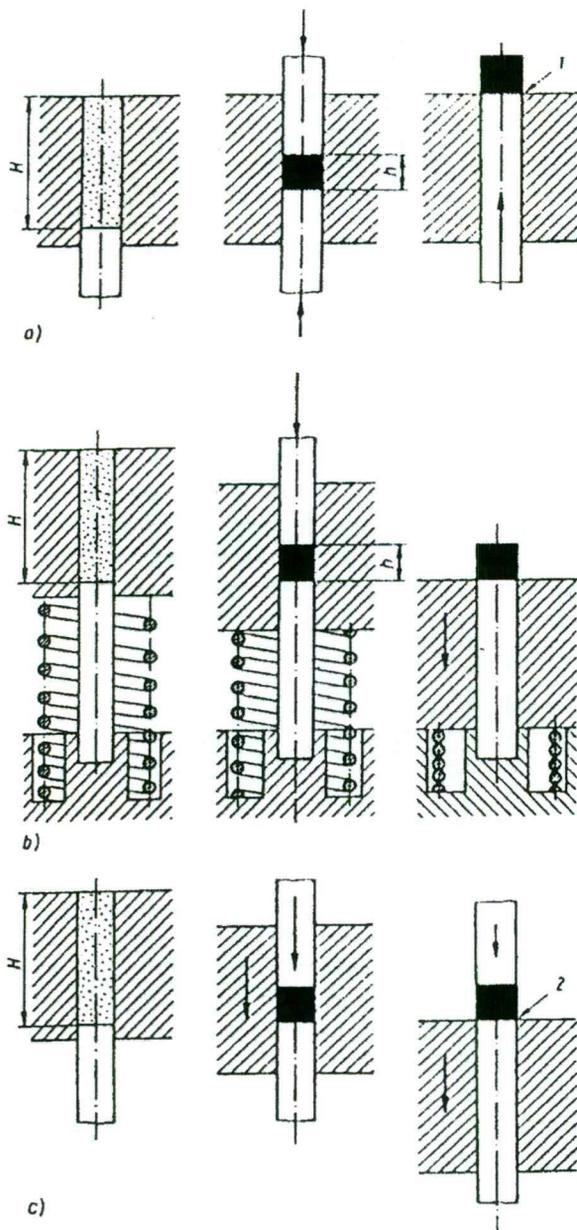


Fig. 18. - Tres diferentes conceptos de obtener densificación simétrica doble-lado

Olvidando por el momento, el problema de la fricción entre el polvo y la pared del dado y considerando una compactación isostática del polvo, en la fig. 19 se puede observar la deformación de las partículas por medio por medio de un análisis estructural de rayos X.

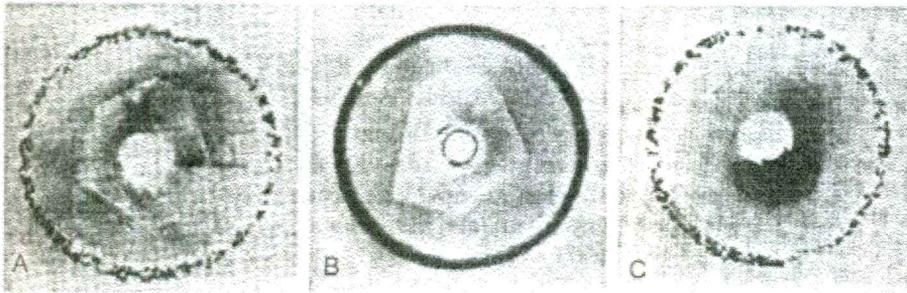


Fig. 19. - Esfuerzo de deformación de las partículas de polvo en la compactación de un polvo de hierro esponja. A) polvo antes de la compactación b) compactación hecha a 3 tn/cm<sup>2</sup> C) la misma compactación después de un recocido suave por 2 min. a 930°C.

Desde un punto de vista físico, durante la compactación del polvo el volumen disponible por el aire atrapado entre las partículas del sólido en el llenado es también reducido. El cambio de la presión atmosférica a la más alta presión de compactación normalmente ocurre en un tiempo normalmente corto. Y entre las uniones de las herramientas es difícil que se pueda escapar el aire. Esto significa que el fenómeno de la compresión del aire, simultáneamente con la densificación del polvo es, en el principio, no muy lejos remoción de una transformación adiabática. Una hipótesis muestra que la presión final del aire atrapado dentro de la porosidad del compactado, mientras se mantenga dentro de la herramienta, podría encontrarse valores por encima de los 50 Mpa. Este nivel claramente excede el máximo esfuerzo en verde de una matriz de base hierro. Entonces, especialmente en casos donde se tienen piezas pesadas y discontinuas, el rompimiento puede originarse durante la parte final de la compactación. En la práctica, por supuesto, la transmisión de calor al polvo metálico durante la densificación reduce considerablemente la temperatura al punto en donde la cantidad de calor generado es bajo debido a la muy pequeña masa de aire atrapado.

#### *Remoción del compactado del dado*

Durante el ciclo de compactación sobre una prensa mecánica sin dispositivo auxiliar, el punzón superior ejerce su máxima presión en el punto muerto más bajo. Entonces, se mueve hacia arriba nuevamente, repentinamente tomando la presión axial fuera del compactado y los punzones que ahora se expanden elásticamente en dirección axial.

Si hay punzones inferiores de diferentes longitud, sus diferentes expansiones axiales pueden crear rupturas en el compactado aún antes de que salga del dado. Como se ilustra en la fig. 20.

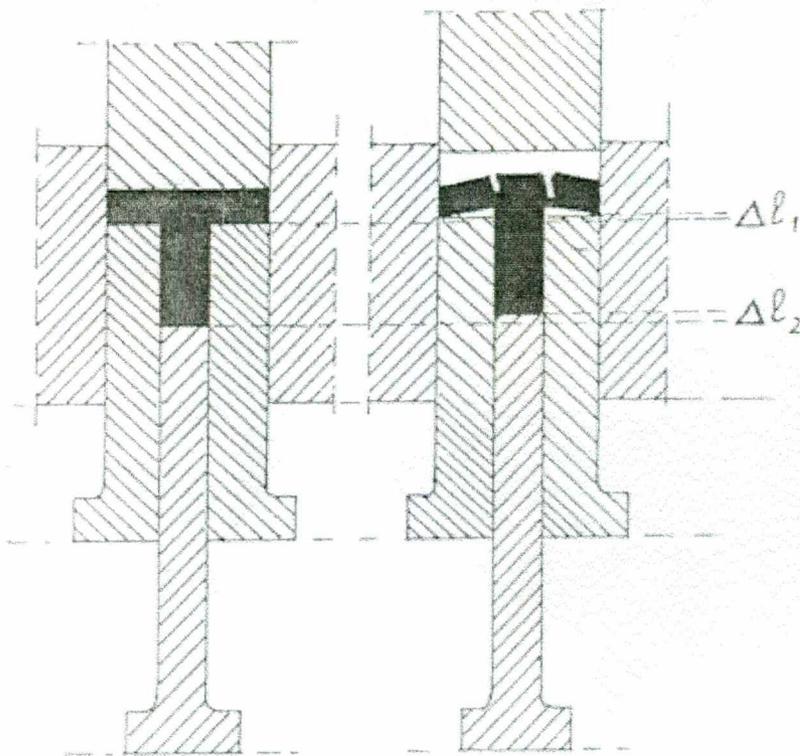


Fig. 20. - Rompimiento dentro del dado debido a las diferentes expansiones elásticas por dos punzones bajos cuando el punzón comienza a subir.

La ruptura ocasionada por este efecto es dañino, porque es difícil de detectar y no se logra remediar el problema durante el subsiguiente sinterizado. a fin de evitar este tipo de rupturas, todas las partes del compactado deben tener un equilibrio de presión axial moderado durante el procedimiento completo de expulsión.

Al final de la fase de compactación, el dado y el punzón bajo varían relativamente uno del otro de tal manera que la dirección del compactado es el comenzar a empujar hacia fuera del dado. Para lograr este efecto, es irrelevante que el dado este estacionario y el punzón comience a moverse a la inversa. El punto importante aquí es que, durante este procedimiento, el punzón bajo no se mueve respecto al otro de tal manera que el rompimiento se comience a dar en el compactado.

Como la salida del compactado del dado, la parte que sobresale, libre del esfuerzo de la compresión lateral del dado, se expande lateralmente, mientras que el resto del compactado es aún forzado a mantenerse dentro del dado.

Compactados frágiles y de forma delicada, tienen que ser removidos con cuidado por medio de un pequeño dispositivo automático que los transfiere individualmente a una bandeja especial que subsiguientemente puede pasar al horno de sinterizado. Los compactados, deben por supuesto de tener la suficiente resistencia en verde para resistir el manejo sin abrasión o rompimiento durante el trayecto.

## **SINTERIZADO**

El proceso de sinterizado se efectúa generalmente a una temperatura inferior a la del constituyente de más alto punto de fusión. En algunos casos la temperatura es suficientemente alta para formar un constituyente líquido, como en la manufactura de carburos cementados, en el que el sinterizado se hace por encima del punto de fusión del metal cementador. En otros casos, no tiene lugar la fusión de ninguno de los constituyentes.

Los siguientes parámetros rigen el comportamiento de sinterizado:

- Temperatura y tiempo
- Estructura geométrica de las partículas de polvo
- Composición de la mezcla del polvo
- Densidad del polvo comprimido
- Composición de la atmósfera protectora en el horno de sinterizado

La importancia de estos parámetros ya se ha mencionado, a excepción de la temperatura, tiempo y composición de la atmósfera protectora, los cuales se mencionaran más adelante.

### *Estado sólido de sinterización de material homogéneo.*

A juzgar por la forma cambiante de los interespacios entre partículas sinterizadas, el proceso pasa por dos diferentes estados:

1. - Una primera etapa de enlazamiento local (formación de cuello) entre partículas adyacentes. y
2. - La segunda etapa en donde el área de contacto aumenta, de tal manera que se observa un poro más pequeño.

En ambas etapas, el volumen de las partículas disminuye en la etapa temprana, la distancia entre centros de partículas adyacentes disminuye, en la etapa tarde, el volumen del poro disminuye. Ver fig. 21.

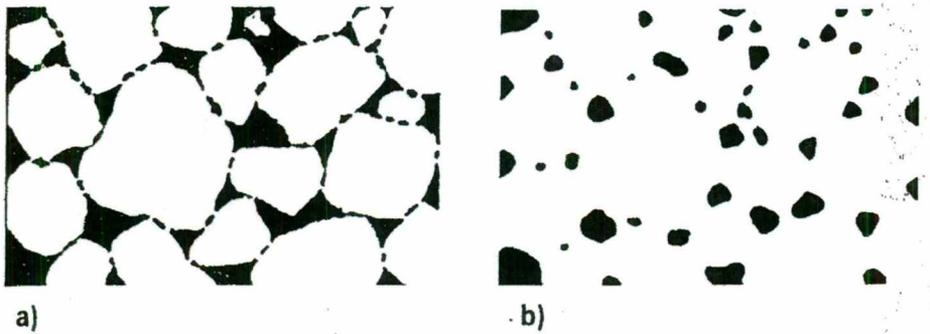


Fig. 21. - Etapas de sinterizado, a) etapa temprana b) etapa tarde.

Enlazamientos entre partículas de polvo requieren un transporte de material desde adentro de sus puntos y áreas donde ellos están en contacto con uno u otro.

En la ausencia de fase líquida, cinco mecanismos de transporte son posibles:

- Difusión de volumen (migración de vacancias)
- Difusión grano-enlace
- Difusión superficial
- Flujo viscoso o plástico (causado por tensión superficial o tensiones internas)
- Evaporación/condensación de átomos superficiales.

A fin de averiguar cual de estos mecanismos predominan en el proceso de sinterizado, el crecimiento de cuello, formado entre partículas esféricas durante la sinterización, ha sido estudiado experimentalmente, como se ilustra en la fig. 22.

Se puede concluir que en la etapa temprana del sinterizado, la difusión de volumen es el mecanismo predominante por las partículas de metal. Es muy probable, pero más difícil confirmar experimentalmente que, en la etapa temprana de sinterizado, la difusión de volumen es predominante, también en el caso de partículas de metal no esférico y polvo de metal compactado. En la etapa tarde de sinterizado, la difusión de volumen es responsable por el fenómeno de poro esférico. La fig. 23 muestra como las vacancias emigran de las esquinas a las partes más planas de la superficie del poro.

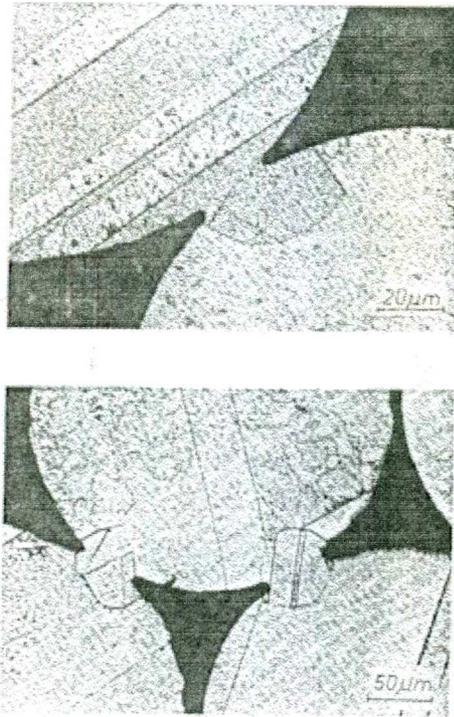


Fig. 22 - Formación del cuello entre esferas sinterizando de cobre

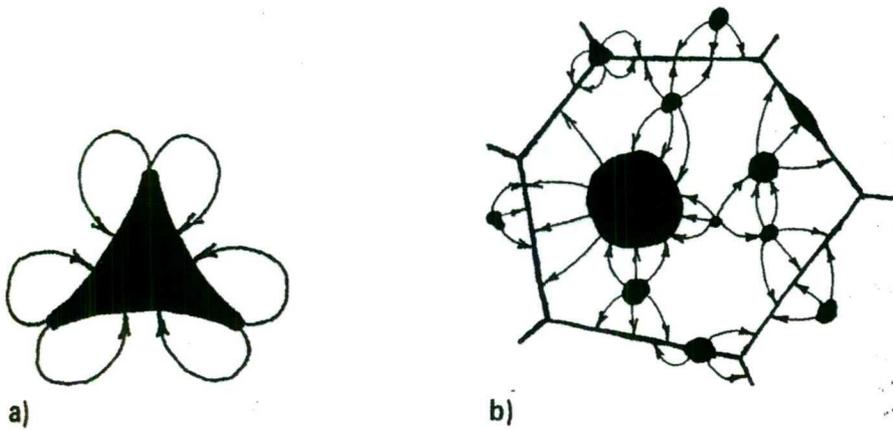


Fig. 23. - Migración de vacancias a) de las esquinas a las partes más planas de la superficie del poro y b) de poros pequeños a cerca de poros largos y enlaces de grano.

Pero la difusión de volumen no explica completamente la velocidad observada en los cambios y reducción de poros en su distribución de tamaño. En realidad, las vacancias emanan desde la superficie del poro, no emigran todo el camino hacia la superficie exterior

del cuerpo sinterizado. Ellos o condensan la superficie del poro más grande o consiguen atrapar al grano enlazado donde se forman en filas o la lámina que consecutivamente se colapsa debido al flujo plástico. Fig. 23b.

En la fotomicrografía de la fig. 24, se puede ver como los poros grandes incrementan su tamaño a causa de otros más pequeños, y como poros más pequeños desaparecen en el enlace de granos vecinos.

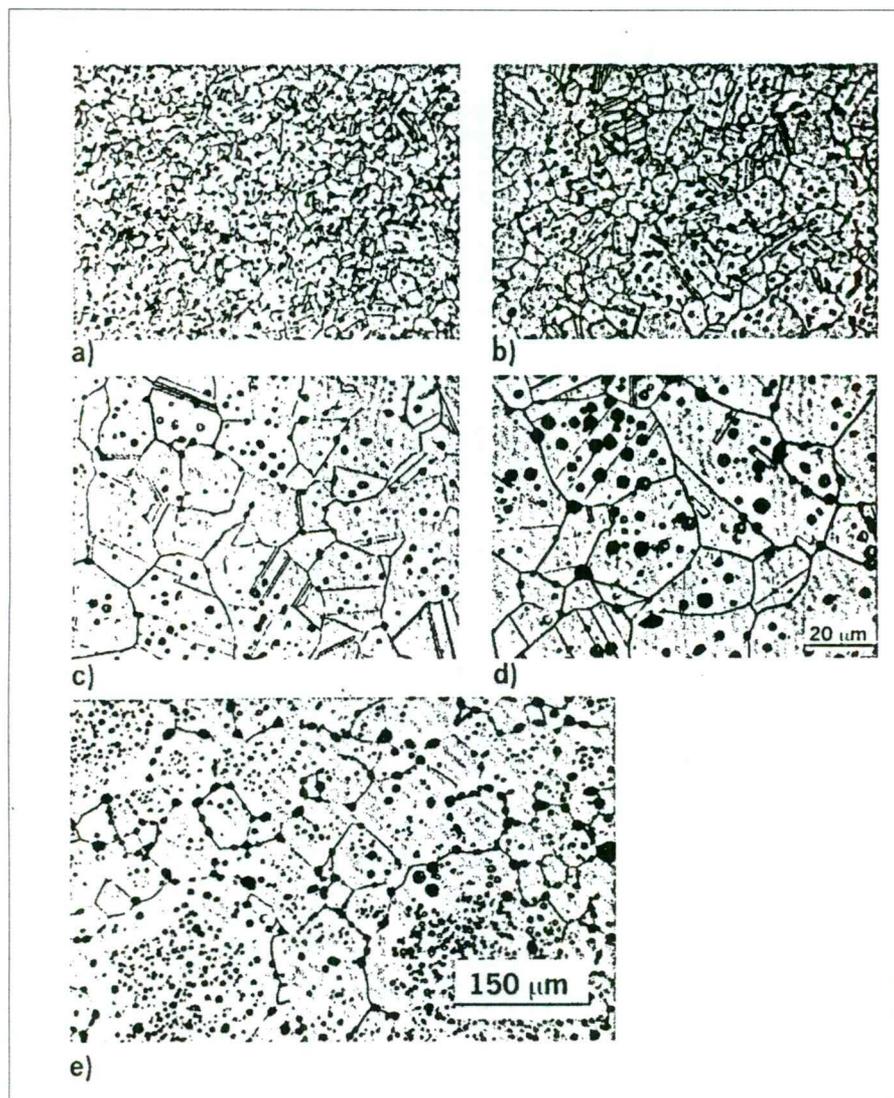


Fig. 24 – De a) a e) cambio de tamaño de grano y tamaño de poro, distribución en la microestructura de un polvo compactado de cobre y sinterizado.  
a) 4 min. b) 8 min. c) 30 min. d) 120 min. e) poro de zonas libres cercanas al grano de enlazamiento y poros largos en granos en el centro de hierro sinterizado.

### *Estado sólido de sinterizado de material heterogéneo.*

Cuando la mezcla de partículas de dos metales diferentes comienzan a sinterizar, toma lugar la aleación en la localización donde el cuello es formado entre partículas de metal diferente. Estos dos procesos interactúan uno con otro: uno es que, la velocidad de crecimiento del cuello depende ahora no solo de la velocidad de difusión en los dos metales puros, sino que también en las diferentes velocidades de difusión en las diferentes fases de la aleación, comenzando a formarse en uno u otro lado del cuello. En el otro proceso, la velocidad a la que se forma la aleación se controla el grosor del cuello. El resultado de esta interacción varía con la identidad química de los dos metales: se puede tener un acelerador, una postergación o ningún efecto o todos sobre la velocidad de crecimiento del cuello.

Elementos intersticiales como el carbón (agregado en forma de grafito) difunde muy rápidamente dentro del hierro, mientras que elementos como el níquel, cobre y molibdeno difunden mucho más lentamente. Asumiendo que los elementos aleantes consisten de pequeñas partículas esféricas dispersadas en una matriz densa de hierro, el tiempo  $T_p$  requerido para lograr un grado seguro de homogeneización puede calcularse con la siguiente fórmula<sup>2</sup>:

$$*T_p = \frac{a^2}{4\pi D} \left[ \frac{\pi C_0 p^{2/3}}{6 C_a (1-p)} \right]$$

donde;

a = diámetro de las partículas aleantes

D= Coeficiente de difusión

$C_0$ = concentración inicial de los elementos aleantes dispersados (generalmente 100%)

$C_a$ = promedio de la concentración de los elementos aleantes dentro del metal base

p =  $C_{\min}/C_{\max}$  = grado de homogeneización

\*HANDBOOK 2, PRODUCTION OF SINTERED COMPONENTS, CHAPTER 6, SINTERING, PAG. 6.13

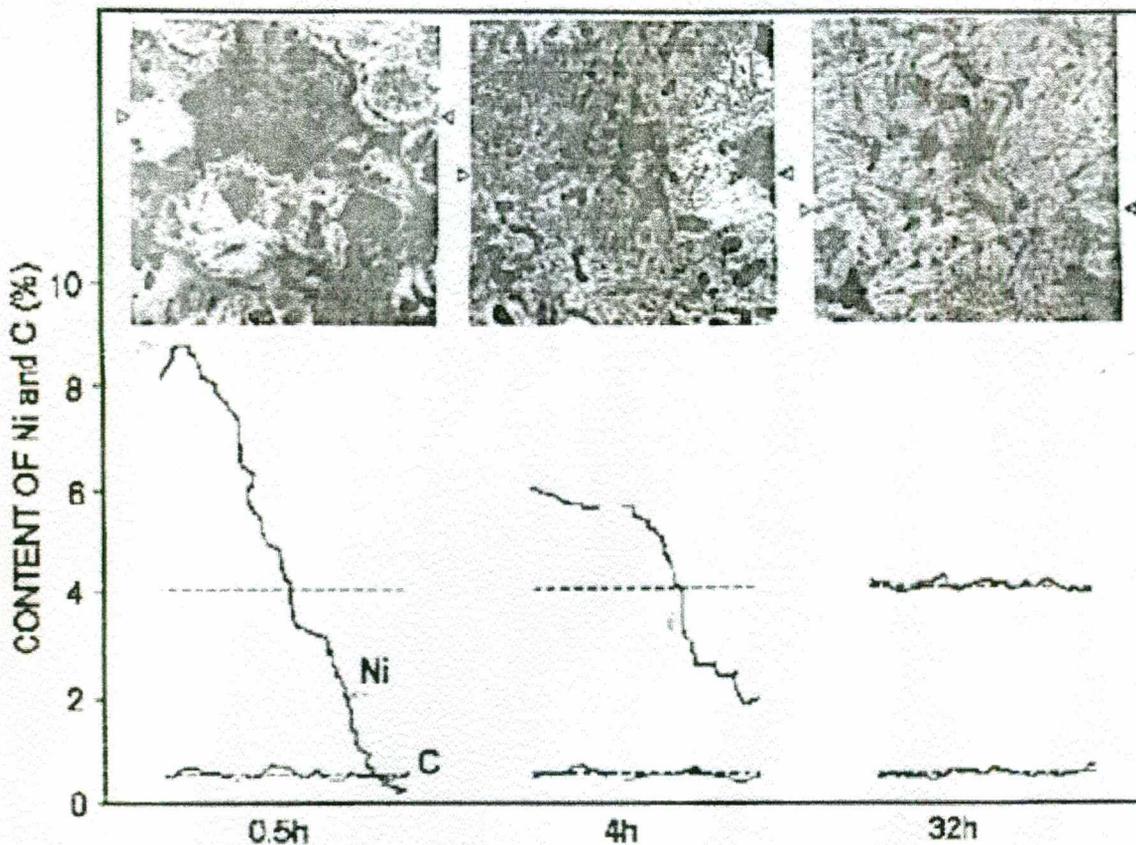


fig. 25.- Homogeneización del níquel y carbono durante el sinterizado a 1120°C en hierro compactado con una mezcla de 4%níquel y 1% grafito.

*Sinterizado en presencia de una fase líquida transitoria*

Considerando que se hace la compactación de una mezcla de partículas de dos diferentes metales. Si uno de los componentes de la mezcla funde a la temperatura de sinterizado, aparece una fase líquida que empieza a ser empujada por la fuerza capilar dentro de los huecos entre las partículas del sólido, creando una mayor área de contacto entre la fase líquida y sólida.

Entonces, la aleación tiene lugar y, la proporción inicial de la fase líquida es menor que su solubilidad en la fase sólida, la fase líquida eventualmente desaparece, el volumen aparente del compactado se dilata porque las partículas fundidas permiten que se comience a alargar los poros. Mientras que la estructura de las partículas de sólido incrementan su volumen correspondiente a la cantidad de la fase líquida disuelta. Ver esquemáticamente la ilustración de la fig. 26.

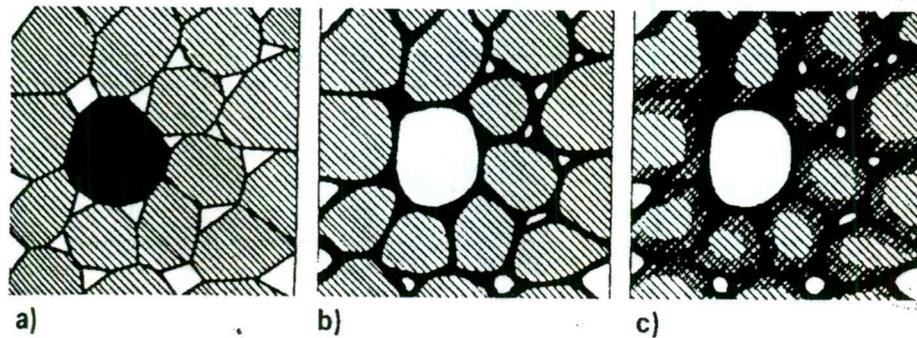


Fig. 26.- sinterización de una fase líquida transitoria

- a) polvo heterogéneo inicial en la compactación
- b) uno de los componentes de la mezcla de polvos funde y se infiltra por los espacios entre las partículas del sólido.
- c) comenzando la aleación entre la fase líquida y sólida desapareciendo gradualmente la fase líquida.

El cobre líquido puede penetrar fácilmente los límites de grano del hierro sólido porque la energía almacenada en la nueva interfase entre el cobre líquido y hierro sólido es menor que la energía almacenada en los límites de grano inicial.

Cuando comienza el sinterizado de una mezcla de polvo de hierro-cobre-grafito, las partículas de hierro comienzan a ser fuertemente carburizadas, con la formación de cementita formandose dentro de la austenita. Entonces el cobre fundido penetra los límites de la fase entre la austenita y cementita, causando una desintegración parcial de la superficie de la partícula seguido por una contracción de la estructura originalmente rígida formado por las partículas de hierro. Este mecanismo contrarresta el crecimiento ocasionado por el cobre que difunde dentro de las partículas de hierro.

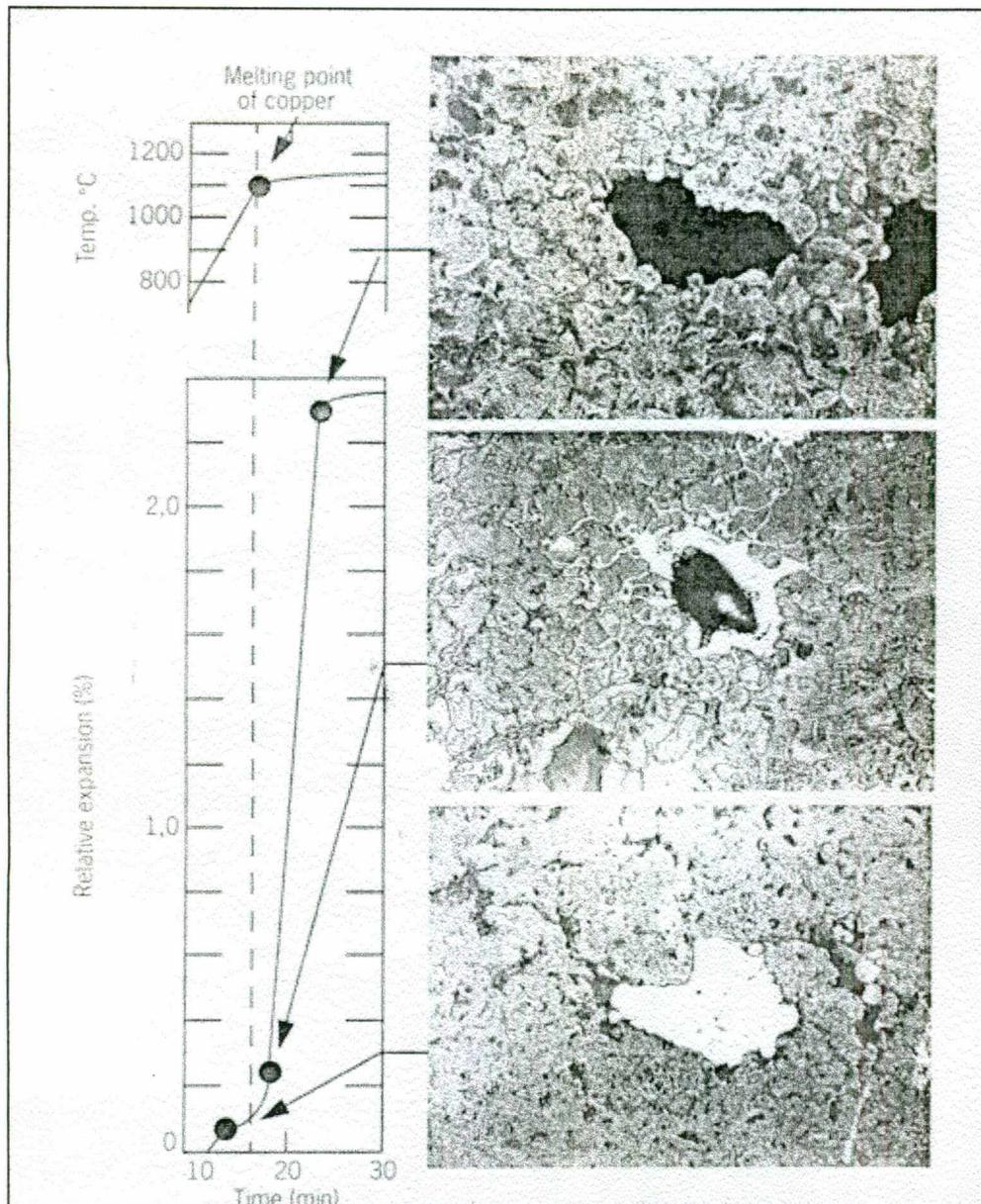


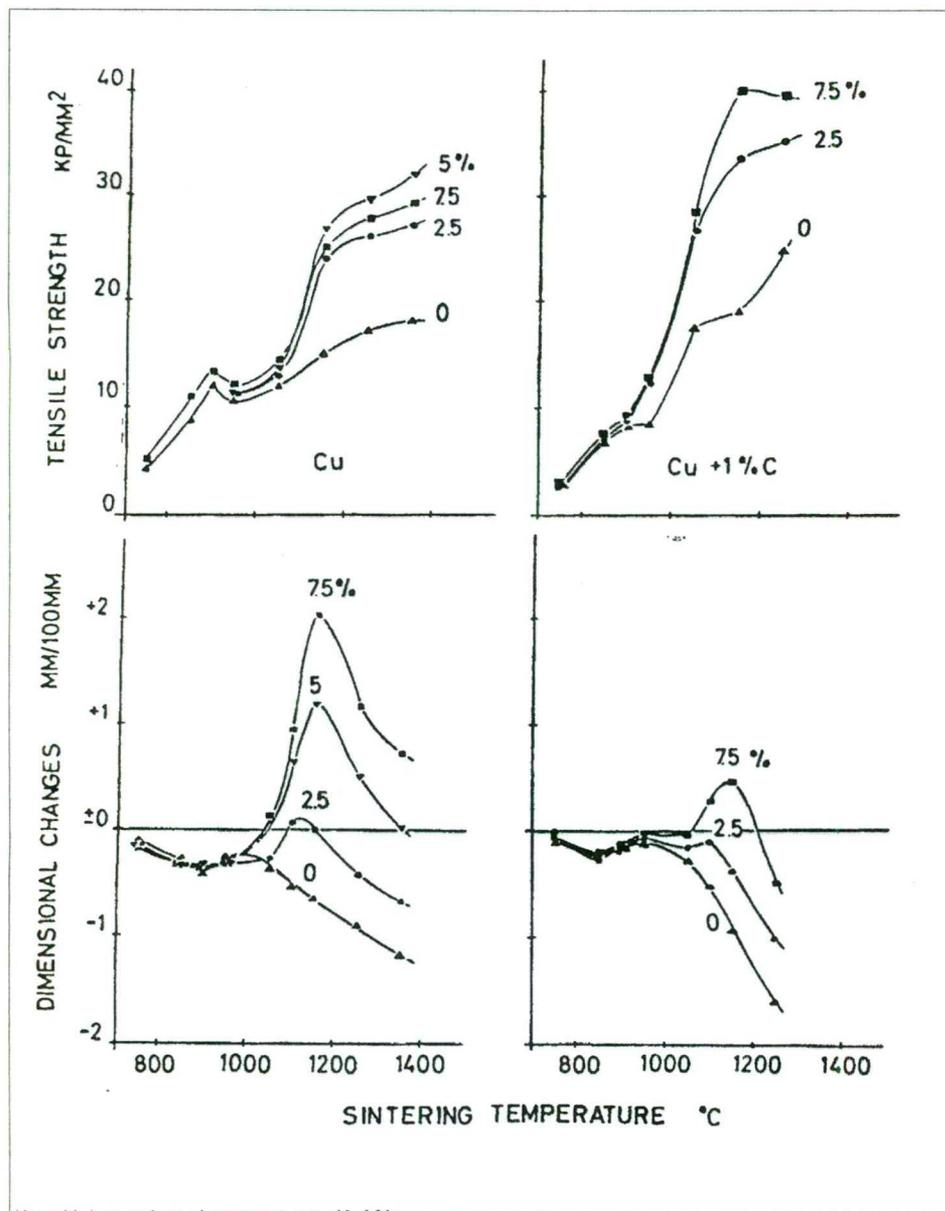
Fig. 27.- Mezcla de 90% en peso de Fe y 10% en peso de Cu, cuando sinteriza a una temperatura alrededor del punto de fusión del cobre (1086°C), puede verse que el cobre líquido no solo se infiltra por entre los espacios de las partículas de hierro, sino también por los límites de grano.

### *Mezclas de polvos de fierro-cobre y fierro-cobre-carbono*

Para aprovechar las ventajas de tener una fase líquida transitoria durante el sinterizado y obtener mejores propiedades de esfuerzo, muchas mezclas de polvos comerciales contienen cobre. Adiciones de cobre en polvos de fierro pueden producir un crecimiento dimensional indeseable durante el sinterizado.

Adiciones de grafito a la mezcla de polvo de fierro-cobre, contrarresta el crecimiento dimensional ocasionado por el cobre. La carburación del fierro causado por la adición del grafito aumenta el esfuerzo mecánico de las piezas sinterizadas.

La influencia de la adición de cobre y grafito sobre el esfuerzo a la tensión y los cambios dimensionales logrados a diferentes temperaturas de sinterizado se pueden ver en el diagrama de la fig. 28. Durante el sinterizado, aproximadamente el 0.2% de grafito se perdió debido a la atmósfera en forma de monóxido de carbón (CO), y la microestructura del carbón después del sinterizado fue perlítica.



\*Fig. 28.- Influencia de la adición de cobre y grafito y de la temperatura de sinterizado sobre el esfuerzo a la tensión y cambios dimensionales de un fierro sinterizado (NC100.24, densidad en verde de 6.3 g/cc, sinterizado 1 hr. en H<sub>2</sub>), a las temperaturas indicadas.

\*HANDBOOK 2, PRODUCTION OF SINTERED COMPONENTS, CHAPTER 6, SINTERING, PAG. 6.24

### *Composición de atmósferas protectoras dentro del sinterizado.*

El propósito principal de la atmósfera es proteger los polvos compactados de la oxidación durante el sinterizado y de reducir los óxidos residuales en la superficie a fin de mejorar el contacto metálico entre las partículas de polvo. Así como proteger el contenido de carbón para evitar una decarburación.

### *Problemática general*

Hay tres tipos de atmósferas que son:

- Hidrógeno.-  $H_2$ , craqueando amoniaco (75%  $H_2$ , 25%  $N_2$ )
- Endogas, (32%  $H_2$ , 23%  $CO$ , 0-0.2%  $CO_2$ , 0-0.5%  $CH_4$ )
- Neutra.- nitrogeno.

Aparte de las consideraciones económicas, las hay técnicas y termodinámicas que complican la elección y el control de la atmósfera apropiada.

a) Los problemas técnicos provienen de la conexión con el control apropiado de la velocidad de flujo y dirección del mismo de la atmósfera del horno de sinterizado. En un horno continuo de diseño moderno, para el sinterizado de las piezas de polvo de hierro, generalmente consiste de cuatro zonas que sirven a diferentes propósitos:

- 1.- Zona de precalentamiento, donde el lubricante (contenido en el compactado) se quema entre los 250 y 700°C.
- 2.- zona caliente, donde las piezas de polvo de hierro se sinterizan a 1120-1150°C.
- 3.- zona de carburizado, donde la superficie decarburada de las piezas pueden ser recarburadas a 800-900°C (en la empresa SINTERMEX se cuenta con cuatro hornos, los cuales no cuentan con esta zona) y
- 4.- zona de enfriamiento, donde las piezas sinterizadas se enfrían en forma gradual a 250-150°C, antes de ser expuestas al aire,

En la fig. 29 se muestra esquemáticamente los cuatro pasos anteriores, cada una de las zonas requiere de la combinación específica de velocidad de flujo, dirección del flujo y composición de la atmósfera.

b) Los problemas termodinámicos provienen de las circunstancias de la atmósfera de sinterizado en cambio de composición con la temperatura. Por ejemplo; el cambio de carácter de endogas cambia con un aumento de temperatura de carburización a decarburización y el carácter de hidrógeno (con trazas de vapor de agua) cambia con una disminución de la temperatura de reducción a oxidación. Además, la atmósfera cambia su composición mientras reacciona con las piezas sinterizadas. La reducción de óxidos residuales enriquece la atmósfera con vapor de agua; la decarburación del material sinterizado enriquece la atmósfera con monóxido de carbono.

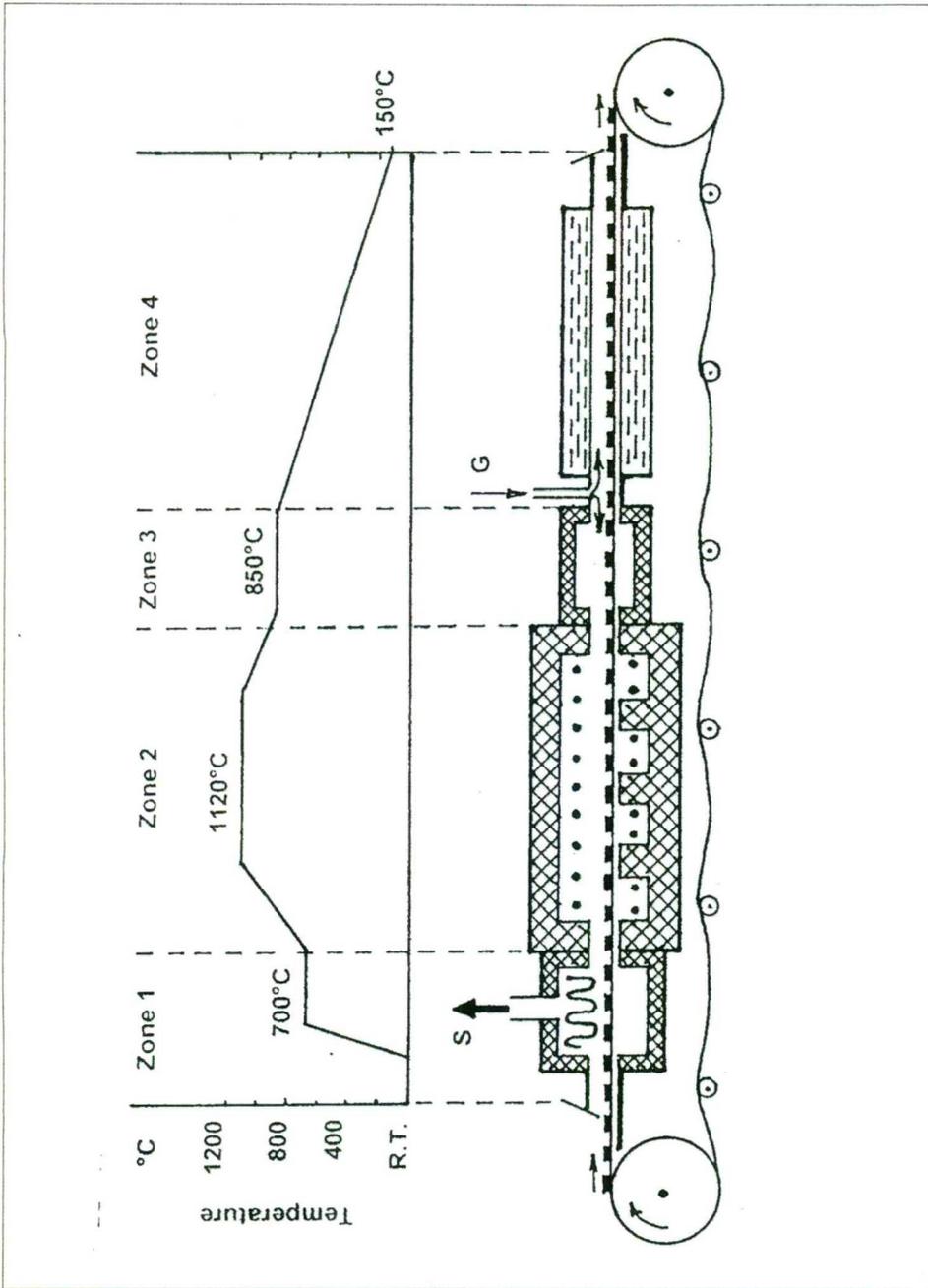
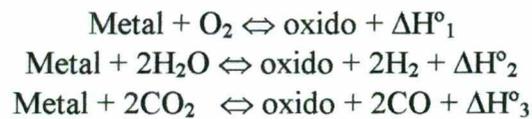


Fig. 29 .- Zonas de un horno continuo

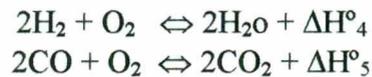
### *Proceso termodinámico durante el sinterizado*

Las atmósferas de sinterizado contienen, generalmente en varias proporciones los siguientes componentes: N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O (vapor), C (ollin), CO, CO<sub>2</sub> ( y en algunos casos también CH<sub>4</sub> o propano). Dependiendo de la proporción de estos componentes, la atmósfera puede ser reductora, oxidante, carburizada, decarburizada o neutra.

- Oxidación y reducción.- la reducción de metales u oxidación en atmósferas de sinterizado puede suceder por cualquiera de las siguientes tres reacciones:



Las reacciones correspondientes que toman lugar entre el H<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O entre CO y CO<sub>2</sub> :



las  $\Delta H^\circ$  son la cantidad de calor disipado (por mol de O<sub>2</sub>) en la reacción de oxidación.

### *Atmósferas industrialmente*

Dependiendo las condiciones, el tipo de material a ser sinterizado y las consideraciones económicas que gobiernan la selección de una atmósfera de sinterizado adecuada. La selección correcta es de gran importancia no solo para lograr una producción óptima de calidad sino también por la economía.

### *Hidrógeno y amoníaco craqueado*

Hidrógeno puro o producido criogenicamente, es una de las atmósferas más producidas para sinterizar piezas de hierro libre de carbón. En general, sin embargo, esto no es económico, excepto en la combinación de un alto precio del producto tales como partes de acero inoxidable.

Un excelente sustituto para el hidrógeno puro es el amoníaco craqueado , el cual consiste de 75% H<sub>2</sub> y 25% N<sub>2</sub>. La fuerte acción reductora de esta mezcla de gases es favorable para eliminar muchos problemas en la producción y rinde una alta calidad y sinterizado en el producto.

A causa de su fuerte acción de decarburar, ni el hidrógeno puro ni el amoníaco craqueado pueden ser usados en el sinterizado de piezas de polvo de fierro que contengan carbón

El hidrógeno y amoníaco craqueado forman una mezcla explosiva con el aire. Así que, el sinterizado con estos gases solo puede ser conducido en hornos equipados con una mufla ajustadora de gas y con cámaras "selladas" o cerradas.

### *Endogas*

Es relativamente económico producir este tipo de atmósferas utilizando un generador especial por medio de combustion incompleta de una mezcla de gas y aire, usando un catalizador. Los gases comunes de combustible son; metano, propano o gas natural. El producto de combustión contiene hidrógeno, agua, monóxido de carbono, dióxido de carbono, nitrógeno y metano. Esta composición varía con la proporción aire/combustible y puede ser reductora, carburizada, decarburizada, inerte o algo oxidante.

En el endogas, hay interacciones muy complejas entre los gases componentes. La temperatura varía a lo largo del ciclo de sinterizado, y la composición del gas cambia debido a reacciones con óxidos residuales o mezclas de grafito.

### *Nitrógeno*

Compactados hechos con mezclas de fierro y grafito pueden ser muy bien sinterizados en nitrógeno. La presencia de grafito en el compacto reacciona con óxidos residuales en los polvos de fierro y con aire filtrado, produce suficiente reducción y condiciones de carburizado dentro del horno. Si es necesario, la acción reductora de esta atmósfera puede ser controlada inyectando cantidades muy pequeñas de hidrógeno dentro de la zona caliente en el horno.

Correspondientemente, esta acción carburizante puede ser controlada por la inyección en muy pequeñas cantidades de gas metano dentro de la zona de recarburizado dentro del horno. El nitrógeno, aunque siendo algo más caro, tiene varias ventajas sobre el endogas.

El nitrógeno no es venenoso, ni produce mezclas explosivas con el aire, no reacciona con los elementos calentadores o ninguna otra parte del horno. Así, el sinterizado con nitrógeno puede conducirse dentro de los hornos sin la mufla ajustadora de gas.

### *Control de atmósferas de sinterizado*

La composición de las atmósferas de sinterizado debería ser monitoreada, no solo en una zona, sino en las diversas zonas que componen el horno. Los puntos interesantes donde se pueden realizar estos sondeos son:

- Después del generador del gas (o tanque de almacenaje)
- Dentro de la zona de recarburizado
- En el punto donde la temperatura alcanza su punto máximo dentro del horno

De todo lo anterior es evidente que las dos propiedades más importantes de la atmósfera de sinterizado son; el punto de rocío ( $P_{H_2O}/P_{H_2}$ ) y el potencial de carbón ( $P_{CO_2}/P_{CO}$  y  $P_{CH_4}/P_{H_2}$ ).

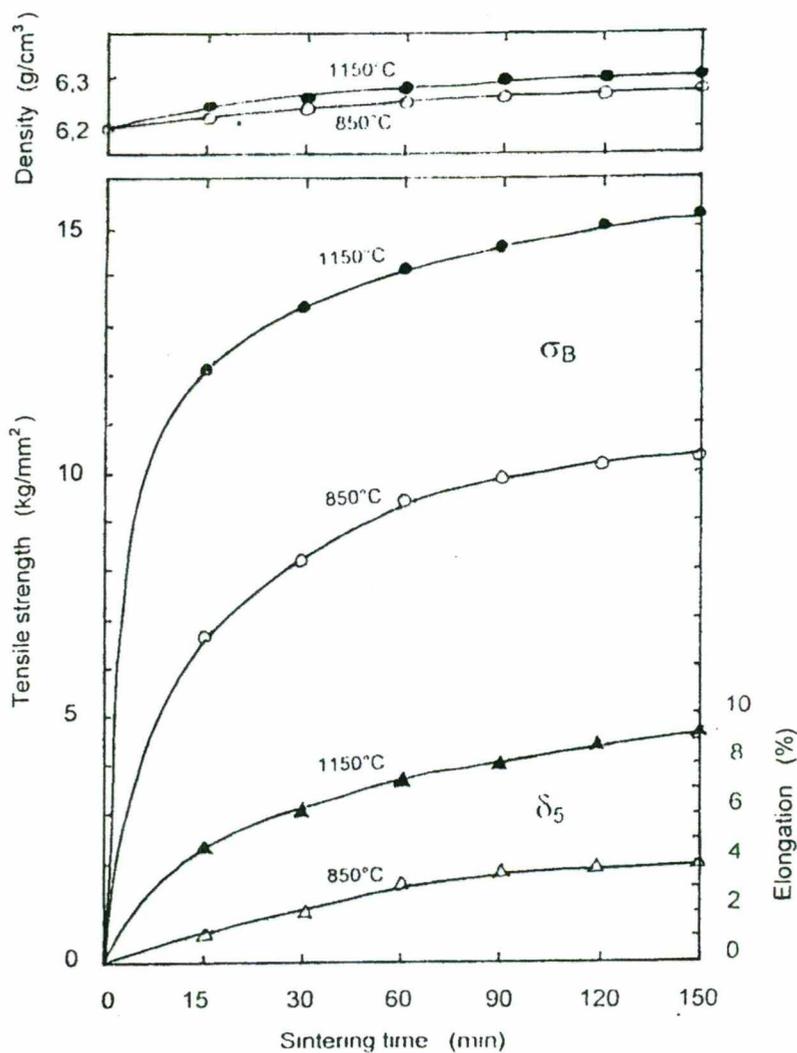
### *Tiempo y temperatura*

La alta temperatura de sinterizado, los cortos tiempos de sinterizado requeridos para obtener el grado de enlazamiento deseado entre las partículas de polvo dentro de un compactado.

Esto constituye un dilema; desde un punto de vista de eficiencia de producción, cortos tiempos de sinterizado pueden ser preferidos, pero le corresponde una alta temperatura de sinterizado, esto es menos económico por el alto costo de mantenimiento de los hornos.

Un polvo de fierro, comúnmente sinteriza en condiciones de 15-60 min. a 1120-1150°C.

La influencia de tiempo y temperatura de sinterizado sobre la densidad, esfuerzo a la tensión y elongación de un polvo de fierro compactado se pueden apreciar en la gráfica 30. En donde el esfuerzo a la tensión y la elongación se incrementa rápidamente durante los primeros minutos de sinterizado pero más y más despacio continua el sinterizado, mientras la densidad se incrementa solo moderadamente sobre los rangos y tiempos de sinterizado.



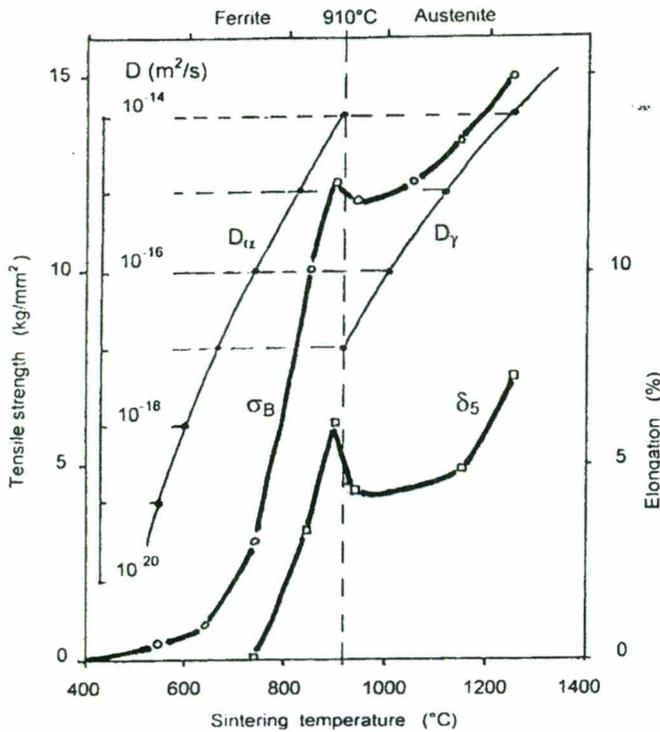
\*Fig. 30.- Esfuerzo a la tensión, elongación y densidad de un hierro sinterizado (MH 100.24) en función del tiempo de sinterizado a dos diferentes temperaturas.

Del diagrama de la figura 31, se obtienen dos características aparentemente importantes:

- El esfuerzo a la tensión y la elongación toman sus primeros valores al sinterizar a temperaturas alrededor de 650-750°C respectivamente. Por esto, el incremento casi exponencial hasta alcanzar un máximo de aproximadamente 900°C, justo alrededor de los 910°C, donde la estructura cristalina del hierro cambia de ferrita a austenita, los

valores del esfuerzo a la tensión y elongación repentinamente comienzan a decrecer otra vez, pero más despacio por debajo de los 910°C.

- La dependencia de la temperatura de el coeficiente de difusión de hierro, ilustrado en el mismo diagrama para comparar, baja dramáticamente, de ferrita cambia a austenita.



\*Fig. 31.- Esfuerzo a la tensión y elongación de un hierro sinterizado (NC100.24, densidad 6.3 gr/cc, sinterizado 1 hr. en H<sub>2</sub>), y su coeficiente de difusión del hierro esta en función de la temperatura de sinterizado.

Finalmente podemos decir que los puntos tratados en todos los párrafos anteriores son, como lo indica el título del mismo, la parte fundamental y necesaria para entender como es que se lleva a cabo el proceso, en donde a partir de una mezcla de polvos que cumplen ciertas propiedades se pueden obtener piezas automotrices sinterizadas. Las cuales después de salir del horno de sinterizado, pueden ser sometidas a procesos secundarios dependiendo del tipo de pieza.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Una de las piezas que se fabrican en la empresa SINTERMEX mostraba un crecimiento que sobrepasaba las dimensiones permitidas, por lo que se tuvo que trabajar con esta pieza para tratar de encontrar las condiciones a las cuales se pudiera producir sin que tuviera que ser sometida a un proceso de recompactación.

La pieza automotriz con la que se trabajo es una placa, la cual se muestra a continuación y a la cual nos vamos a referir de acuerdo al código establecido por la empresa.

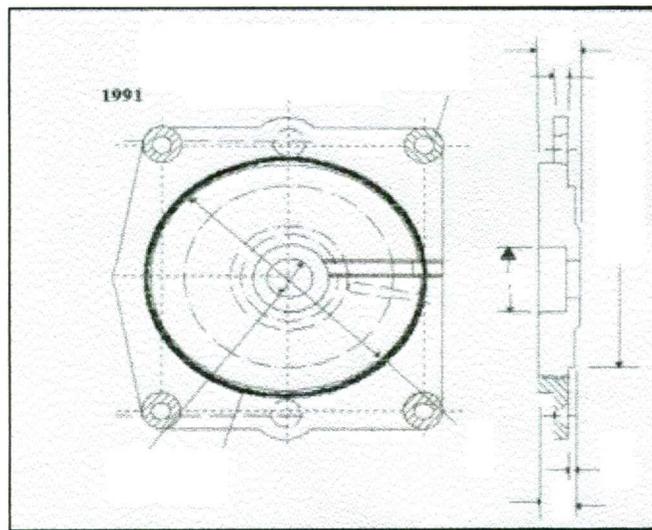


Fig. 32.- Pieza placa No. SX. 1991

Las características a las cuales se fabrico la pieza son las siguientes:

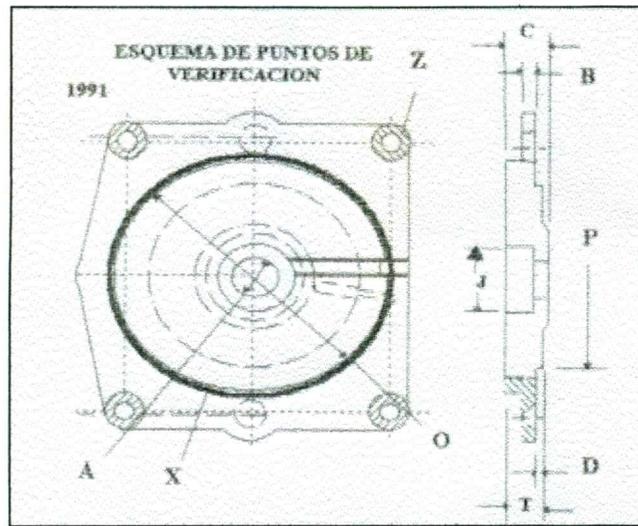


Fig. 33.- Puntos que se verifican en la pieza

PUNTOS DE VERIFICACION	
A DIAMETRO INTERIOR	J DIAMETRO PILOTO
B ESPESOR	K DISTANCIA AL CENTRO
C ALTURA	L, M y N DISTANCIA ENTRE CENTROS
D ESCALON	O y P DIAMETRO
E DIST. ENTRE CENTROS	Q DIAMETRO
G DIST. ENTRE CENTROS	R DIAMETRO DE BARRENOS (2)
H DIST. ENTRE CENTROS	Z y X ZONAS DE VERIFICACION
I DIAMETRO DE BARRENOS (4)	T ESCALON

### MEZCLADO

No. SX: 1991  
 CODIGO DE MEZCLA: F1 - 1C3 - 0.2G2 - 1L1  
 TIEMPO DE MEZCLADO: 15 minutos  
 DENSIDAD: 6.0 gr/cc

COMPOSICION SEGÚN CODIGO DE MEZCLA

No.	MATERIAL	CODIGO	PORCENTAJE
1	ANCOR MH-100	F1	97.80
2	COBRE GRADO – 165C DE ALCAN	C3	1.00
3	GRAFITO PM-9 DE ASBURY GRAPHITE MILLS		0.20
4	ESTEARATO DE ZINC LUBRAZINC W S/F DE WITCO		1.00
			100.00 %

PRENSADO

VALORES A CONTROLAR	ESPECIFICADO	
	MIN.	MAX.
PESO	487.00	495.00
ESPEJOR "B"	4.445	4.699
ALTURA TOTAL "C"	12.450	12.950
ESCALON "T"	10.926	11.425
DENSIDAD ESPEJOR	6.00	6.400
DENSIDAD TOTAL	6.00	6.400

SINTERIZADO

CONDICIONES PARA EL HORNO:	H-DREVER II
PRECALENTAMIENTO RBO	650°C ± 20°
ZONA SINTERIZADO 1 y 2	1150°C ± 20°
VEL. BANDA	7.00 cm/min

No.	VALORES A CONTROLAR	ESPECIFICADO	
		MINIMO	MAXIMO
1	DIAMETRO "O"	85.496	85.623
2	DIAMETRO "P"	69.443	69.570

## INSPECCION FINAL

No.	VALORES A CONTROLAR	ESPECIFICADO	
		MINIMO	MAXIMO
1	DIAMETRO INTERIOR "A"	14.275	14.529
2	DIAMETRO PILOTO "J"	29.642	29.924
3	DIAMETRO "O"	85.496	85.623
4	DIAMETRO "P"	69.444	69.571
5	ESPESOR "B"	4.445	4.699
6	ALTURA TOTAL "C"	12.446	12.954
7	ESCALON "T"	10.922	11.430
8	ESCALON "D"	2.057	2.286
9	PLANITUD EN ZONAS "Z"		0.381
10	CONCENTRICIDAD DE "A" VS "J"		0.102
11	CONCENTRICIDAD DE "A" VS "O"		0.102
12	CONCENTRICIDAD DE "A" VS "P"		0.102

Después de que la pieza salió de la etapa de sinterizado se realizó la inspección final, donde se observó que la pieza no estaba dentro de los límites establecidos para el crecimiento dimensional. Por lo que se tenía que buscar una solución.

## DESARROLLO EXPERIMENTAL

Como la mezcla utilizada para las primeras piezas no era la más indicada, debido a que el crecimiento de las mismas no podía ser controlado, lo primero que se tuvo que hacer fue preparar otro tipo de mezclas, someterlas a todas las pruebas necesarias y ver su comportamiento y sus cambios dimensionales al final del sinterizado. Esto fue después de que se probaron diferentes condiciones de sinterizado con la mezcla original (F1- 1C3- 0.2G1- 1L1) , sin lograr resultados positivos.

Una vez que se tuvieron resultados de las pruebas realizadas, se analizaron y vio en cual de las mezclas es que se podía controlar el crecimiento de las piezas y que estuvieran dentro de los parámetros marcados; en el caso de que los resultados obtenidos no fueran los esperados se debe hacer un análisis de los mismos y decir el porque no se obtuvieron los datos esperados.

### MEZCLADO

Después de un análisis del problema y en base a la teoría (fundamentos) presentada se prepararon las dos siguientes mezclas, las cuales se prepararon cambiando principalmente el tipo de hierro utilizado en la mezcla anterior para saber de que manera se comportaban durante el proceso de sinterizado y si realmente se podría disminuir el crecimiento dimensional de las piezas.

Mezcla A: F6 – 1C3 – 0.2G2 – 1L1

#### COMPOSICION

No.	MATERIAL	CODIGO	PORCENTAJE
1	ATOMET 1001 DE QMP	F6	97.80
2	COBRE GRADO – 165C DE ALCAN	C3	1.00
3	GRAFITO PM-9 DE ASBURY GRAPHITE MILLS	G2	0.20
4	ESTEARATO DE ZINC LUBRAZINC W S/F DE WITCO	L1	1.00
			100.00 %

Se pesaron cada uno de los polvos que componen la mezcla para tener un total de 100 gr., después se mezclan.

Tiempo de mezclado: 15 min.

Después de que están bien mezclados los polvos, se determina su volumen de relleno, de la siguiente manera:

Los 100 gr. de la mezcla se hicieron pasar por medio de un embudo metálico para que el polvo caiga dentro de una probeta graduada. Cuando todo el polvo a pasado a través del embudo, con mucho cuidado se toma la lectura, es decir, el volumen ocupado por 100 gr. polvo.

Volumen de relleno: 31.00 gr/cc

Mezcla B: F6 – 48.3F3 – 1C3 – 0.2G2 – 1L1

## COMPOSICION

No.	MATERIAL	CODIGO	PORCENTAJE
1	ATOMET 1001 DE QMP	F6	49.50
2	ATOMET 28 DE QMP	F3	48.30
3	COBRE GRADO - 165C DE ALCAN	C3	1.00
4	GRAFITO PM-9 DE ASBURY GRAPHITE MILLS	G2	0.20
5	ESTEARAZO DE ZINC LUBRAZINC W S/F DE WITCO	L1	1.00
			100.00 %

Tiempo de mezclado: 15 min.

Volumen de relleno : 31.50 gr/cc

Ya que se tiene un buen mezclado y teniendo especificado el volumen de relleno, el siguiente paso fue la compactación.

### COMPACTACION

En esta etapa se utilizó la máquina universal de ensayos y se tuvo que buscar una carga a la cual se obtuvieran tres cilindros con una densidad de 6.30 gr/cc y otros tres con una densidad de 6.35 gr/cc, así también, se tuvo que calcular el spring back.

Para esto, se pesan 7 gr. de la mezcla (que es la capacidad aproximada de la matriz), los cuales se introducen dentro de una matriz y se comienzan hacer pruebas entre los 3150-3180 kg de carga (se realizaron a estas cargas porque en pruebas anteriores entre estas cargas se encontró una densidad cercana a las que se buscaban) para obtener las densidades a las cuales vamos a trabajar.

Para obtener la densidad de las barras se hace lo siguientes;

### Procedimiento para Cálculo de Densidades

- 1.- Cuando ya se tiene el compactado, lo primero que se hace es pesarlo ( $W_{\text{seco}}$ )
- 2.- Enseguida el cilindro se sumerge en una bomba de vacío que contiene aceite y se deja por unos cuantos minutos. Lo que pasa en este paso es que, el aire que se encuentra dentro de los poros del compactado se elimina, tomando su lugar el aceite, es decir, tapando los poros.
- 3.- Se elimina el exceso de aceite con un trapo y se pesa ( $W_{\text{aceite}}$ )
- 4.- Después se mete en un recipiente lleno de agua que esta conectado con la balanza analítica ( $W_{\text{agua}}$ ) (principio de Arquimides)
- 5.- Con los datos anteriores se calcula la densidad de la pieza, la fórmula es;

$$\rho = (W_{\text{seco}}) / (W_{\text{aceite}} - W_{\text{agua}})$$

Antes de que los cilindros pasen al sinterizado, con un micrómetro se mide el diámetro, la altura y el spring back.

## Resultados de la Compactación y Spring Back

BARRA	W SECO	W ACEITE	W AGUA	D. VERDE	ALT. VERDE	SPRING BACK
6A	7	7.03	5.92	11.301	10.941	0.257
9A	7	7.04	5.93	11.301	11.14	0.257
11A	7	7.04	5.93	11.298	11.103	0.23
8A	6.99	7.03	5.93	11.299	11.05	0.239
12A	7	7.03	5.93	11.294	11.897	0.195
13A	7	7.03	5.93	11.294	11.94	0.195
4B	6.95	6.99	5.89	11.296	11.947	0.212
5B	6.99	7.02	5.91	11.296	10.987	0.212
6B	6.99	7.02	5.91	11.295	10.988	0.212
1B	6.98	7.01	5.91	11.296	10.999	0.212
2B	7	7.02	5.92	11.297	11.015	0.221
3B	7	7.03	5.93	11.296	11.032	0.212

Por último se llevan a sinterizar, en un horno de banda marca Drever, que trabaja con una atmósfera del tipo endogas y al terminar esta etapa se calcula el crecimiento de las piezas.

$$\% \text{ Crecimiento} = (D_d/D_v) * 100$$

$D_d$  = diferencia de los diámetros mínimos y máximos obtenidos en el sinterizado

$D_v$  = diámetro en verde

A continuación se presentan los resultados de las dos densidades de las diferentes mezclas:

PRUEBAS DE % CRECIMIENTO EN SINTERIZADO											0.044%	
SX: 1991											0.132%	
MEZCLA "A"											% CREC. MIN.	% CREC. OBT.
DENSIDAD	PRENSADO	6.30									% CREC. MAX.	0.044%
NO. SX.	FECHA	HORNO	TEMP. RBO	SINT. ZONA 1	SINT. ZONA 2	VEL. BANDA	CARACTERISTICA	OBT. PREH.	OBT. SINT. MIN.	OBT. SINT. MAX.	DIFERENCIA	% CREC. OBT.
1991	040358	DREYER II	650°	1120°	1120°	12.5 CM/MIN	DIAM. MUESTRA 6A	11.301	11.31	11.326	0.016	0.132%
							DIAM. MUESTRA 9A	11.301	11.32	11.326	0.005	0.044%
							DIAM. MUESTRA 11A	11.288	11.315	11.326	0.010	0.088%
							DIAM. MUESTRA 8A	11.289	11.32	11.33	0.010	0.088%
							DIAM. MUESTRA 12A	11.294	11.32	11.328	0.008	0.071%
							DIAM. MUESTRA 13A	11.294	11.32	11.326	0.006	0.044%

PRUEBAS DE % CRECIMIENTO EN SINTERIZADO											0.044%	
SX: 1991											0.088%	
MEZCLA "B"											% CREC. MIN.	% CREC. OBT.
DENSIDAD	PRENSADO	6.30									% CREC. MAX.	0.088%
NO. SX.	FECHA	HORNO	TEMP. RBO	SINT. ZONA 1	SINT. ZONA 2	VEL. BANDA	CARACTERISTICA	OBT. PREH.	OBT. SINT. MIN.	OBT. SINT. MAX.	DIFERENCIA	% CREC. OBT.
1991	040358	DREYER II	650°	1120°	1120°	12.5 CM/MIN	DIAM. MUESTRA 4B	11.286	11.3	11.31	0.010	0.088%
							DIAM. MUESTRA 6B	11.286	11.3	11.31	0.010	0.088%
							DIAM. MUESTRA 6B	11.286	11.3	11.305	0.005	0.044%
							DIAM. MUESTRA 1B	11.286	11.298	11.305	0.007	0.062%
							DIAM. MUESTRA 2B	11.297	11.295	11.305	0.010	0.088%
							DIAM. MUESTRA 3B	11.286	11.3	11.308	0.008	0.071%

## Análisis de Resultados

Como se puede apreciar en las tablas anteriores, la mezcla B, nos proporciona un control de crecimiento menor que el de la mezcla A, por lo tanto, se realizaron pruebas para la pieza 1991 con la mezcla B para observar que resultados se obtienen.

A continuación se presentan algunos de los formatos que se utilizan durante una parte del desarrollo para la fabricación de una pieza.

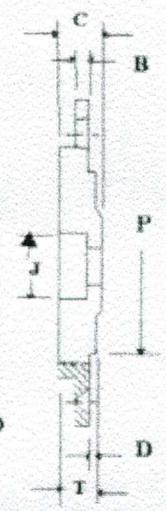
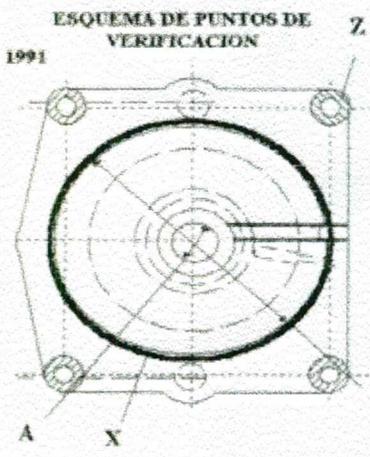
		<b>HOJA DE OPERACION E INSTRUCCION DE INSPECCION</b>	
		<b>No. SX</b>	<b>1991</b>
<b>MEZCLADO</b>		<b>PIEZA No. CLIENTE</b>	5473592
		<b>ESPECIFICACION MATERIAL</b>	DUREX 60
		<b>DENSIDAD gr / cm<sup>3</sup></b>	6.0 GR/CC MIN.
<b>DR. PARA MAQUINA</b>		650 - T	<b>CODIGO DE MEZCLA</b>
<b>VOLUMEN DE RELLENO ( gr. / cm<sup>3</sup> )</b>		31.50 ± 0.25	F6 - 48.3 F3 - 1C3 - 0.2G2 - 1L1
		<b>PESO grs.</b>	491.00 ± 4.00
<b>COMPOSICION</b>			
No.	MATERIAL	CODIGO	PORCENTAJE
1	ATOMET 1001 DE Q M P	F6	49.50%
2	ATOMET 28 DE Q M P	F3	48.30%
3	COBRE GRADO - 165C DE ALCAN	C3	1.00%
4	GRAFITO PM-9 DE ASBURY GRAPHITE MILLS	G2	0.20%
5	ESTERATO DE ZINC LUBRANZINC W S/F DE WITCO	L1	1.00%
6			
			100.00%
<b>ORDEN DE INTEGRACION DE MEZCLADOR:</b> F6 - 48.3 F3 - 1C3 - 0.2G2 - 1L1			
<b>TIEMPO DE MEZCLADO:</b> 15 MINUTOS			

SINTERMEX S. A. DE C. V.

## HOJA DE INICIO DE OPERACION

<b>OPERACION:</b> <b>PRENSADO</b>		<b>MAQUINA</b>		<b>No. SX</b>		<b>1991</b>	
		<b>CONTADOR</b>		PIEZA No. CLIENTE	5473592		
		<b>FECHA</b>		ESPECIFICACION MATERIAL	DUREX 60		
<b>CLIENTE</b>		DELPHI CHASSIS SYSTEM		DENSIDAD $\rho$ / cm <sup>3</sup>	6.0 GR/CC MIN.		
<b>DESCRIPCION</b>		CAP-HYDRAULIC POWER HEAD		CATEGORIA DE MUECCLA	F6-48.3 F3-1C3-0.2G2-1L1		
Nº	DESCRIPCION DE VALORES A CONTROLAR	HERRAMIENTA DE CONTROL	ESPECIFICACION		OBTENIDO		
			MIN.	MAX.	MIN.	MAX.	
1	PESO ( *** ) ( ### )	BASCULA DIGITAL	467.000	495.000			
2	ESPESOR " B " ( *** ) ( ### )	INDICADOR ( 0 - 20 )	4.445	4.899			
3	ALTURA TOTAL " C " ( *** ) ( ### )	INDICADOR ( 0 - 20 )	12.450	12.950			
4	ESCALON " T " ( *** ) ( ### )	INDICADOR ( 0 - 20 )	10.926	11.426			
5	DENSIDAD TOTAL	LABORATORIO	6.500	6.400			
6	DENSIDAD ESPESOR	LABORATORIO	6.000	6.400			
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							

APROBACION INICIO DE OPERACION POR PARTE DEL AJUSTADOR		NOMBRE Y FIRMA	FECHA	ACEPTADO	RECHAZADO
16	DIAMETRO INTERIOR " A " ( ### )	MICRO INT ( 16 - 20 )	14.400	14.440	
17	DIAMETRO PILOTO " J " ( ### )	MICRO INT ( 25 - 50 )	29.800	29.835	
18	DIAMETRO " O " ( ### )	MICRO EXT ( 50 - 100 )	85.520	85.550	
19	DIAMETRO " P " ( ### )	MICRO EXT ( 50 - 100 )	69.470	69.510	
20	CONCENTRICIDAD DE " A " VS " O "	MAQ. DE COORDENADAS		0.090	
21	CONCENTRICIDAD DE " A " VS " J "	MAQ. DE COORDENADAS		0.090	
22	CONCENTRICIDAD DE " A " VS " P "	MAQ. DE COORDENADAS		0.090	
23					
24					
25					



APROBACION POR PARTE DEL INSPECTOR	
INSPECTOR	
APROBADO	RECHAZADO
FECHA:	
<b>NOTA:</b>	
LAS CARACTERISTICAS DE 1 A 15 DEBERAN SER VALORADAS POR EL AJUSTADOR, Y LAS CARACTERISTICAS DEL 16 A 25 DEBERAN SER VALORADAS POR EL INSPECTOR	
PUNTOS DE VERIFICACION	
R - DIAMETRO INTERIOR	J - DIAMETRO PILOTO
G - ESPESOR	K - DISTANCIA AL CENTRO
C - ALTURA	L, M, y N - DIST. ENTRE CENTROS
D - ESCALON	O y P - DIAMETRO
E - DIST. ENTRE CENTROS	Q - DIAMETRO
Q - DIST. ENTRE CENTROS	R - Ø DE BARRENOS ( 2 )
H - DIST. ENTRE CENTROS	Z y X - ZONAS DE VERIFICACION
I - Ø DE BARRENOS ( 4 )	T - ESCALON

## HOJA DE OPERACION E INSTRUCCION DE INSPECCION

No. SX

1991

### PRENSADO

LOTE N°

CANTIDAD

FECHA

PIEZA No. CLIENTE 5473592

ESPECIFICACION MATERIAL DUREX 60

DENSIDAD  $gr/cm^3$  6.0 GR/CC MIN

CODIGO DE MEZCLA T6 - 48.3 P3 - 1C3 - 0.2C32 - 1L1

PESO  $grs.$  491.00 ± 4.00

CLIENTE  
DELPHI CHASSIS SYSTEM

DESCRIPCION CAP-HYDRAULIC POWER HEAD

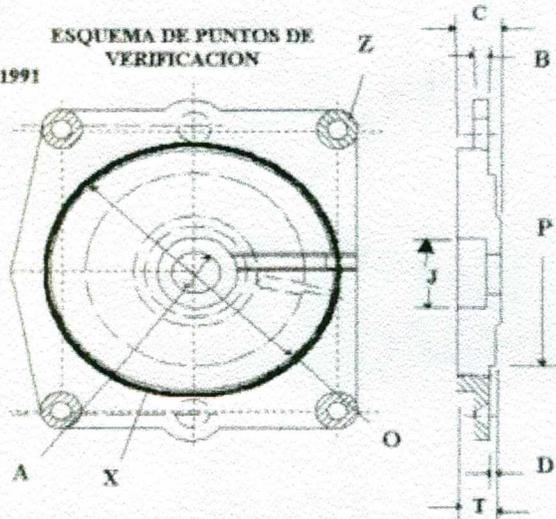
No.	VALORES A CONTROLAR	ESPECIFICADO		OBTENIDO		HERRAMIENTA DE CONTROL	FRECUENCIA DE CHEQUEO (PRODUCCION)
		MINIMO	MAXIMO	MINIMO	MAXIMO		
1	PESO (***)(###)	487.000	495.000			BASCULA DIGITAL	C / 30 MINUTOS
2	ESPESOR "B" (***)(###)	4.445	4.699			INDICADOR (0 - 20)	C / 30 MINUTOS
3	ALTURA TOTAL "C" (***)(###)	12.450	12.950			INDICADOR (0 - 20)	C / 30 MINUTOS
4	ESCALON "T" (***)(###)	10.226	11.426			INDICADOR (0 - 20)	C / 30 MINUTOS
5	DENSIDAD TOTAL	6.000	6.400			LABORATORIO	INICIO Y C/ AJUSTE
6	DENSIDAD ESPESOR	6.000	6.400			LABORATORIO	SOLO LIBREACION
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							
15							

**INSTRUCCIONES**

- (\*\*\*) LOS VALORES MARCADOS SON LIMITES DE ESPECIFICACION, Y DEBERAN CONTROLARSE ESTADISTICAMENTE.
- VERIFICAR DE 1 A 5 PIEZAS EN CADA INSPECCION O CHEQUEO, Y CON LA FRECUENCIA INDICADA.
- EVITAR AL MAXIMO REBASAS. LAS PIEZAS DEBEN IR AL 100% SIN FISURAS Y/O DESPRENDIMIENTOS DE MATERIAL. VERIFICACION VISUAL CONSTANTE.
- VERIFICAR QUE EL CODIGO DE LA MEZCLA SEA EL INDICADO, AL INICIO DE C/LOTE DE POLVO.
- LA DENSIDAD SE DEBERA CHECAR EN PRODUCCION, AL INICIO Y EN CADA AJUSTE (IGUALAR DENSIDADES).

ESQUEMA DE PUNTOS DE VERIFICACION

1991



PUNTOS DE VERIFICACION

A - DIAMETRO INTERIOR	J - DIAMETRO FILOTO
B - ESPESOR	K - DISTANCIA AL CENTRO
C - ALTURA	L, M, y N - DIST. ENTRE CENTROS
D - ESCALON	O y P - DIAMETRO
E - DIST. ENTRE CENTROS	Q - DIAMETRO
G - DIST. ENTRE CENTROS	R - Ø DE BARRENOS (2)
H - DIST. ENTRE CENTROS	Z y X - ZONAS DE VERIFICACION
I - Ø DE BARRENOS (4)	T - ESCALON

CONTROL DE LOTES

LAS CARACTERISTICAS MARCADAS CON (\*\*\*) SON VALORES A CONTROLAR POR EL INSPECTOR EN CADA LOTE Y LOS REGISTRARA EN CP EMITIENDO UN CRITERIO DE APROBACION O RECHAZO

SINTERMEX S. A. DE C. V.

## HOJA DE INICIO DE OPERACION

<b>OPERACION :</b> <b>SINTERIZADO</b>		<b>MAQUINA</b>	<b>No. SX      1991</b>			
		<b>CONTADOR</b>	PIEZA No. CLIENTE		5473592	
		<b>FECHA</b>	ESPECIFICACION MATERIAL		DUREX 60	
<b>CLIENTE</b>		DELPHI CHASSIS SYSTEM		DENSIDAD - gr/cm <sup>3</sup>		6.0 GR/CC MIN.
<b>DESCRIPCION</b>		CAP-HYDRAULIC POWER HEAD		CODIGO DE MEZCLA		F6 - 48.3 F3 - 1C3 - 0.2G2 - 1L1
Nº	DESCRIPCION DE VALORES A CONTROLAR	HERRAMIENTA DE CONTROL	ESPECIFICACION		OBTENIDO	
			MIN.	MAX.	MIN.	MAX.
1	DIAMETRO " O " ( ### )	MICRO EXT. ( 50 - 100 )	85.498	85.823		
2	DIAMETRO " P " ( ### )	MICRO EXT. ( 50 - 100 )	89.443	89.570		
3	DIAMETRO INTERIOR " A " ( ### )	MICRO INT. ( 16 - 20 )	14.274	14.528		
4	DIAMETRO PILOTO " J " ( ### )	MICRO INT. ( 25 - 50 )	29.841	29.921		

<b>SINTERIZADO</b>		<b>No. SX : 1991</b>			
<b>CLIENTE</b> DELPHI CHASSIS SYSTEM		PIEZA No. CLIENTE		5473592	
<b>DESCRIPCION</b> CAP-HYDRAULIC POW		ESPECIFICACION MATERIAL		DUREX 60	
		DENSIDAD - gr/cm <sup>3</sup>		6.0 GR/CC MIN.	
		CODIGO DE MEZCLA		F6 - 48.3 F3 - 1C3 - 0.2G2 - 1L1	
Nº	VALORES A CONTROLAR	ESPECIFICADO		HERRAMIENTA DE CONTROL	FRECUENCIA DE CHECKEO
		MINIMO	MAXIMO		
1	DIAMETRO " O " ( ### )	85.498	85.823	MICRO EXT. ( 50 - 100 )	INICIO Y C/A AJUSTE
2	DIAMETRO " P " ( ### )	89.443	89.570	MICRO EXT. ( 50 - 100 )	INICIO Y C/A AJUSTE
<b>CONDICIONES PARA EL HORNO</b>		H-DREVER II		<b>CONDICIONES PARA EL HORNO</b>	
PRECALENTAMIENTO RBO 850 °C		± 20°		± 20°	
ZONA SINTERIZADO 1 Y 2 1150 °C		± 20°		± 20°	
VEL. BANDA 7.0 CM / MIN					
<b>RESTRICCIONES:</b>					



**CERTIFICADO DE INSPECCION DIMENSIONAL**

INSPECCION FINAL		LOTE N°		No. SX <span style="float: right;">1991</span>			
		CANTIDAD					
		FECHA					
CLIENTE				PIEZA No CLIENTE 5473592			
DELPHI CHASSIS SYSTEM				ESPECIFICACION MATERIAL DUREX 60			
DESCRIPCION CAP-HYDRAULIC POWER HEAD				DENSIDAD gr / cm <sup>3</sup> 6.0 GR/CC MIN.			
				ULT. REV. PLANO 29 / 08 / 1995			
No.	VALORES A CONTROLAR	ESPECIFICADO		OBTENIDO		HERRAMIENTA DE CONTROL	FRECUENCIA DE CHEQUEO
		MINIMO	MAXIMO	MINIMO	MAXIMO		
1	DIAMETRO INTERIOR * A *	14.275	14.529			PASA NO PASA	200 C/LOTE
2	DIAMETRO PILOTO * J *	28.842	29.821			MAQ. DE COORDENADAS	200 C/LOTE
3	DIAMETRO * O *	85.496	85.823			MICRO EXT. ( 50 - 100 )	50 C/LOTE
4	DIAMETRO * P *	89.444	89.571			MICRO EXT. ( 50 - 100 )	50 C/LOTE
5	ESPESOR * B *	4.445	4.899			INDICADOR ( 0 - 20 )	50 C/LOTE
6	ALTURA TOTAL * C *	12.446	12.954			INDICADOR ( 0 - 20 )	50 C/LOTE
7	ESCALON * T *	10.822	11.430			INDICADOR ( 0 - 20 )	50 C/LOTE
8	ESCALON * D *	2.057	2.286			INDICADOR ( 0 - 20 )	50 C/LOTE
9	PLANITUD EN ZONAS * Z *		0.391			MAQ. DE COORDENADAS	10 C/LOTE
10	CONCENTRICIDAD DE * A * VS * J *		0.102			MAQ. DE COORDENADAS	10 C/LOTE
11	CONCENTRICIDAD DE * A * VS * O *		0.102			MAQ. DE COORDENADAS	10 C/LOTE
12	CONCENTRICIDAD DE * A * VS * P *		0.102			MAQ. DE COORDENADAS	10 C/LOTE
13							
14							
15							
16							
17							
18							
19							
20							
<b>PRUEBAS DE LABORATORIO</b>							
21	DENSIDAD TOTAL	6.000	6.400			LABORATORIO	2 C/LOTE
22							
23							
24							

Es necesario recordar el porqué se da el crecimiento de las piezas, y es debido a que cuando uno de los componentes de la mezcla funde a la temperatura de sinterizado, aparece una fase líquida que empieza a ser empujada por la fuerza capilar dentro de los huecos entre las partículas sólidas, creando una mayor área de contacto entre la fase líquida y sólida., eventualmente la fase líquida desaparece, el volumen aparente del compactado se dilata porque las partículas permiten que se comience a alargar los poros. Mientras que la estructura de las partículas del sólido incrementan su volumen correspondiente a la cantidad de la fase líquida disuelta.

Debido a que se tiene un mezcla de polvo de hierro-cobre-grafito, en la cual el cobre fundido penetra los límites de la fase entre la austenita y cementita, causando una desintegración parcial de la superficie de la partícula seguido por una contracción de la estructura originalmente rígida formado por las partículas de hierro. Este mecanismo contrarresta el crecimiento ocasionado por el cobre que difunde dentro de las partículas de hierro.

Adiciones de cobre en polvos de hierro pueden producir un crecimiento dimensional indeseable durante el sinterizado.

Adiciones de grafito a la mezcla de polvo de hierro-cobre, contrarresta el crecimiento dimensional ocasionado por el cobre. La carburación del hierro causado por la adición del grafito aumenta el esfuerzo mecánico de las piezas sinterizadas.

Antes de comenzar a experimentar con la pieza 1991, se tuvo que modificar el volumen de relleno, ya que la mezcla B tiene uno de 31.50gr/cc y se requiere uno de 35.00 gr/cc. ( el volumen de relleno de 35 gr/cc corresponde al volumen con que se trabaja en la compactación, es decir, es la cantidad que se requiere para llenar el dado, el cual ya estaba establecido debido a la mezcla anterior) para esto se le agrega polvo de hierro F4, el cual por sus características cumple con esta función de aumentar el volumen de relleno sin

afectar las propiedades de la mezcla, también se le cambia el lubricante de estearato de zinc a cera (bisteramida).

## **RESULTADOS**

A continuación se muestran nuevamente los resultados del crecimiento adimensional, pero ahora con las modificaciones hechas a la mezcla y que se efectuaron sobre la pieza 1991. En los cuales se puede apreciar que se logró un crecimiento mínimo del 0.011 % y un máximo de 0.058, lográndose con estos resultados que la pieza 1991 que sale de la etapa de sinterizado este dentro de los rangos establecidos.

MEZCLA "A" PA-1C3-208-11		PRUEBAS DE % CRECIMIENTO EN SINTERIZADO				SX. 1 3 3 1		% CREC. MIN.		% CREC. OBT.		
DENSIDAD PRENSADO		HORNO		VEL. BANDA		YEL. BANDA		OBT. SINT. MIN.		OBT. SINT. MAX.		
NO. SX.	FECHA	TEMP. REO.	SINT. ZONA 1	SINT. ZONA 2	VEL. BANDA	YEL. BANDA	CHARACTERISTICA	OBT. PREN.	OBT. SINT. MIN.	OBT. SINT. MAX.	DIFERENCIA	% CREC. OBT.
1991	04/03/88	660°	1120°	1120°	12.5 CM/MIN		DIAM. MUESTRA 6A	11.301	11.31	11.328	0.016	0.137%
							DIAM. MUESTRA 9A	11.301	11.32	11.328	0.006	0.044%
							DIAM. MUESTRA 11A	11.296	11.316	11.328	0.010	0.086%
							DIAM. MUESTRA 8A	11.299	11.32	11.33	0.010	0.089%
							DIAM. MUESTRA 12A	11.294	11.32	11.328	0.008	0.071%
							DIAM. MUESTRA 13A	11.294	11.32	11.328	0.008	0.044%

MEZCLA "B" FE-46-3FS-1CS-0.202-161		PRUEBAS DE % CRECIMIENTO EN SINTERIZADO				SX. 1 3 3 1		% CREC. MIN.		% CREC. OBT.		
DENSIDAD PRENSADO		HORNO		VEL. BANDA		YEL. BANDA		OBT. SINT. MIN.		OBT. SINT. MAX.		
NO. SX.	FECHA	TEMP. REO.	SINT. ZONA 1	SINT. ZONA 2	VEL. BANDA	YEL. BANDA	CHARACTERISTICA	OBT. PREN.	OBT. SINT. MIN.	OBT. SINT. MAX.	DIFERENCIA	% CREC. OBT.
1991	04/03/88	660°	1120°	1120°	12.5 CM/MIN		DIAM. MUESTRA 4B	11.296	11.3	11.31	0.010	0.086%
							DIAM. MUESTRA 6B	11.296	11.3	11.31	0.010	0.086%
							DIAM. MUESTRA 6B	11.296	11.3	11.306	0.006	0.044%
							DIAM. MUESTRA 1B	11.296	11.296	11.306	0.007	0.062%
							DIAM. MUESTRA 2B	11.297	11.296	11.306	0.010	0.086%
							DIAM. MUESTRA 3B	11.296	11.3	11.306	0.008	0.071%

MEZCLA "C" FE-46-3FS-1CS-0.202-163		PRUEBAS DE % CRECIMIENTO EN SINTERIZADO				SX. 1 3 3 1		% CREC. MIN.		% CREC. OBT.		
DENSIDAD PRENSADO		HORNO		VEL. BANDA		YEL. BANDA		OBT. SINT. MIN.		OBT. SINT. MAX.		
NO. SX.	FECHA	TEMP. REO.	SINT. ZONA 1	SINT. ZONA 2	VEL. BANDA	YEL. BANDA	CHARACTERISTICA	OBT. PREN.	OBT. SINT. MIN.	OBT. SINT. MAX.	DIFERENCIA	% CREC. OBT.
1991	17/03/88	660°	1120°	1120°	12.5 CM/MIN		DIAMETRO "O"	66.564	66.619	66.628	0.009	0.011%
							DIAMETRO "P"	66.525	66.502	66.542	0.040	0.069%

## CONCLUSIONES

La primera mezcla que se utilizó para fabricar la pieza no. 1991, era una mezcla de F1 – 1C3 – 0.2G1 – 1L1 que es diferente a las dos mezclas de prueba, las cuales fueron; F6 – 1C3 – 0.2G2 – 1L1 y F6 – 48.3F3 - 1C3 – 0.2G2 – 1L1, mezcla A y B respectivamente.

La primera diferencia entre la mezcla de la pieza y las de prueba es el cambio de hierro F1 a F6. El F1 es un polvo de hierro esponja y el F6 es un polvo de hierro atomizado en agua, por lo que el F6 tiene una mayor área de contacto que el F1 y por lo tanto se tienen mayores cualidades de sinterizado, así como características uniformes del producto final, además de que el polvo F6 tiene una mayor densidad aparente, densidad en verde y un cambio dimensional de  $\pm 0.05\%$ , sin embargo el polvo F1 tiene una mayor fluidez y mayor resistencia en verde.

Un segundo cambio es el de grafito G1 por grafito G2, que es un cambio importante pero no tanto como el del polvo de hierro, tanto el cobre como el lubricante son los mismos.

Enfocándonos ahora a las mezclas de prueba A y B, encontramos que en la mezcla B se tiene una combinación de dos polvos de fierros, los cuales son, el F6 y el F3 que es un polvo de hierro reducido y por lo tanto la forma de sus partículas es del tipo esponja al igual que el F1 pero con mayor densidad en verde y densidad aparente, un cambio dimensional de  $\pm 0.05$ , pero con menor resistencia en verde y fluidez, sin embargo, la combinación de los polvos de hierro mejoran las propiedades de la mezcla y por lo tanto del producto final.

Ahora, un elemento muy importante es el cobre, ya que este causa el crecimiento del compactado durante el proceso del sinterizado del mismo, este crecimiento se puede controlar combinando el polvo de cobre con el grafito. En la figura 7 (pag. 20) se puede apreciar el comportamiento de estos dos elementos, en las gráficas se puede apreciar como a

mayor cantidad de cobre y grafito hay una disminución en el crecimiento y a menor cantidad de cobre y grafito hay un pequeño aumento en el crecimiento; por lo tanto, se debe tener mucho cuidado con las proporciones a la cual se trabaje con estos elementos, ya que de esto puede depender que el crecimiento obtenido sea el adecuado.

La mezcla que se utilizó para la prueba en piezas, como ya se menciono fue la mezcla B, que por todo lo mencionado en párrafos anteriores, podemos comprender mejor el porque con esta mezcla se obtuvieron mejores resultados.

La mezcla B sufrió una modificación más, que fue el cambio de lubricante, en vez de utilizar el estearato de zinc (L1) se utilizo cera (L3), el cual se logra eliminar mejor en la zona de precalentamiento dentro del horno.

De todo lo anterior se puede concluir que para poder controlar el crecimiento dimensional de cualquier pieza, es necesario cuidar el tipo de mezcla, la cual tiene que ser capaz de cumplir con las necesidades de la pieza a fabricar y transformarse de acuerdo a lo que teóricamente se espera, en caso contrario se deben hacer pruebas para encontrar la mezcla más adecuada, las condiciones a cuales tiene que ser sinterizada la pieza, también toda la herramienta que se utilice para la compactación y en general todo el equipo y maquinaria debe funcionar perfectamente. Nunca sin olvidar que el cuidado que ponga todo el personal que esta involucrado en el desarrollo de todo el proceso es indispensable para obtener los mejores resultados.

Cuando la pieza era sometida al calibrado aproximadamente un 70% de la producción total salía al mercado, ahora aproximadamente un 85 % de las piezas salen a la venta. Con estos porcentajes comprobamos que se mejoro la calidad de la pieza aunque todavía un 15% de las piezas pasan a ser chatarra.

## INDICE DE FIGURAS

Fig. 1 a) Fierro reducido	pag. 9
b) Fierro atomizado.....	pag. 9
Fig. 2 Embudo y copa utilizados para medir la fluidez y densidad aparente.....	pag. 10
Fig. 3 Microestructura de un polvo de fierro atomizado.....	pag. 15
Fig. 4 Microestructura de dos aceros sinterizados Fierro-carbono.....	pag. 16
Fig. 5 Diagrama de equilibrio fierro-carbón.....	pag. 17
Fig. 6 Influencia del contenido de carbono sobre las Propiedades del fierro sinterizado.....	pag. 18
Fig. 7 Gráfica del cambio dimensional en el cobre.....	pag. 20
Fig. 8 Microestructura de dos materiales que Contienen fierro-cobre.....	pag. 21
Fig. 9 Efecto del carbono adicionado sobre el esfuerzo a la tensión, elongación y cambios dimensionales en material de fierro-cobre.....	pag. 23
Fig. 10 Microestructura de dos materiales sinterizados de Base fierro-cobre y carbono.....	pag. 24
Fig. 11 Influencia del fósforo y carbono sobre el esfuerzo a la tensión, elongación y cambios dimensionales.....	pag. 25
Fig. 12 Microestructura de dos materiales sinterizados.....	pag. 26
Fig. 13 Microestructura de dos materiales sinterizados de base fierro.....	pag. 28
Fig. 14 Comportamiento del níquel en el cambio dimensional.....	pag. 29
Fig. 15 Mezcladora eléctrica.....	pag. 32
Fig. 16 Curvas de densidad-presión.....	pag. 33
Fig. 17 Ciclo de compactación.....	pag. 34
Fig. 18 Tres diferentes conceptos de obtener Densificación simétrica doble-lado.....	pag. 36
Fig. 19 Esfuerzo de deformación de las partículas de polvo en la compactación de un polvo de fierro esponja.....	pag. 37
Fig. 20 Rompimiento dentro del dado por dos punzones.....	pag. 38
Fig. 21 Etapas de sinterizado.....	pag. 40
Fig. 22 Formación del cuello entre esferas sinterizadas de cobre.....	pag. 41
Fig. 23 Migración de vacancias.....	pag. 41

Fig. 24 Tamaño de grano, poro y distribución en la Microestructura.....	pag. 42
Fig. 25 Homogeneización del níquel y carbono durante el sinterizado.....	pag. 44
Fig. 26 Sinterización de una fase líquida transitoria.....	pag. 45
Fig. 27 Mezcla de 90% en peso de fierro y 10% en Peso de cobre.....	pag. 46
Fig. 28 Influencia de la adición de cobre y grafito.....	pag. 48
Fig. 29 Zonas de un horno continuo.....	pag. 50
Fig. 30 Esfuerzo a la tensión, elongación y densidad Del fierro sinterizado.....	pag. 54
Fig. 31 Esfuerzo a la tensión, elongación, densidad y coeficiente de difusión del fierro sinterizado.....	pag. 55
Fig. 32 Pieza placa No. SX 1991.....	pag. 56
Fig. 33 Puntos que se verifican en la pieza .....	pag. 57

## BIBLIOGRAFÍA

*Sidney, H.A.: Metalúrgia de polvos. In: Introducción a la Metalúrgia Física.*

*Hoganas y Bockstiegel, G.: Material and Powder Properties, Handbook 1, 1997, 3,12 p.*

*Hoganas y Bockstiegel, G.: Production of Sintered Components, Handbook 2, 1997, 7,41 p.*

*Hoganas y Bockstiegel, G.: Design and Mechanical Properties, Handbook 3, 1997, 10.15 p.*

*Bocchini, G.F., Hoganas y Schaidl, H.: Powder and mix properties, Tooling and innovative presses, suitable to avoid cracks in P/M part compacting, 1991, 21 p.*

*Material Standards for P/M Structural Parts, Metal Powder Industries Federation, Princeton, New Jersey, 1997, pp. 30-35.*

*Metal Powder Industries Federation, Princton, New Jersey, 1997, pp. 9, 79.*

*Philips, T.: Trouble-Shooting Guide for Sintering Furnace Atmospheres. APMI, volumen 26: 245-250, 1990.*