

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL  
**Facultad de Ingeniería Mecánica**



**"FABRICACION DE BOCINES PULVIMETALURGICOS"**

**TESIS DE GRADO**

Previa a la Obtención del Título de

**INGENIERO MECANICO**

**Presentada por:**

**Mario Iván Moreno Medina**



**Guayaquil**

**Ecuador**

**Año**

**1990**

D E D I C A T O R I A

A MIS PADRES

A MIS HERMANOS

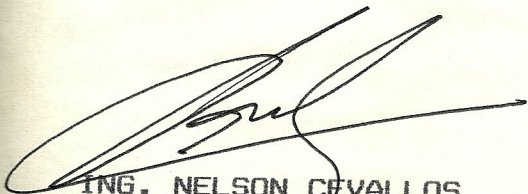
A G R A D E C I M I E N T O

  
ING. NELSON DEVALLOS  
DECANO

  
ING. ANTONIO VITERI  
DIRECTOR DE TESIS

  
ING. JAIME SÁBIDO  
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Al ING. ANTONIO  
VITERI Director de  
Tesis, por su ayuda  
y colaboración para  
la realización de  
este trabajo.



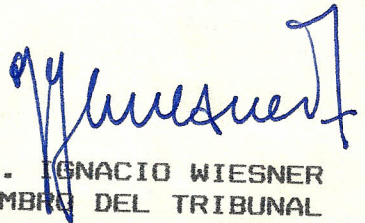
ING. NELSON CEVALLOS  
DECANO FIM



ING. ANTONIO VITERI  
DIRECTOR DE TESIS



ING. JAIME BARRERA  
MIEMBRO DEL TRIBUNAL



ING. IGNACIO WIESNER  
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Exámenes y Titulos profesionales de la ESPOL).

*Wario Pizarro*  
.....  
Nombre y firma del autor

RESUMEN

En el presente trabajo se pone en práctica el proceso pulvimetalúrgico en la fabricación de bocines livianos de cobre y bronce.

En la primera parte de esta tesis se realiza un estudio detallado de los principales procesos de producción para la obtención del polvo de cobre. Estos procesos son los siguientes: Proceso por reducción, por electrólisis, por atomización e hidrometalúrgico; además se mencionan las principales aplicaciones que se dan a sus productos terminados, tales como: Bocines, filtros, contactos eléctricos, etc. Luego se estudian los procesos de compactación y sinterización para este polvo y se observan las principales variables que hay en ellos.

En la parte experimental se diseñarán las matrices correspondientes, se optimizarán los parámetros de fabricación tanto en la consolidación como en la sinterización y se tomarán estos valores para la conformación del bocin pulvimetalúrgico. Se analizarán los resultados obtenidos en las diferentes etapas del proceso pulvimetalúrgico. Por último se mencionan las conclusiones y recomendaciones que se han obtenido durante la realización del presente trabajo.

## INDICE GENERAL

		PAG
	RESUMEN :.....	V
	INDICE GENERAL .....	VI
	INTRODUCCION .....	15
I	PROCESOS DE PRODUCCION DEL POLVO DE COBRE .....	17
	1.1 Proceso por reducción del óxido de cobre .....	<del>17</del>
	1.2 Proceso por electrólisis.....	22
	1.3 Proceso de Atomización.....	33
	1.4 Proceso Hidrometalúrgico.....	44
II	PRINCIPALES APLICACIONES DEL POLVO DE COBRE .....	50
	2.1 Bocines porosos auto-lubricados.....	<del>50</del>
	2.2 Bocines con asiento de acero .....	54
	2.2.1 Cobre-Plomo.....	54
	2.2.2 Bocines secos.....	58
	2.3 Partes pulvimetalúrgicas de alta conductividad ..	60
III	PRESIONADO Y SINTERIZADO DEL POLVO DE COBRE .....	64
	3.1 Consolidación.....	<del>64</del>
	3.1.1 Interdependencia de las propiedades en verde sobre las características del polvo y variables de compacta ción .....	68
	3.1.2 Efecto de las impurezas .....	<del>74</del>
	3.1.3 Efecto del lubricante .....	<del>74</del>
	3.2 Sinterización .....	<del>83</del>
	3.2.1 Efecto de la temperatura y tiempo de sinterización .....	87

pag 136

3.2.2	Cambios en la dimensión y densidad.....	89
3.2.3	Cambios microestructurales.....	96
3.2.4	Sinterización en fase líquida.....	97
IV	PARTE EXPERIMENTAL	
4.1	Propiedades y características del polvo de cobre	102
4.2	Diseño y construcción de la matriz.....	106
4.3	Determinación de los parámetros óptimos.....	117
4.3.1	Compactado .....	118
4.3.2	Sinterizado .....	126
4.4	Tratamiento térmico .....	131
4.5	Estudio de las propiedades mecánicas.....	142
4.5.1	Ensayo metalográfico .....	142
4.5.2	Prueba de compresión.....	148
4.5.3	Prueba de dureza .....	148
4.6	Ensayo de Maquinado .....	150
V	DISCUSION DE RESULTADOS .....	154
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	160
	BIBLIOGRAFIA .....	165

## INDICE DE FIGURAS

Nº		PAG
1.1	Etapas usadas para producir polvo de cobre por reducción .....	18
1.2	Naturaleza esponjosa del polvo de cobre obtenido por el proceso de reducción del óxido de cobre.....	21
1.3	Efecto del empañamiento del polvo de cobre sobre su resistencia en verde.....	23
1.4	Escamas de cobre como se reciben.....	24
1.5	Escamas de cobre después del molido.....	24
1.6	Escamas de cobre después de la reducción.....	24
1.7	Esquema de flujo para la producción de polvo de cobre electrolítico.....	30
1.8	Efecto de la concentración ácida sobre la eficiencia de corriente y la densidad aparente.....	31
1.9	Efecto del intervalo de cepillado sobre el tamaño de la partícula.....	34
1.10	Efecto del intervalo de cepillado sobre la densidad aparente.....	35
1.11	Esquema de flujo para el proceso de atomización.....	36
1.12	Vista esquemática de la atomización por gas horizontal.....	38
1.13	Diagrama esquemático de una atomización vertical.....	39

Nº		PAG
1.14	Interacción gas-metal a la salida de la boquilla.....	41
1.15	Esquema de una atomización por agua.....	43
1.16	Comparación de polvos formados por el proceso de atomización por gas y por agua.....	45
1.17	Proceso hidrometalúrgico para la producción de polvo de cobre.....	48
2.1	Formas más comunes de bocines auto-lubricados.....	52
2.2	Desgaste del bocín en función de las horas de vida...	59
2.3	Sección transversal de un bocín de bronce seco con plástico infiltrado.....	61
2.4	Efecto de la densidad sobre la conductividad eléctrica y la resistencia a la tensión.....	62
3.1	Esquema de una compactación simple y doble.....	67
3.2	Relación entre la densidad en verde y la presión de compactación.....	69
3.3	Relación entre la resistencia en verde y la presión de compactación.....	70
3.4	Relación entre la densidad en verde y la densidad aparente.....	71
3.5	Relación entre la resistencia en verde y la densidad aparente.....	72
3.6	Efecto de las impurezas sobre la conductividad eléctrica .....	75
3.7	Efecto del hierro sobre la conductividad eléctrica..	76
3.8	Efecto del lubricante sobre la presión de eyección...	78

Nº		PAG
3.9	Efecto del lubricante sobre la resistencia en verde y la compresibilidad.....	80
3.10	Etapas de la sinterización.....	84
3.11	Etapas de la sinterización.....	85
3.12	Efecto de la temperatura y tiempo de la sinterización sobre la densificación de compactos de polvo de cobre	86
3.13	Variación de la densidad en función de la temperatura de sinterización a distintas presiones de compactación.....	90
3.14	Variación de la resistencia a la tensión en función de la temperatura de sinterización a distintas presiones de compactación.....	91
3.15	Variación de la dureza en función de la temperatura de sinterización a distintas presiones de compactación.....	92
3.16	Contracción de los compactos de polvo de cobre en función de la temperatura y tiempo.....	95
3.17	Microestructura de un compacto de polvo de cobre en verde presionado a 26000 psi.....	98
3.18	Microestructura de un compacto de polvo de cobre presionado a 26000 psi y sinterizado 15 min. a 705°C....	98
3.19	Microestructura de un compacto de polvo de cobre presionado a 26000 psi y sinterizado 30 min. a 950°C....	98
3.20	Representación esquemática de los cambios metalográficos que ocurren durante la sinterización de un compacto de cobre-estaño-grafito.....	99

Nº		PAG
4.1	Microfotografía del polvo de cobre.....	105
4.2	Fotografía de la matriz 1.....	108
4.3	Fotografía de la matriz 2.....	109
4.4	Matriz 1.....	112
4.5	a.- Eje.....	114
4.5	b.- Punzones.....	115
4.5	c.- Dado.....	116
4.6	Balanza electrónica para el pesaje del polvo.....	120
4.7	Prensa hidráulica utilizada en el proceso de compactación.....	121
4.8	Curva de la densidad en verde vs. presión de compactación.....	123
4.9	Curva de la dureza vs. presión de compactación.....	124
4.10	Curva de la resistencia máx. en compresión vs presión de compactación.....	125
4.11	Diferentes niveles de altura de las probetas de 36 gramos en verde.....	127
4.12	Variaciones microestructurales de las probetas en verde compactadas a diferentes presiones.....	128
4.13	Equipo utilizado en el proceso de sinterización.....	129
4.14	Variación de la densidad vs. el tiempo de sinterización.....	133
4.15	Variación de la dureza vs. el tiempo de sinterización	134
4.16	Variaciones microestructurales de las probetas en compactadas a 38 tsi y sinterizadas a 900°C a tiempos diferentes.....	135

Nº		PAG
4.17	Introducción del polvo en la matriz.....	138
4.18	Iniciando el proceso de compactación.....	139
4.19	Sinterización de los bocines.....	140
4.20	Bocines pulvimetalúrgicos de cobre terminados.....	141
4.21	Bocines pulvimetalúrgicos fabricados con la aleación 90Cu-10Sn.....	143
4.22	Microscopio utilizado para determinar la forma de las partículas de los polvos.....	144
4.23	Microfotografía del polvo de aleación 90Cu-10Sn.....	145
4.24	Microscopio utilizado para los análisis metalográ ficos.....	147
4.25	Variaciones microestructurales para probetas compacta a diferentes presiones y sinterizadas a una temperatu ra de 900°C durante 30 minutos.....	149
4.26	Tomando la dureza a los bocines pulvimetalúrgicos....	151
4.27	Bocines pulvimetalúrgicos maquinados.....	154

## INDICE DE TABLAS

N <sup>o</sup>		PAG
I	Condiciones típicas para la producción del polvo de cobre electrolítico.....	26
II	Efecto de la adición de agentes sobre la eficiencia de corriente y el tamaño de la partícula.....	32
III	Comparación de la atomización por agua y por gas.....	46
IV	Aplicaciones de los bocines de bronce auto-lubricados.....	53
V	Ventajas y limitaciones de los bocines porosos de bronce.....	55
VI	Composiciones típicas para bocines cobre-plomo.....	57
VII	Presiones de compactación y razón de compresión de varias partes pulvimetalúrgicas de cobre.....	66
VIII	Efecto del lubricante sobre las propiedades en verde.....	82
IX	Temperaturas de sinterización convencionales para aleaciones a base de cobre.....	93
X	Análisis químico del polvo de cobre.....	103
XI	Propiedades físicas del polvo de cobre y cobre fundido.....	104
XII	Propiedades químicas del polvo 90Cu-10Sn.....	107
XIII	Propiedades físicas del polvo de 90Cu-10Sn.....	107
XIV	Resultados de los compactos en verde.....	122

Nº	PAG	
XV	Resultados de las probetas con el tiempo de sinterización variable.....	136
XVI	Durezas obtenidas con los bocines sinterizados del polvo 90Cu-10Sn.....	152

## INTRODUCCION

La pulvimetalurgia tiene la distinción de ser al mismo tiempo el método más viejo y más moderno conocido para la fabricación de artículos metálicos usados tanto en el campo industrial como también en el campo doméstico. Este proceso fue realmente comercializado con el desarrollo de los bocines porosos de bronce. Uno de los polvo metálicos más ampliamente usado en países desarrollados es el cobre y sus aleaciones, principalmente en la fabricación de bocines porosos auto-lubricados, filtros, etc.

Este trabajo tiene por objeto la fabricación de bocines livianos de cobre y bronce que debe ser el primer paso para futuros estudios dirigidos a la obtención de los bocines porosos auto-lubricados ya que este producto terminado tiene un amplio mercado; como por ejemplo, en la industria automotriz estos bocines se encuentran en arrancadores, generadores, bombas de agua y aceite, etc; en aplicaciones domesticas se usan en secadoras de ropa, máquinas lavadoras, refrigeradoras, etc. En la industria, especialmente en máquinas textiles, máquinas empacadoras, ventiladores eléctricos, etc.

Para la fabricación de estos bocines livianos de cobre se aplica la técnica de compactación del polvo en la matriz y luego la sinterización, es decir las dos etapas se

realizan independientemente la una de la otra. Existen varias formas para compactar polvos a mas de la señalada anteriormente que se denomina " Compactación en dados rigidos ", sin embargo el mayor número de componentes pulvimetalúrgicos son compactados en dados rigidos usando prensas mecánicas o hidráulicas.

El tipo de prensa ideal para este trabajo es una de doble acción la cual permite una compactación más uniforme, pero sin embargo aqui se usa una de simple acción. Del mismo modo el horno que se dispone para la sinterización se lo ha mejorado en la mayor manera posible para que pueda controlar la atmósfera de sinterización.

FUNDICION DE COBRE

ADMISION

# CAPITULO I

## PROCESOS DE PRODUCCION DEL POLVO DE COBRE.

Los cuatro principales procesos de producción del polvo de cobre son: Proceso por reducción de óxido de cobre, por electrólisis, de atomización y proceso hidrometalúrgico.

### 1.1. PROCESO POR REDUCCION DE OXIDO DE COBRE

La Figura 1.1 ilustra las etapas usadas para producir polvo de cobre por este método. Hay dos posibles fuentes de materia prima que son: Las escamas de cobre laminadas y la atomización con aire de cobre fundido seguida por una oxidación que generalmente se lo realiza en una máquina sinterizadora rotativa. Tanto las escamas como los perdigones de cobre están totalmente oxidadas en su capa exterior y el interior de la partícula puede ser de cobre puro. Este grado depende del tamaño y forma de la partícula y de la severidad de las condiciones oxidantes a las cuales estos han sido sometidos.

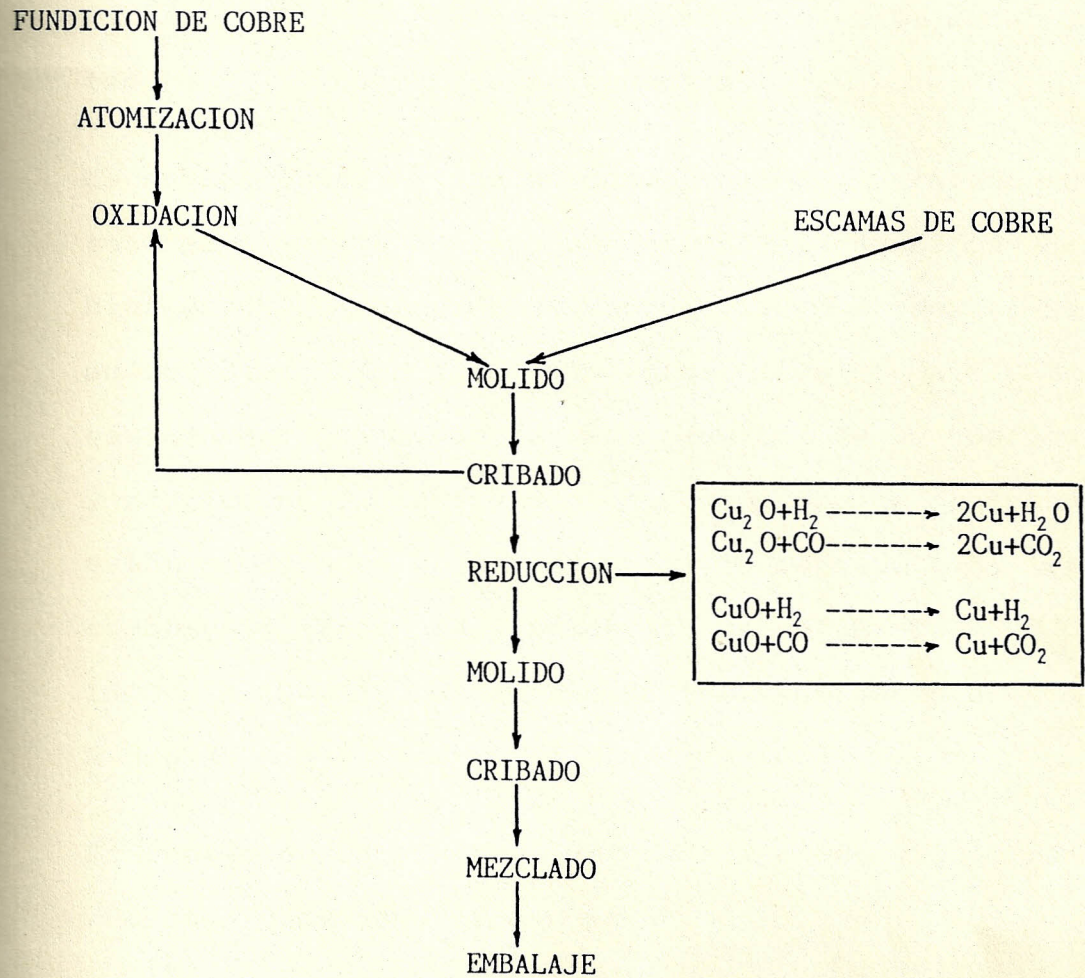


Fig. 1.1 Etapas usadas para producir polvo de cobre por reducción

En la etapa de molido la porción oxidada de la partícula se romperá, debido a que el óxido de cobre es más frágil que el cobre puro y de este modo el tamaño de la partícula se reducirá.

La reducción del óxido de cobre molido y cribado se realiza en un horno bajo una atmósfera reductora de hidrógeno y/o monóxido de carbono, aunque también se puede usar amoníaco disociado. Las reacciones básicas que gobiernan la reducción del óxido cuproso y cúprico por hidrógeno o por monóxido de carbono están enumeradas en la Figura 1.1. La reducción es comúnmente efectuada a temperaturas de 425 °C a 705 °C (800 °F a 1300 °F) con un tiempo total de horno de 4 a 8 horas.

El contacto continuado entre el óxido y el gas reductor debe tomar lugar por:

- (a) Difusión del gas a través del metal al óxido;
- (b) Difusión del oxígeno u óxido, a través del metal al gas;
- (c) Los dos (a) y (b), o
- (d) Movimiento de una manera u otra a través de poros o fisuras.

Los siguientes sucesos restringirán la reducción del óxido de cobre:

- (a) El oxígeno tiene poca solubilidad en el cobre;
- (b) El oxígeno y el óxido cuproso pueden pronta y rápidamente difundir a cobre sólido;
- (c) El hidrógeno prontamente difunde a cobre sólido.

Se ha demostrado que un considerable calor es desplegado durante la reducción del óxido de cobre por hidrógeno, también una sinterización ocurre a los 450 °C (840 °F). El monóxido de carbono reacciona similarmente aunque ocurre una sinterización menor. El agua formada por la reacción con el óxido no puede inmediatamente escapar, formando cavidades internas o fisuras al tratar de escapar. Por esta razón es la naturaleza esponjosa y porosa del polvo de cobre reducido ilustrado en la Figura 1.2.

Las propiedades últimas del polvo de cobre tales como densidad aparente, tasa de flujo, distribución del tamaño de la partícula, forma, área de superficie específica, pueden ser influenciados por los siguientes factores:

- (a) La tasa de difusión de hidrógeno y/o CO
- (b) La tasa de difusión de  $O_2$  o  $Cu_2O$
- (c) La tasa de reducción
- (d) La tasa de sinterización y reducción de porosidad.

Obviamente la pureza química inherente de la materia

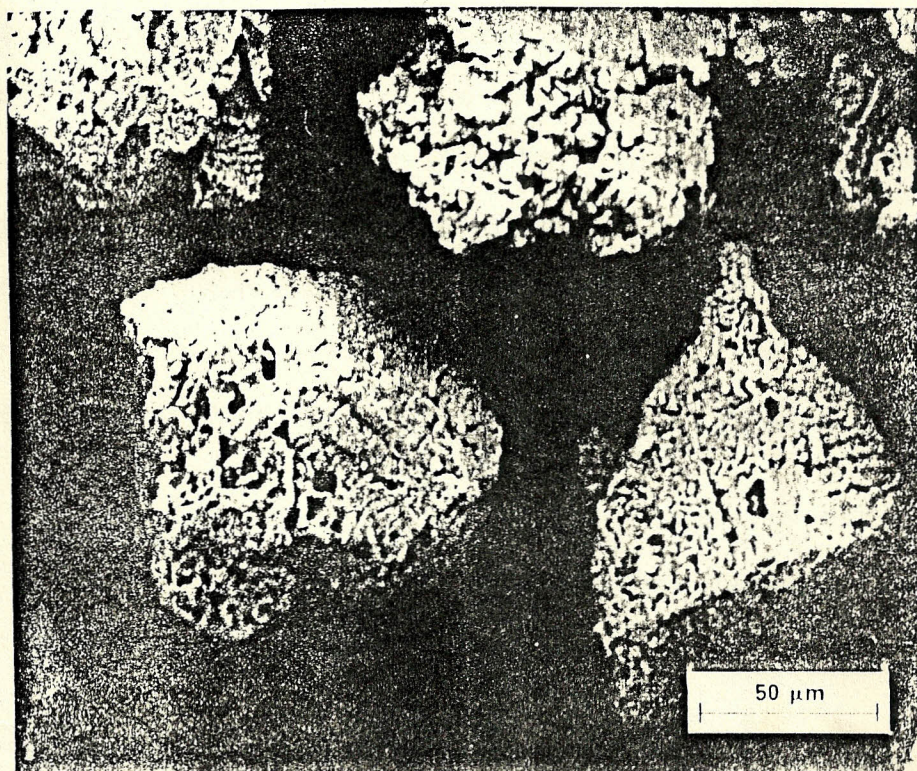


Fig 1.2 Naturaleza esponjosa del polvo de cobre obtenido por el proceso de reducción del óxido de cobre

prima controlará el producto final.

El polvo reducido y molido es tamizado y/o clasificado y, si es necesario, mezclado y lubricado. Estas etapas son cuidadosamente controladas para evitar pérdidas o cambios en las características tales como densidad aparente, flujo de polvo, etc. Algunos polvos de cobre son tratados con antioxidantes para evitar la oxidación. Sin este tratamiento, los polvos de cobre, particularmente cuando son expuestos al aire, se empañan, lo que acarrea una caída en la resistencia en verde y otros efectos laterales, como se muestra en la Figura 1.3.

Las Figuras 1.4, 1.5 y 1.6 muestran respectivamente, las escamas de cobre como se reciben, después del molido y después de la reducción.

## 1.2. PROCESO ELECTROLITICO.

Como se muestra en la Figura 1.7 la producción del polvo de cobre electrolítico, sigue el mismo proceso electroquímico que se aplica para el electro-refinamiento del cobre. Las condiciones de deposición, sin embargo son cambiadas para producir un depósito polvoriento o esponjoso, en lugar de un producto fuertemente adherente deseado en el electro-refinamiento. Las condiciones típicas para la producción del polvo de cobre ilustrada en la

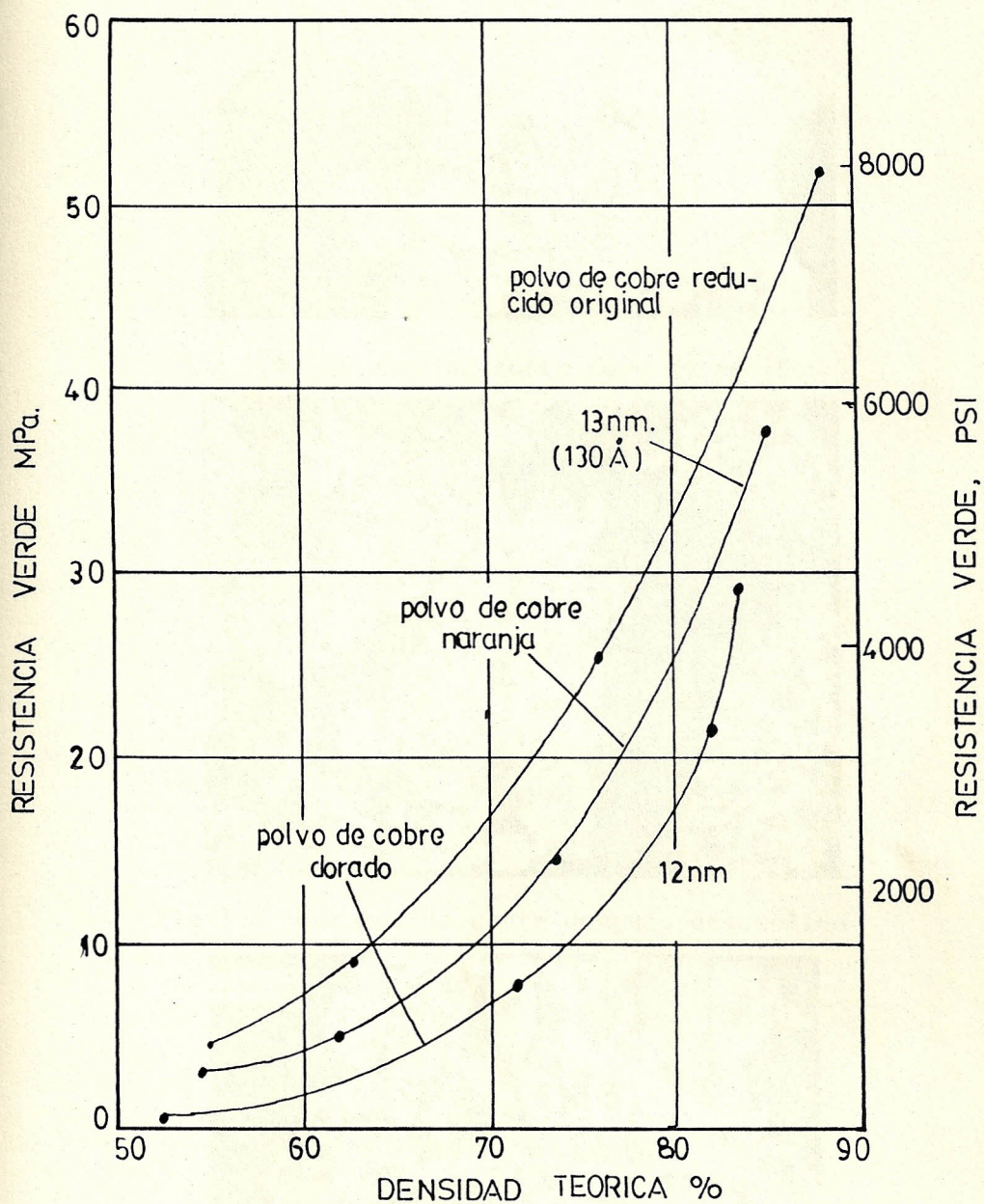


Fig 1.3 Efecto del empañamiento del polvo de cobre sobre su resistencia en verde

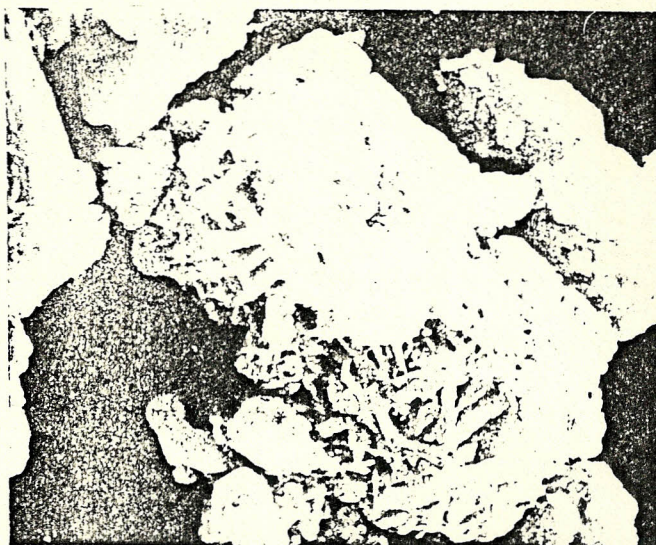


Fig 1.4 Escamas de cobre como se reciben

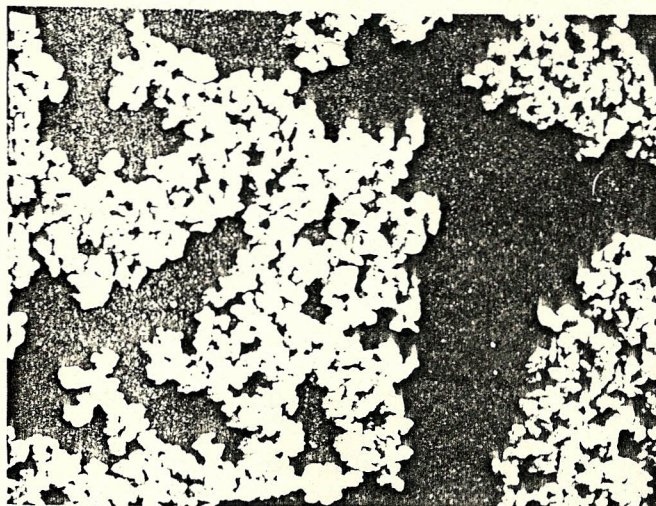


Fig 1.5 Escamas de cobre después del molido



Fig 1.6 Escamas de cobre después de la reducción

Figura 1.7 puede resumirse como se muestra en la Tabla I.

Generalmente, los ánodos son de cobre y los cátodos son láminas de aleación de plomo ( 61 x 86 x 0.95 cm. ). Los electrodos son arreglados en paralelo uno con otro en tanques ( 3.4 m. de long. x 1.1 m. de ancho x 1.2 m. de alto ). Cada celda contiene 18 cátodos y 19 ánodos, alternativamente espaciados 16 cm. Para asegurar una densidad de corriente uniforme y para eliminar corto-circuitos en las celdas, los electrodos son inspeccionados frecuentemente.

El electrolito es bombeado a un tanque de almacenamiento elevado, desde el cual fluye por gravedad a la parte de arriba de las celdas y sale a través del fondo. Con este tipo de circulación de arriba hacia el fondo, se pueden producir polvos mas homogéneos. El polvo de cobre se deposita en el cátodo en forma de partículas dendríticas. Después que la celda opera por varios días, la potencia es apagada. La mayor parte del electrolito es drenado de la celda, dejando suficiente solución para cubrir el polvo. Los ánodos y cátodos son lavados hacia abajo y luego removidos, el electrolito remanente es drenado de la celda, y el polvo es sacado.

El perfecto lavado del polvo es esencial y toda

**TABLA I**

CONDICIONES TIPICAS PARA LA PRODUCCION DE POLVO DE COBRE ELECTROLITICO

CONDICION	CANTIDAD
Cobre	5-15 g/L (0.6-2 oz/gal)
Acido Sulfúrico	150-175 g/L (20-23 oz/gal)
Temperatura	25-60 °C (77-140 °F)
Densidad de corriente en el ánodo	430-550 A/m <sup>2</sup> (39-50 A/pie <sup>2</sup> )
Densidad de corriente en el cátodo	700-1100 A/m <sup>2</sup> (64-100 A/pie <sup>2</sup> )
Potencial de celda	1.0-1.5 V

huella del electrolito debe ser removida para prevenir que el polvo se oxide. Además, algún sulfato remanente daña los elementos calentadores del horno eléctrico que se usa para el subsecuente secado y tratamiento del polvo. En otro método, el polvo es llevado a un tanque y se le añade agua para producir una pasta que luego es bombeada a un filtro, aquí, el polvo es deshidratado, lavado varias veces, y nuevamente deshidratado. Debido a que el polvo húmedo se oxida rápidamente y por su estado finamente dividido se adiciona un estabilizador. El tratamiento con soluciones acuosas de gelatina protege al polvo de la oxidación en los intervalos de las operaciones.

Después del perfecto lavado y filtrado prosigue la operación de horneado. Esta operación también altera ciertas propiedades, particularmente el tamaño y forma de la partícula, densidad aparente y resistencia en verde. El polvo cae desde una tolva a una correa de malla que tiene interpuesto un papel para prevenir que el polvo húmedo caiga a través de la correa. Después la correa entra al horno y toda el agua es arrojada afuera, el papel se quema, pero en este momento el polvo está sinterizado suficientemente para prevenir que algo de éste caiga a través de las mallas de la correa. La atmósfera

del horno es producida en unidades exotérmicas produciendo un gas que contiene 17% de  $H_2$ , 12% de CO, 4% de  $CO_2$ , y el equilibrio de nitrógeno. El gas es refrigerado para bajar el punto de condensación al rango de  $-22$  a  $-40$  °C. El gas entra al horno en contra corriente y ayuda a enfriar la torta de polvo. Aquí en el horno la torta se seca, se altera la forma de la partícula, se reduce los óxidos y se sinteriza los finos. La temperatura de descarga es suficientemente baja para prevenir la reoxidación de la torta de polvo. Luego esta torta es desmenuzada y está lista para la molienda.

La molienda fina es realizada a alta velocidad en molinos de martillos enfriados por agua. El polvo que sale del molino es alimentado a tamices, donde las partículas de sobre tamaño son separadas y retornadas para una molienda adicional. El polvo de  $-100$  mallas es clasificado en un clasificador de aire y los finos son llevados para la operación de mezcla. Luego son almacenados en tambores y se les añade un agente secador para prevenir una futura oxidación.

#### 1.2.1. EFFECTOS DE LA COMPOSICION DEL ELECTROLITO.

La concentración ácida y la adición de agentes son factores muy importantes en la

producción del polvo. Una alta concentración ácida favorece la formación del polvo. Como se muestra en la Figura 1.8, la eficiencia de corriente aumenta hasta un máximo en una concentración de 120 g/L de ácido sulfúrico, luego gradualmente desciende. La densidad aparente decrece con el incremento de la concentración ácida.

La adición de materiales coloidales, tales como goma o glucosa, ayuda a la formación de polvos finos, debido a que el coloidal retarda la evolución de hidrógeno en el cátodo. La Tabla II indica los efectos que producen la adición de algunos agentes al electrolito.

#### 1.2.2. EFFECTOS DE LAS CONDICIONES DE OPERACION.

Los parámetros más importantes que hay que controlar son: La densidad de corriente, la temperatura y la remoción del polvo.

Un marcado decremento en el tamaño de la partícula ocurre con la elevación de la cantidad de corriente. Elevando la temperatura de operación de la celda se incrementa la eficiencia de corriente y se reduce el voltaje de la celda, sin embargo,

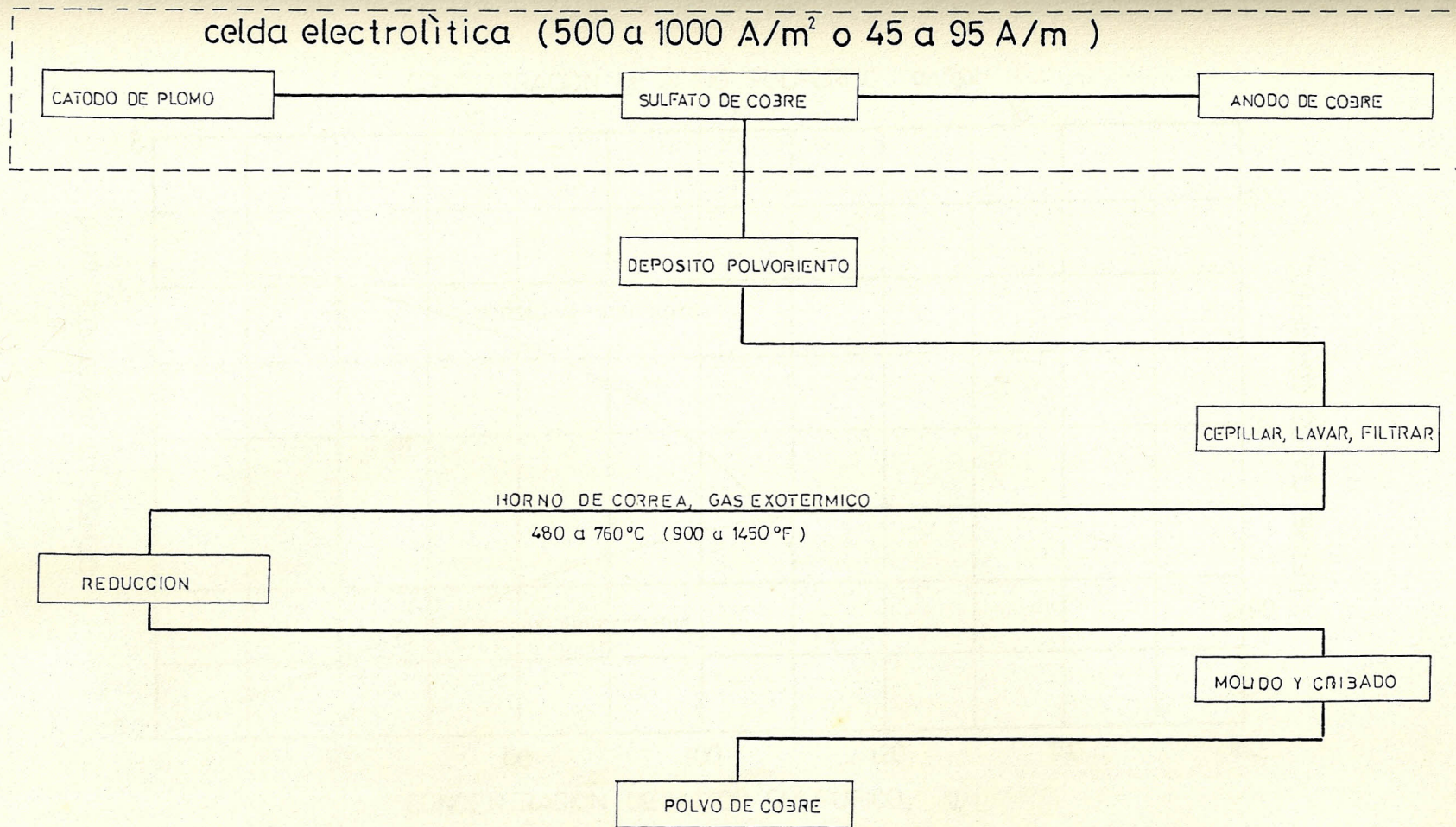


Fig 1.7 Esquema de flujo para la producción de polvo de cobre electrolítico

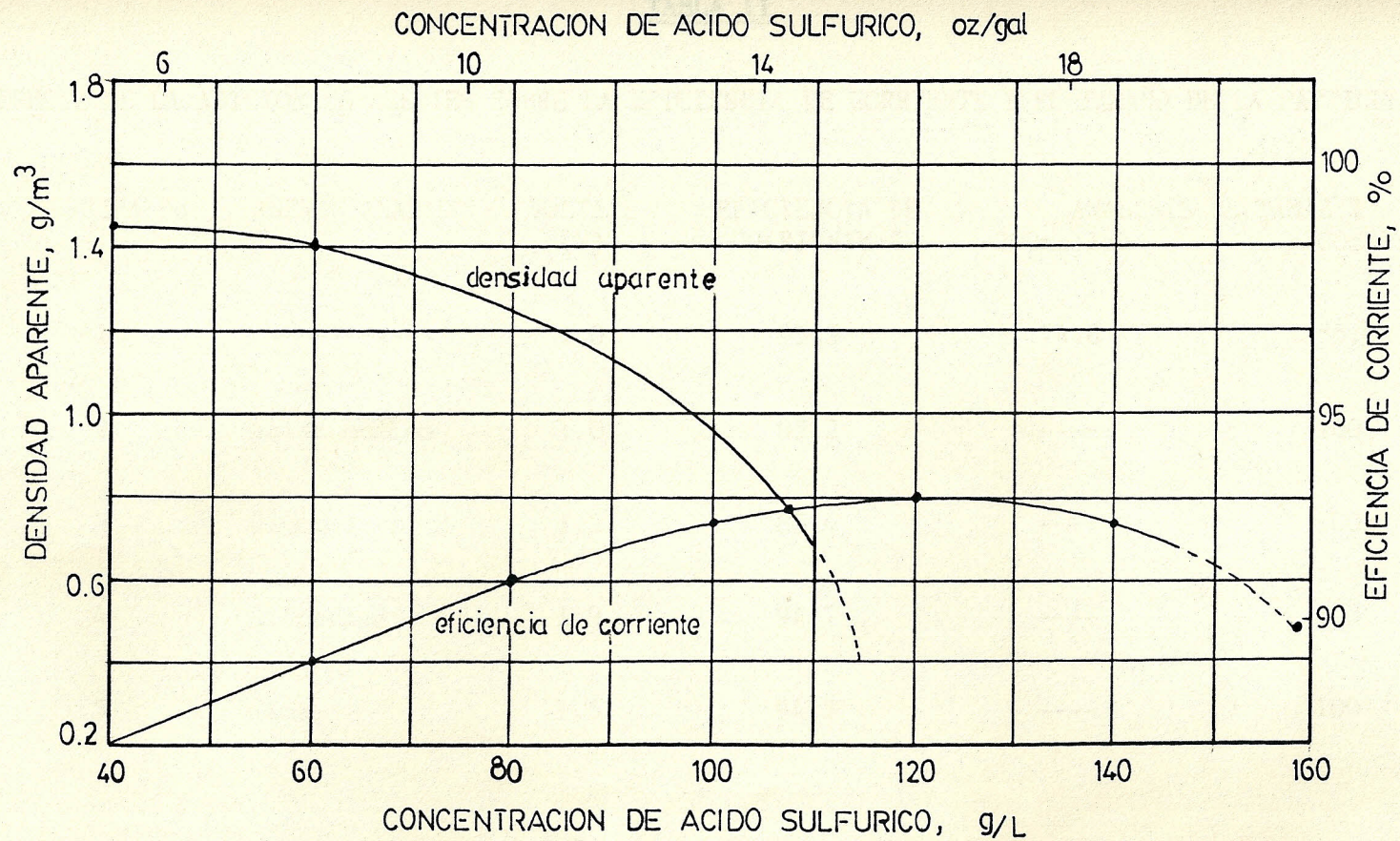


Fig 1.8 Efecto de la concentración ácida sobre la eficiencia de corriente y la densidad aparente

TABLA II

EFEECTO DE LA ADICION DE AGENTES SOBRE LA EFICIENCIA DE CORRIENTE Y EL TAMAÑO DE LA PARTICULA

PRUEBA No	AGENTE AÑADIDO	VOLTAJE (V)	EFICIENCIA DE CORRIENTE,%	ANALISIS DE TAMIZ,%	
				-200mallas	-300mallas
1	-----	1.0	95.9	74.6	55.0
2	Acido Bórico	1.0	95.2	----	100
3	Glucosa	1.2	85.4	----	100
4	Glicerina	1.9	94.7	----	100
5	Goma	1.5	94.5	----	100

- La concentración de la solución es 0.5 %

la operación se dificulta a temperaturas mayores de 60 °C.

El método usado para remover el polvo del cátodo tiene un efecto significativo sobre las características del polvo. Usualmente el polvo es removido por cepillos. El intervalo de cepillado ayuda a controlar el tamaño de la partícula y, como se muestra en la Figura 1.9, el polvo aumenta de tamaño cuando el intervalo se incrementa de 15 a 60 minutos. La Figura 1.10 indica que la densidad aparente aumenta según se extienda el intervalo de cepillado.

### 1.3. PROCESO DE ATOMIZACIÓN.

La atomización del metal fundido es un medio directo para producir polvos aleados a base de cobre o alguna especialidad de polvo de cobre. La Figura 1.11 es una combinación de las hojas de flujo para el proceso de atomización.

Como se puede apreciar en la figura anterior hay dos tipos de atomización: por gas o por agua.

#### 1.3.1. ATOMIZACIÓN POR GAS.

El chorro de metal líquido es desintegrado por la rápida expansión del gas (aire,

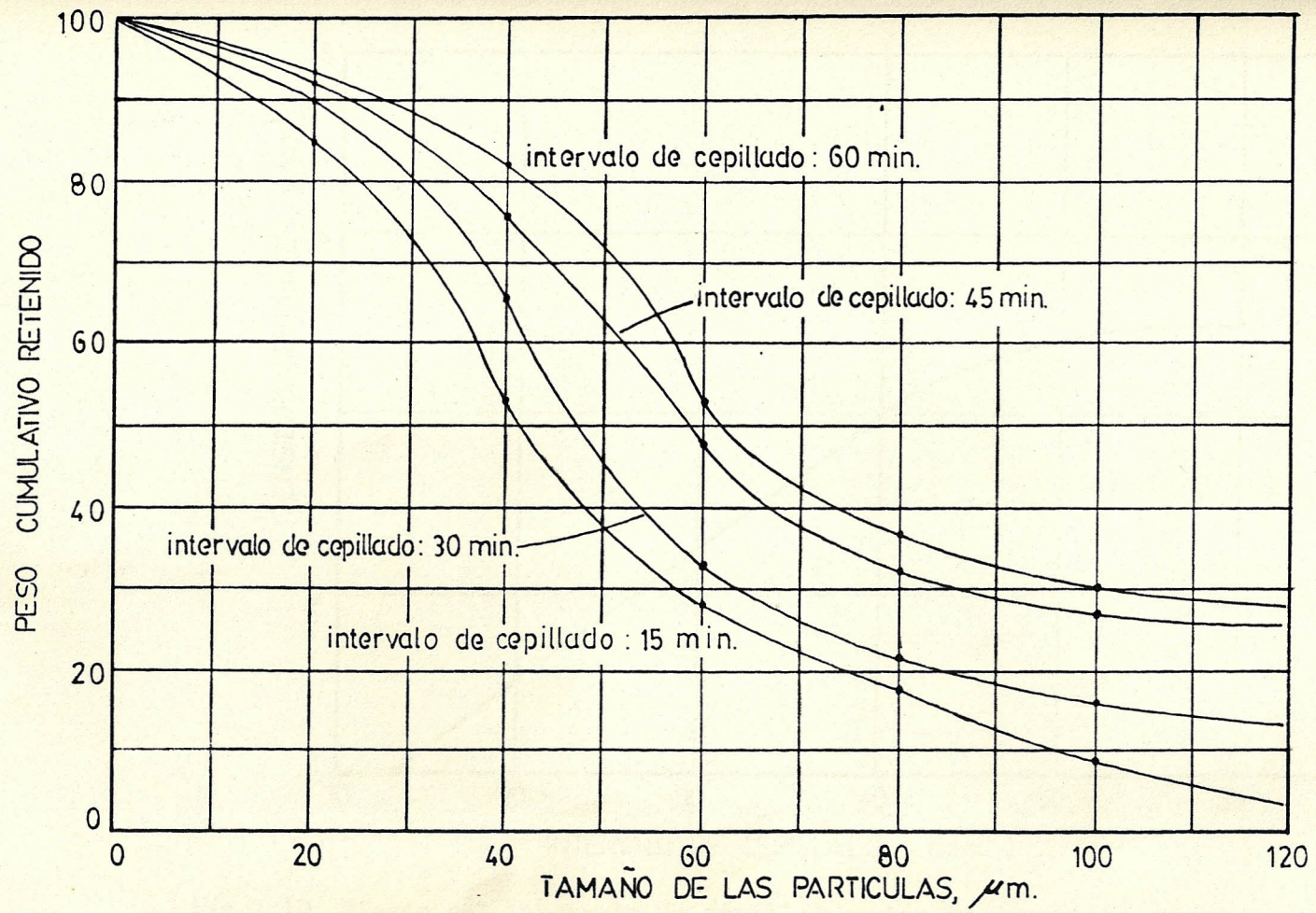


Fig 1.9 Efecto del intervalo de cepillado sobre el tamaño de la partícula

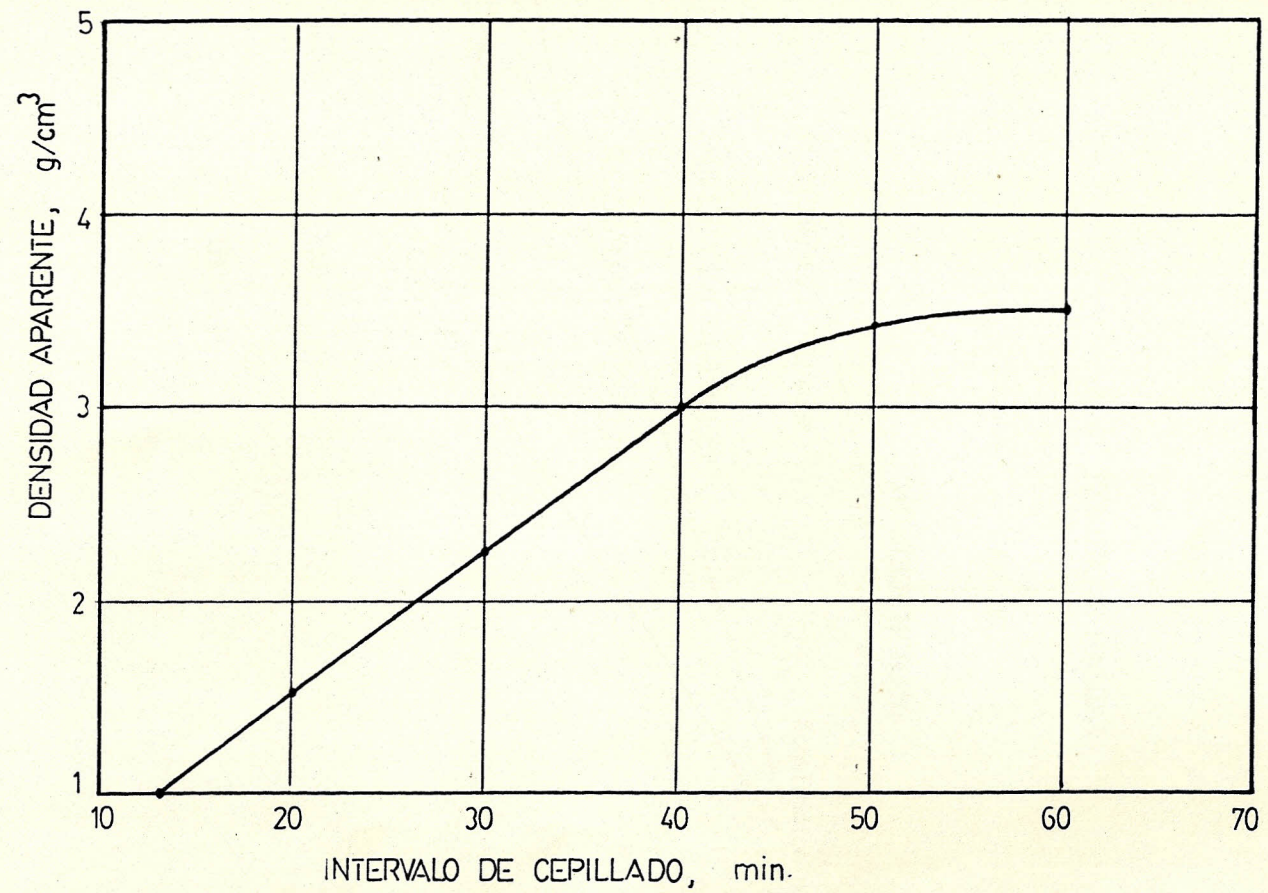


Fig 1.10 Efecto del intervalo de cepillado sobre la densidad aparente

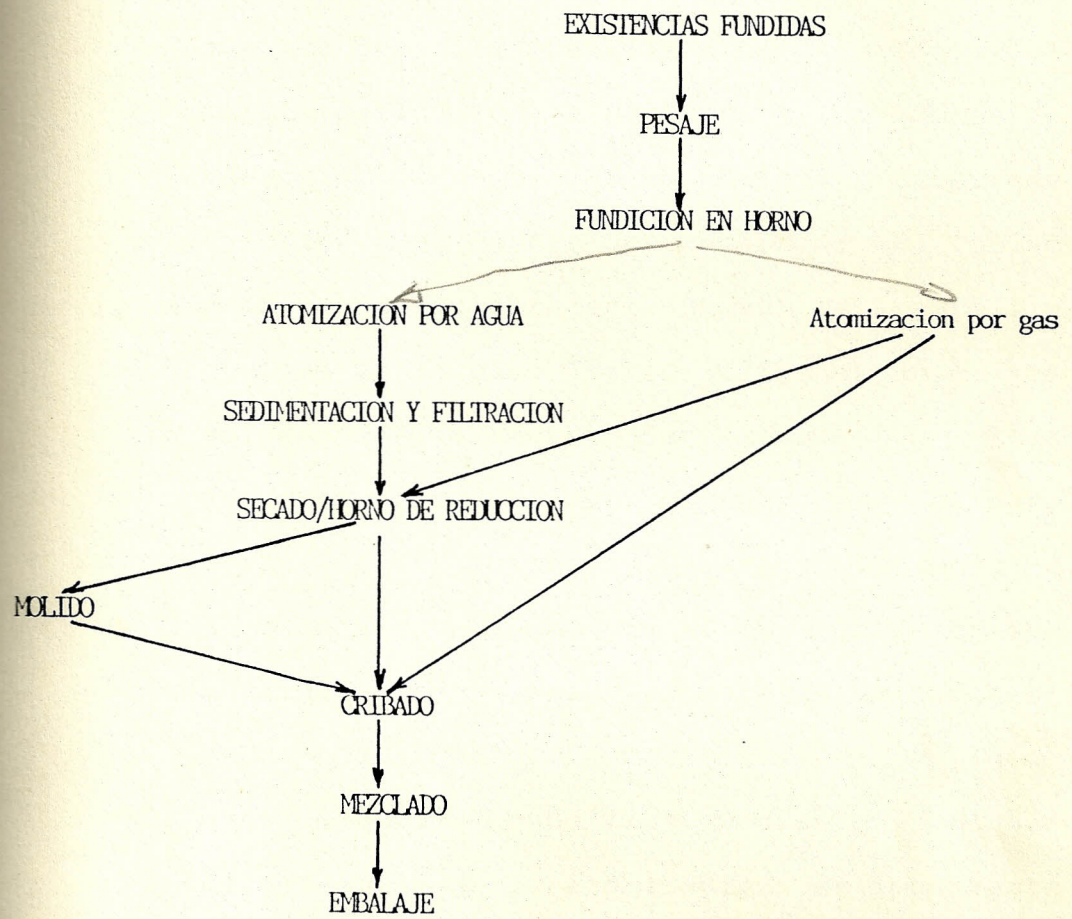


Fig 1.11 Esquema de Flujo para el Proceso de Atomización

nitrógeno, helio o argón ) fuera de la boquilla. La atomización a bajas temperaturas están basadas en un sistema horizontal como en la Figura 1.12. La alta velocidad del gas que emerge de la boquilla crea un sifón y el metal fundido es arrastrado a la zona de expansión dando una fina rociada de gotitas fundidas. La cámara de recepción del polvo debe ser suficientemente grande para permitir que las partículas se solidifiquen antes de golpear las paredes. Para metales a altas temperaturas, se usa un gas inerte para evitar la oxidación. La Figura 1.13, muestra un diagrama esquemático de una atomización vertical con gas inerte. En tales unidades el metal es fundido por inducción y luego vertido en las boquillas. Debido al volumen de gas usado en la atomización, es importante sacar el gas para evitar una contra-presión.

En la atomización horizontal la gran área de filtro retiene el polvo, al mismo tiempo que permite escapar el gas, mientras que en la atomización vertical, es necesario incorporar un separador de ciclón que permita la salida del gas ( y posible reciclamiento ) y la precipitación de partículas finas.

Fig 3

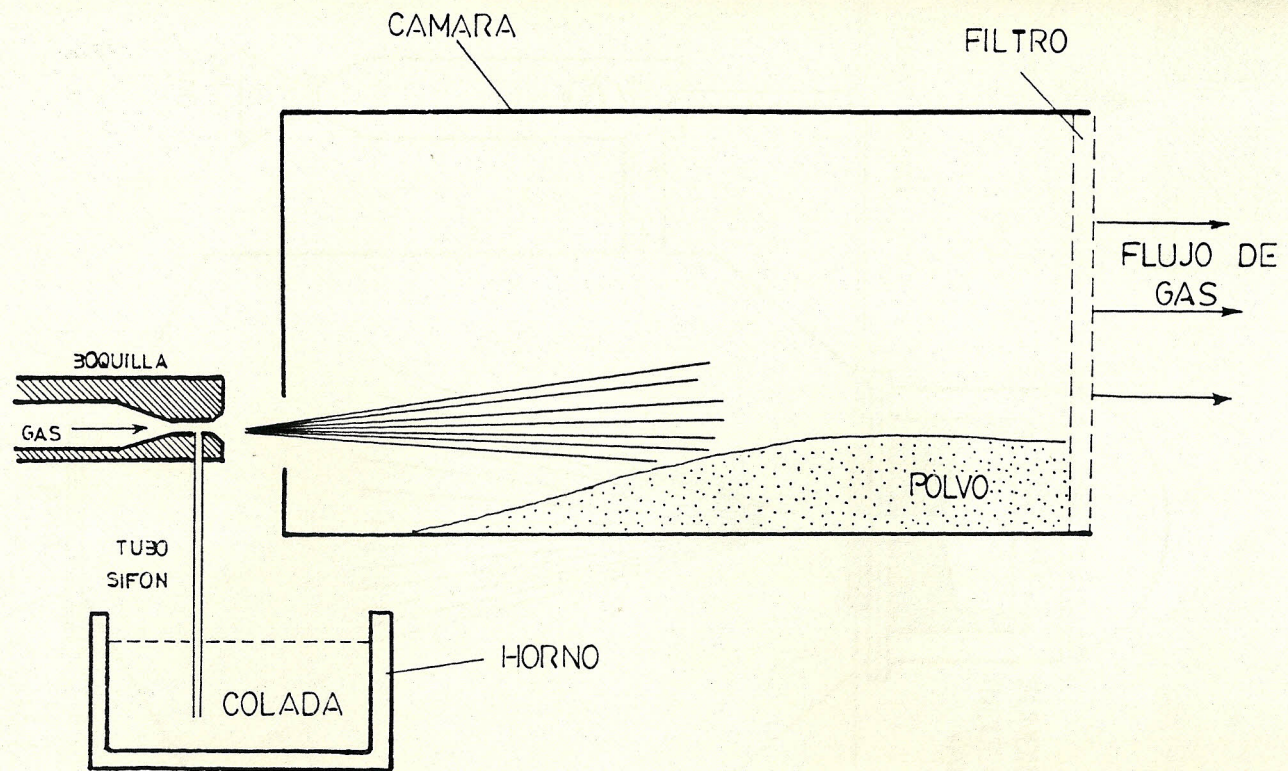


Fig 1.12 Vista esquemática de la atomización por gas horizontal

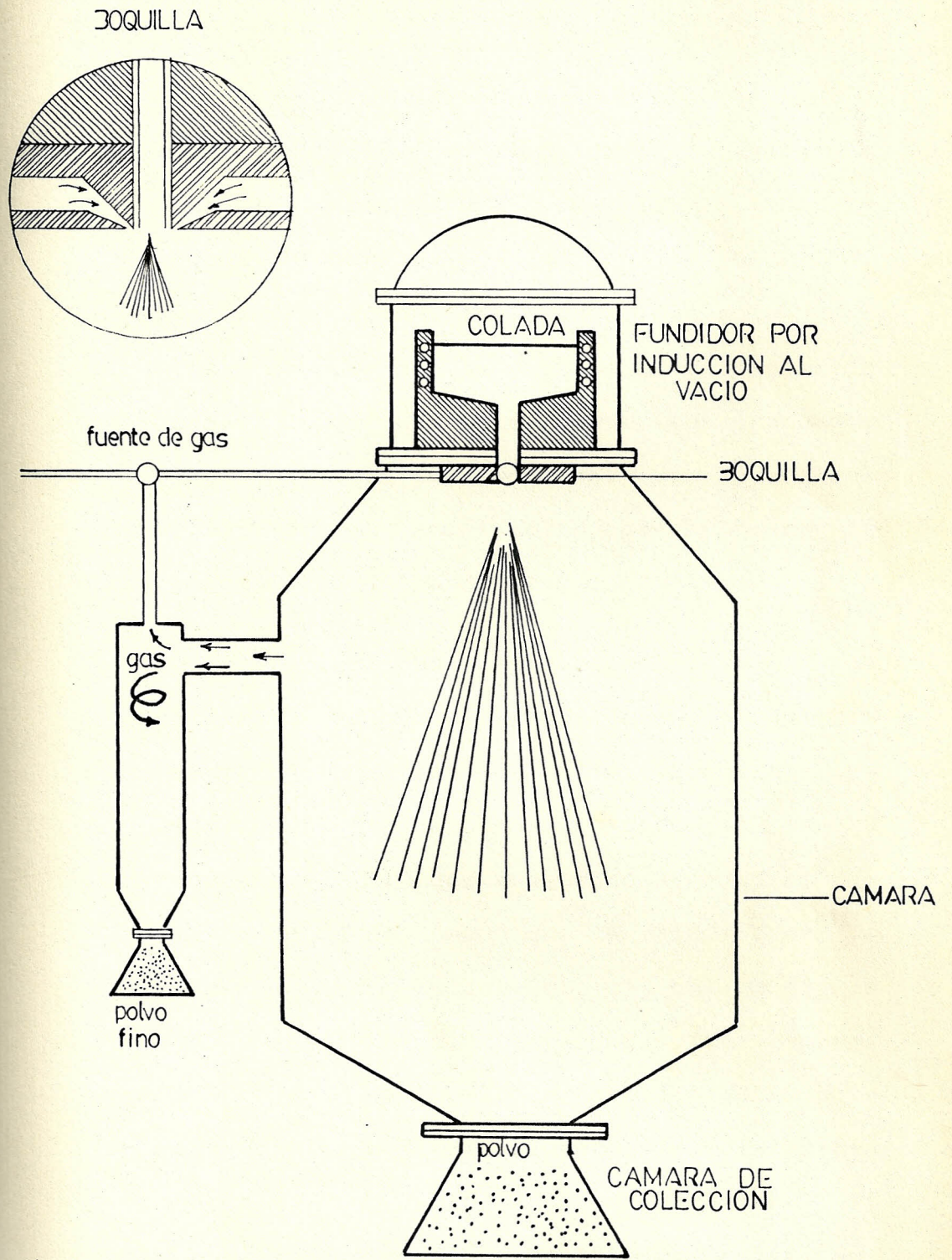


Fig. 1.13 Diagrama esquemático de una atomización vertical

El proceso de atomización por gas tiene un gran número de variables de operación entre las cuales tenemos: Tipo de gas, atmósfera residual, temperatura de la colada y viscosidad con la que entra a la boquilla, tipo de aleación, tasa de alimentación del metal, presión de gas y tasa de alimentación de gas. Estos parámetros pueden ser graduados para controlar el proceso. La principal ventaja de la atomización por gas es la homogeneidad del producto.

La interacción del metal con el gas a la salida de la boquilla han sido estudiadas usando fotografías de alta velocidad. La atomización física puede ser descrita por la Figura 1.14. El gas expandido alrededor del chorro de metal, causa que la colada tome la forma de cono después de la salida de la boquilla, para luego formar una fina lámina. Esta lámina es inestable debido a la alta relación superficie-volumen. Inmediatamente después se forman ligamentos y subsecuentemente finas partículas esféricas. La reducción del tamaño de las partículas es limitada por la viscosidad y la temperatura de la colada. El efecto de supercalentar la

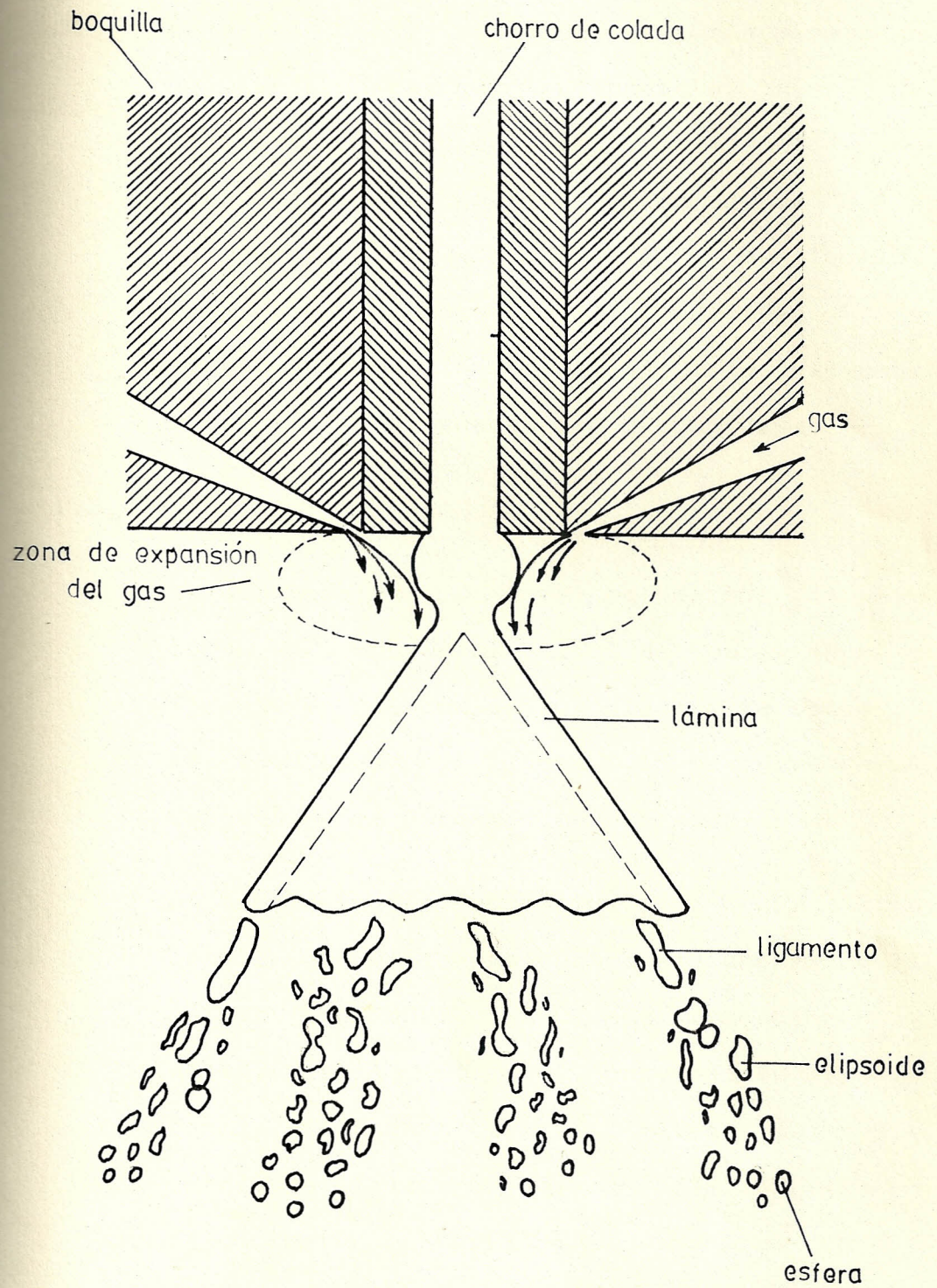


Fig 1.14 Interacción gas-metal a la salida de la boquilla

colada arriba del liquidus es para disminuir la viscosidad y para prolongar el tiempo de solidificación después de la atomización. Un gran tiempo de solidificación ayuda a la esferoidización de las partículas. Dependiendo de la cantidad de supercalentamiento y otras variables, algunas de estas formas pueden ser producidas.

### 1.3.2. ATOMIZACION POR AGUA

La atomización por agua es la técnica más común para producir polvos de metal puro o aleados en los cuales su colada está abajo de los 1600 °C. En la Figura 1.15 se muestra un esquema de la atomización por agua.

Un simple chorro, o múltiples chorros a alta presión son dirigidos contra el chorro de la colada forzando una desintegración y solidificación rápida. Consecuentemente la forma de las partículas es más irregular que cuando se utiliza un gas como fluido, también la contextura superficial es rugosa y con alguna oxidación. Debido a la rápida extracción de calor, para controlar la forma se requiere supercalentamientos muy arriba de la temperatura de liquidus. Ejemplos típicos

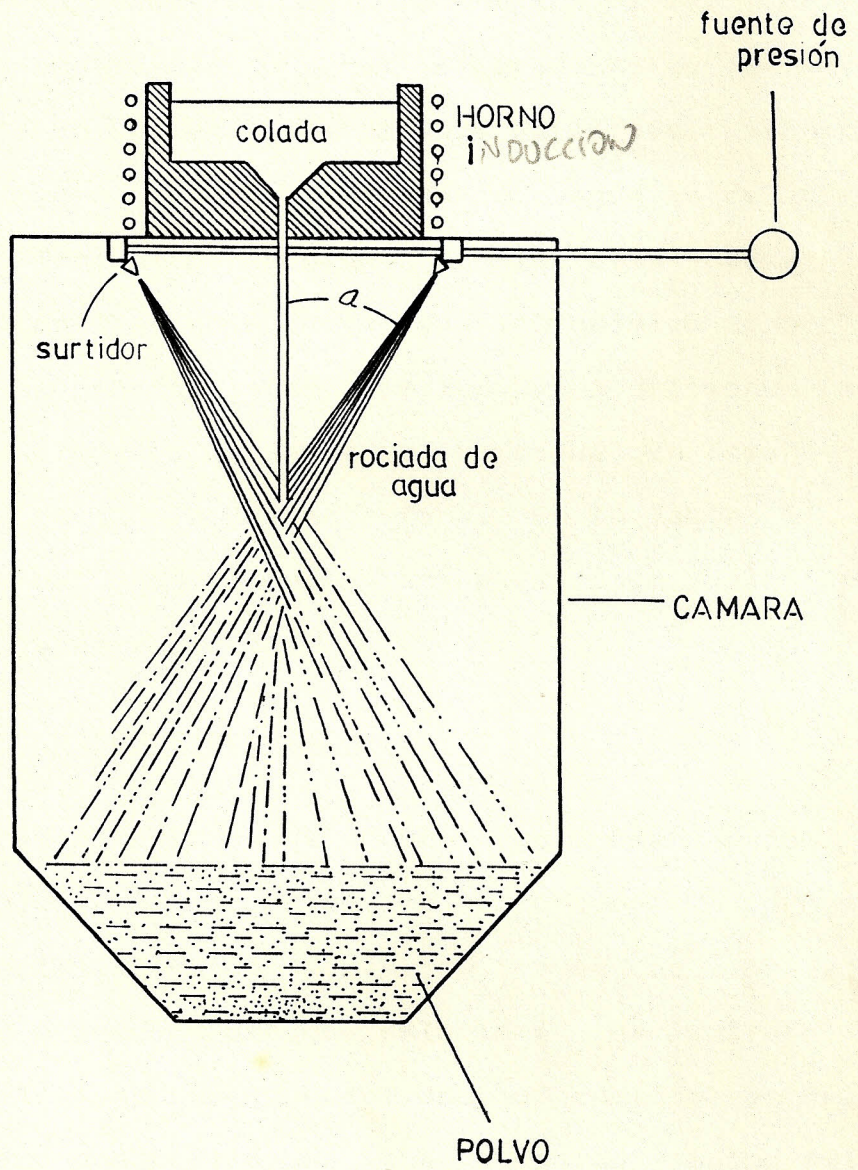


Fig. 1.15 Esquema de una atomización por agua

de atomización por agua y por gases inertes se muestran en la Figura 1.16. En la atomización por gas el producto es esférico con pequeñas partículas satélites, mientras que el polvo atomizado por agua es de forma irregular. Debido a la alta tasa de enfriamiento la segregación química dentro de la partícula es limitada y a presiones muy elevadas de agua se consigue un tamaño de partícula bastante fina. En la Tabla III se da la diferencia entre la atomización por agua y por gas.

#### 1.4. PROCESO HIDROMETALURGICO

La precipitación de cobre de cementación es probablemente el primer ejemplo de un proceso hidrometalúrgico de cobre. A través de los años varios procesos usando soluciones de sulfato de cobre lixivadas o precipitados de cemento en bruto han sido desarrolladas y han alcanzado mucho éxito comercial.

En 1976 la Compañía Anaconda usaba gas dióxido de sulfuro para reducir soluciones de sulfato de cobre obtenidas lixivando minerales. En la actualidad se lixiva concentrados de cobre con soluciones de sulfatos de amoníaco o amonio.

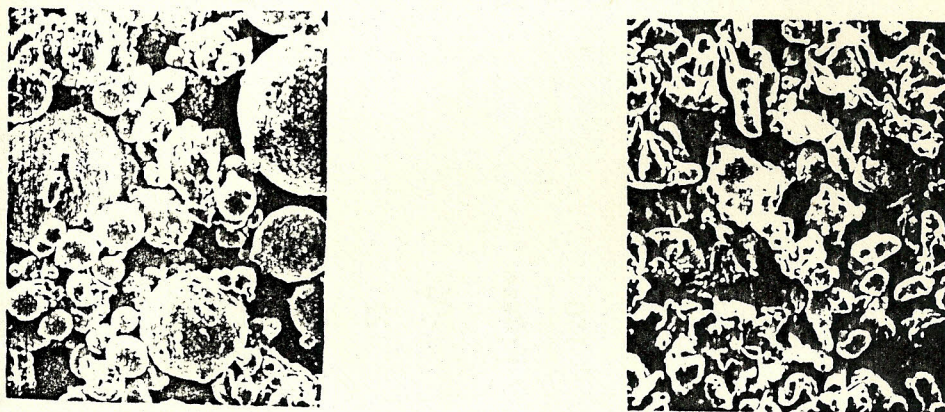


Fig 1.16 Comparación de polvos formados por el proceso de atomización por gas y por agua; a) atomizado con argón, b) atomizado con agua.

TABLA III

COMPARACION DE LA ATOMIZACION POR AGUA Y POR GAS

CARACTERISTICAS	GAS	AGUA
Tamaño de la partícula,	100	150
Forma de partícula	Esférica	Irregular
Aglomeración	Algunas	poco
Densidad aparente, %	55	35
Tasa de Enfriamiento, K/s	$10^4$	$10^5$
Segregación	Ligero	Despreciable
Oxidación, ppm	120	3000
Presión de Fluido, MPa	3	14
Velocidad del fluido, m/s	100	100
Eficiencia	Baja	Moderada

La operación hidrometalúrgica que forma polvo de cobre, comienza con la precipitación de cobre de cementación según se muestra en la Figura 1.17. El cobre de cementación se convierte en una pasta que a su vez pasan a unas celdas lixivadoras donde son lixivadas en oxígeno con una solución de sulfito de amonio. Después de la lixiviación, la solución pasa a un filtro de presión. La descarga clarificada es bombeada a un tanque de almacenamiento, desde el cual es alimentada a cualquiera de las dos autoclaves de reducción.

Un ciclo típico de reducción por hidrógeno requiere de una hora a 130 °C a una presión de hidrógeno de 425 psi. Antes de descargar un autoclave hay que permitir la sedimentación del polvo. Esta operación es llamada "Densificación del polvo". Durante este ciclo el ácido sulfúrico es regenerado y se forma polvo de cobre. El metal se precipita bajo las condiciones representadas por:



Después de la decantación de la solución y de la sedimentación del polvo, la pasta de cobre es luego deshidratada y lavada en un baño tipo centrífugo antes del secado. El secado es realizado en un secador rotativo que tiene una atmósfera controlada

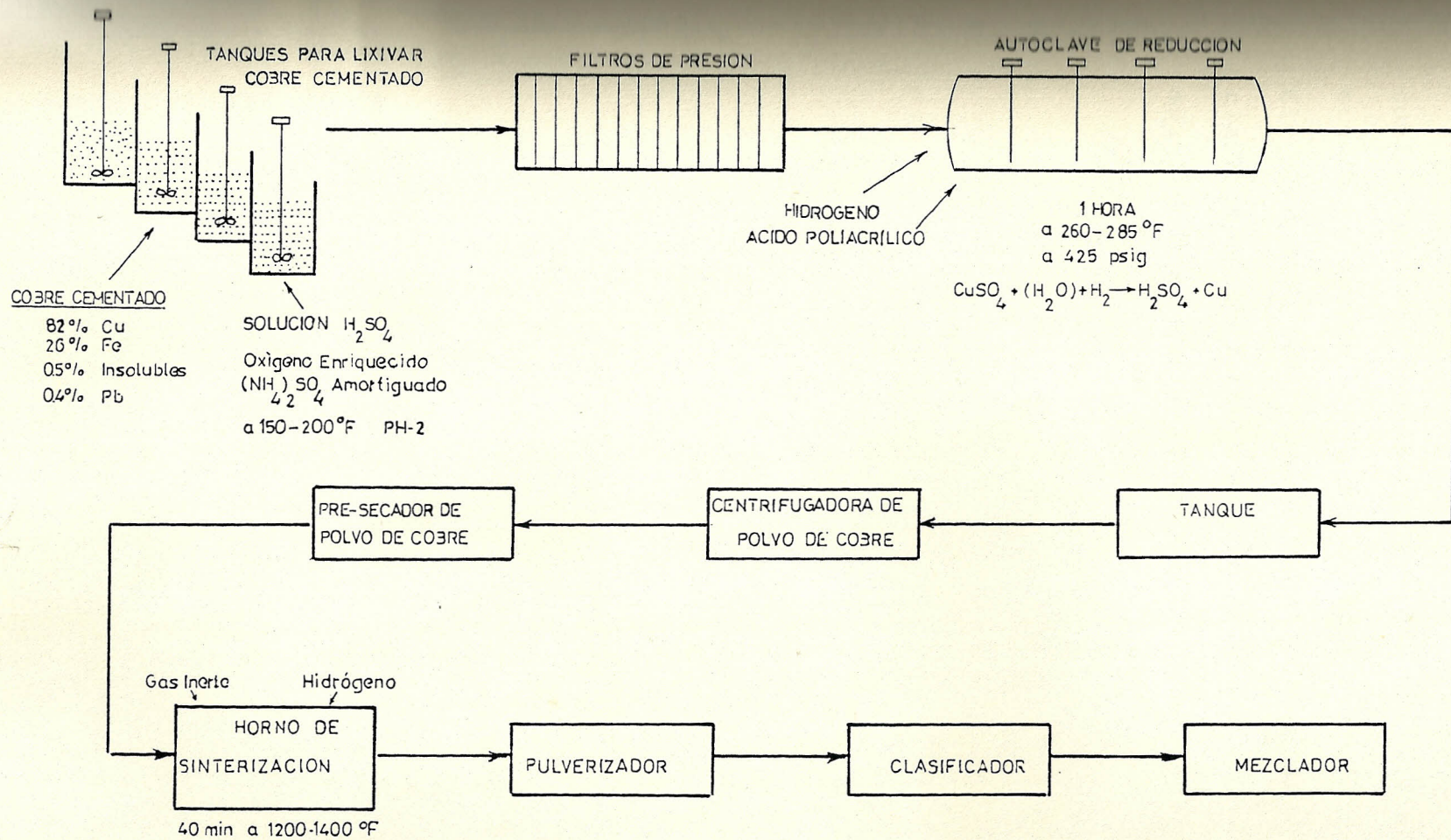


Fig 1.17 Proceso hidrometalúrgico para la producción de polvo de cobre



## CAPITULO II

### PRINCIPALES APLICACIONES DEL POLVO DE COBRE,

Los polvos de cobre y aleaciones a base de cobre se usan en una diversidad de aplicaciones pulvimetalúrgicas. El presente trabajo se hablará brevemente de las principales.

#### 2.1. BOCINES POROSOS AUTO-LUBRICADOS,

Los bujes y bocines pulvimetalúrgicos porosos auto-lubricados o permanentemente lubricados son los dos mejores ejemplos que pueden ser usados para ilustrar el original proceso pulvimetalúrgico. Sacrificios en algunas propiedades mecánicas resultan del uso de estas partes porosas, pero por el hecho de que los poros pueden ser usados como reservorios de aceite compensan las pérdidas anteriormente nombradas. Durante el uso, cuando el eje en un bocin auto-lubricado con aceite impregnado comienza a girar, se produce fricción, la temperatura aumenta, y el aceite sale fuera de los poros debido al gran coeficiente de expansión térmica del aceite comparado con el del metal y

debido al diferencial de presión hidrodinámica en la película del aceite entre el eje y el bocín. Cuando la rotación se detiene y el bocín se enfría, el aceite es re-absorbido por acción capilar.

Para la mayoría de bocines auto-lubricados, el lubricante contenido en los poros permanece intacto por todo el tiempo de vida del bocín. En algunas aplicaciones para trabajo pesado, es necesario colocar un reservorio de aceite que alimente aceite adicional a través de la pared del bocín. Las formas más comunes de bocines auto-lubricados se muestran en la Figura 2.1.

El material más ampliamente usado para bocines es el bronce 90Cu-10Sn con o sin adición de grafito. Después de la compactación se sinteriza a relativamente bajas temperaturas ( 750 a 830 °C ) por cortos periodos de tiempo ( generalmente 15 minutos ). Algunos cambios microestructurales ocurren durante este corto tiempo de sinterización, desde la formación de fase líquida del estaño a un bronce homogéneo fase alfa.

Estos bocines son grandemente usados en la industria automotriz, en electrodomésticos y en equipamiento industrial, como se indica en la Tabla IV. Estos bocines funcionan quedamente y pueden ser usados en posición vertical para lo cual los bocines sólidos

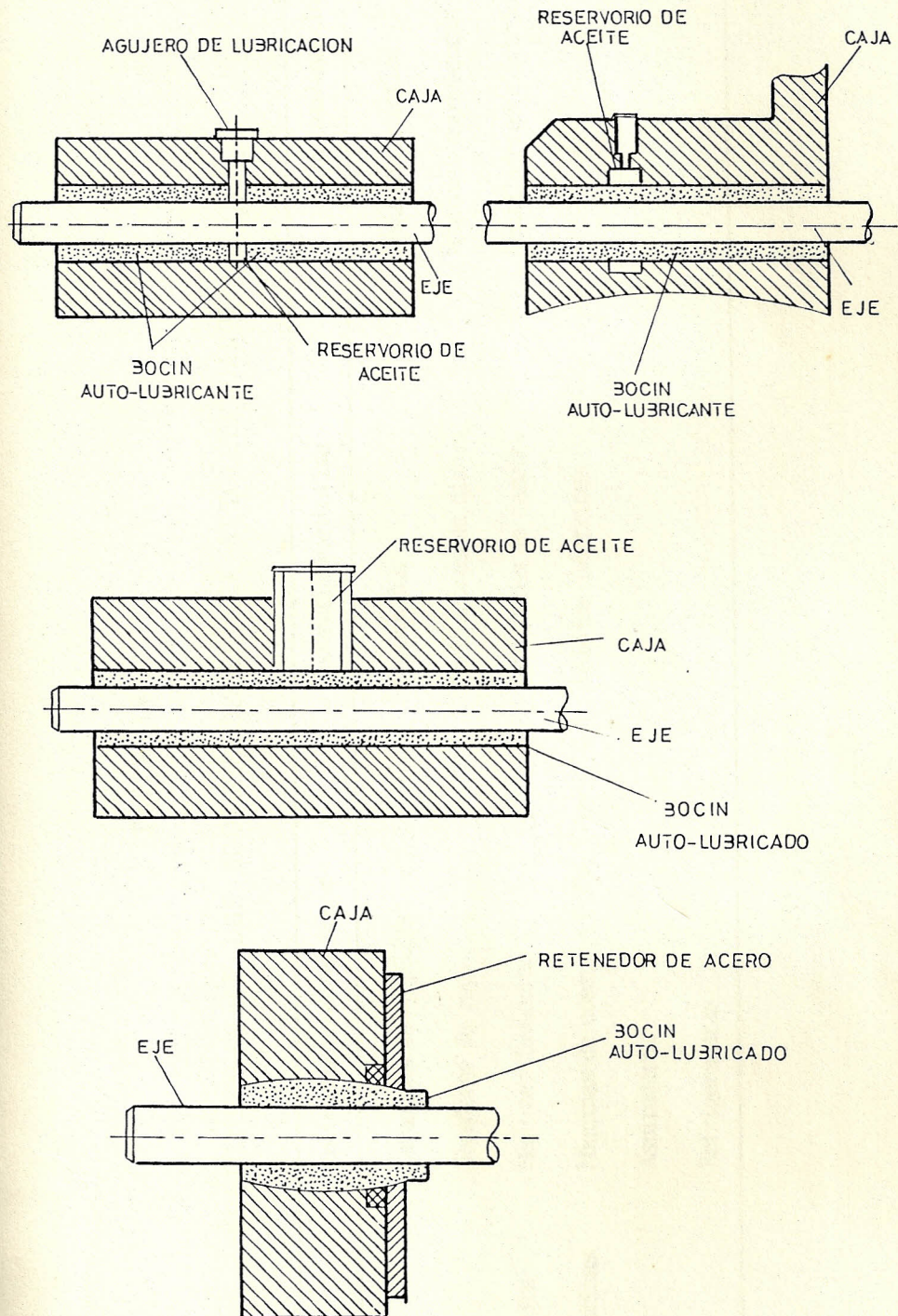


Fig. 2.1 Formas más comunes de bocines auto-lubricados

**TABLA IV**

APLICACIONES DE LOS BOCINES DE BRONCE AUTOLUBRICADOS

<b>Partes Automotrices</b>	<b>Aplicaciones en el hogar</b>	<b>Industria recreativa</b>	<b>Equipamiento Ind.</b>
Arrancadores	Lavadoras de vajillas	Fonógrafos	Máquinas textiles
Generadores	Secadoras de ropa	Cambiadores de discos	Máquinas empacadoras
bombas de agua y aceite	Máquinas lavadoras	Grabadores de cassette	Ventiladores eléctricos
Limpiadores de parabrisas	Máquinas de coser	Relojes eléctricos	
	Aspiradoras		
	Refrigeradoras		

son impracticables debido a que el lubricante se chorrea. Son particularmente útiles si la lubricación es difícil en esas partes, tales como en un motor de refrigerador o donde el aceite que salpicá puede interferir con la operación de la máquina.

Algunas ventajas y limitaciones de los bocines porosos de bronce están resumidas en la Tabla V.

## 2.2. BOCINES CON ASIENTO DE ACERO.

Después de los desarrollos que se produjeron a causa de la primera guerra mundial, la resistencia a la fatiga de los bocines de fundición blanca y bocines principales de máquinas de combustión interna, fue sustancialmente incrementada con el uso de una capa fina de babbit sobre una cáscara de acero enrollado. Futuros progresos necesarios para máquinas diessel, llevaron a la metalurgia de polvos como principal medio para sustituir una capa de cobre-plomo por la capa de metal blanco. Esta tecnología ha sido aun mas desarrollada hasta llegar a producir un amplio rango de materiales para bocines con asiento de acero y paredes gruesas adecuados para una gran variedad de condiciones de operación.

### 2.2.1. COBRE-PLOMO.

La aleación requerida es atomizada por gas o

TABLA V

VENTAJAS Y LIMITACIONES DE LOS BOCINES POROSOS DE BRONCE

<u>Ventajas</u>	<u>Limitaciones</u>
Auto-lubricación	Cargas de impacto y fatiga
Mínimo goteo de aceite	Tamaño del bocín
Se usan en posiciones inaccesibles	Forma
Barato	Composición

por baja presión de agua, y una capa de polvo es sinterizada en una lámina de acero (preferiblemente cobreada). La capa sinterizada es enrollada hasta hacerla de una densidad sólida, re-sinterizada y re-rolada, hasta un espesor que se pueda controlar. La dispersión resultante de la fase de plomo, con o sin estaño, tiene un rango que va desde el 40 al 10 %. En la Tabla VI se muestran cinco composiciones típicas, pero algunas composiciones intermedias también son recomendadas.

Tanto la resistencia a la corrosión como la conformabilidad de las aleaciones más duras son altamente incrementadas por una sobre-capa delgada (generalmente no más de 0.001 pulg = 0.025 milímetros) de una aleación plateada rica en estaño en la superficie del bocin.

La aleación número 5 en la Tabla VI es ampliamente usada para bocines de pequeño diámetro, sujetos a cargas de impacto. La aleación número 4 es usada para arandelas de empuje de alta velocidad, bocines de turbinas, bombas y forraduras de árbol de levas. Las aleaciones números 1 y 3 son

TABLA VI

COMPOSICIONES TIPICAS PARA BOCINES COBRE-PLOMO

No.	Cobre	Plomo	Estaño	Dureza
1	60	40	--	25-35 HV
2	70	30	--	30-45 HV
3	75	24	1	40-50 HV
4	74	22	4	45-60 HV
5	80	10	10	60-80 HV

típicas para bocines de cigueñales.

### 2.2.2. BOCINES SECOS.

En vez de impregnar la capa porosa de bronce con plomo es impregnada con una composición plástica. El polvo metálico es generalmente bronce esférico ( cobre-11Sn ) y una capa de alrededor de 0.3 mm. de espesor es sinterizada sobre un asiento de acero. La porosidad resultante ( alrededor de 35 % ) puede ser impregnada con una variedad de composiciones de bajo desgaste y baja fricción, la mayoría de los cuales son basados en teflón ( politetrafluoretileno ) con polvo de plomo mezclado o disulfato de molibdeno. El espesor de la capa plástica sobre las esferas de bronce es controlada para dar una cantidad finita de desgaste, y para la mayor parte de la vida del bocin seco, la superficie cauchosa es una mezcla de bronce y plástico. Esto se ilustra en la Figura 2.2.

Se verá que la razón del desgaste es baja pero finita y no hay medios para rellenar las superficies gastadas. Por las mismas razones no se recomienda maquinar las superficies de trabajo después de la instalación. La función

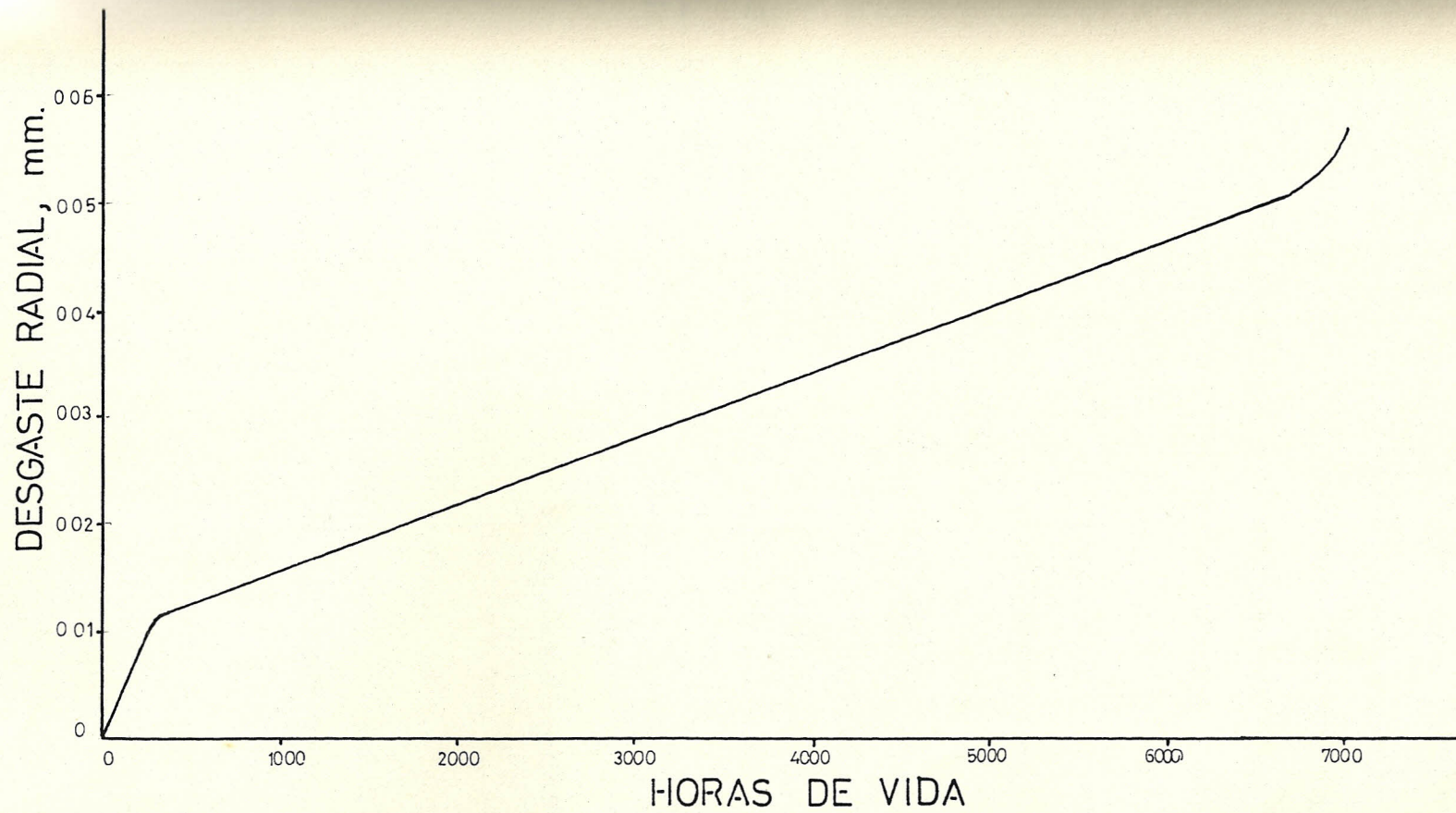


Fig 2.2 Desgaste del bocín en función de las horas de vida

del bronce es principalmente disipar el calor de fricción y actuar como una jaula que contiene al plástico y que soporta la carga del bocin. Sin embargo, hay evidencia para decir que el bronce también desarrolla un papel químico en las complejas reacciones de superficie que ocurre con el plomo y el teflón durante el encauchado. La Figura 2.3 es una sección transversal a través del espesor de la pared, y muestra el asiento de acero, las esferas de bronce y el plástico infiltrado.

### 2.3. PARTES PULVIMETALÚRGICAS DE COBRE DE ALTA CONDUCTIVIDAD.

Fig. 2.3. Sección transversal de un bocin de bronce seco con alietileno.

El uso de partes pulvimetalúrgicas de cobre puro, principalmente en aplicaciones eléctricas y electrónicas, no es aún muy definida, aunque sin embargo los datos del proceso de alaboración y propiedades requeridas para obtener alta conductividad eléctrica han sido utilizados dentro de los diez últimos años. Es esencial utilizar polvos de cobre muy puros o producir la precipitación de impurezas durante la sinterización.

Si estas precauciones se toman en cuenta es posible obtener valores de resistencia y conductividad mostradas en la Figura 2.4. Para una porosidad dada,

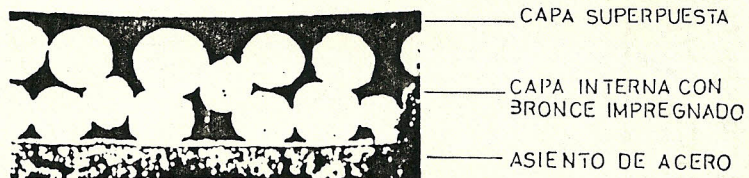


Fig 2.3 Sección transversal de un bocín de bronce seco con plástico infiltrado

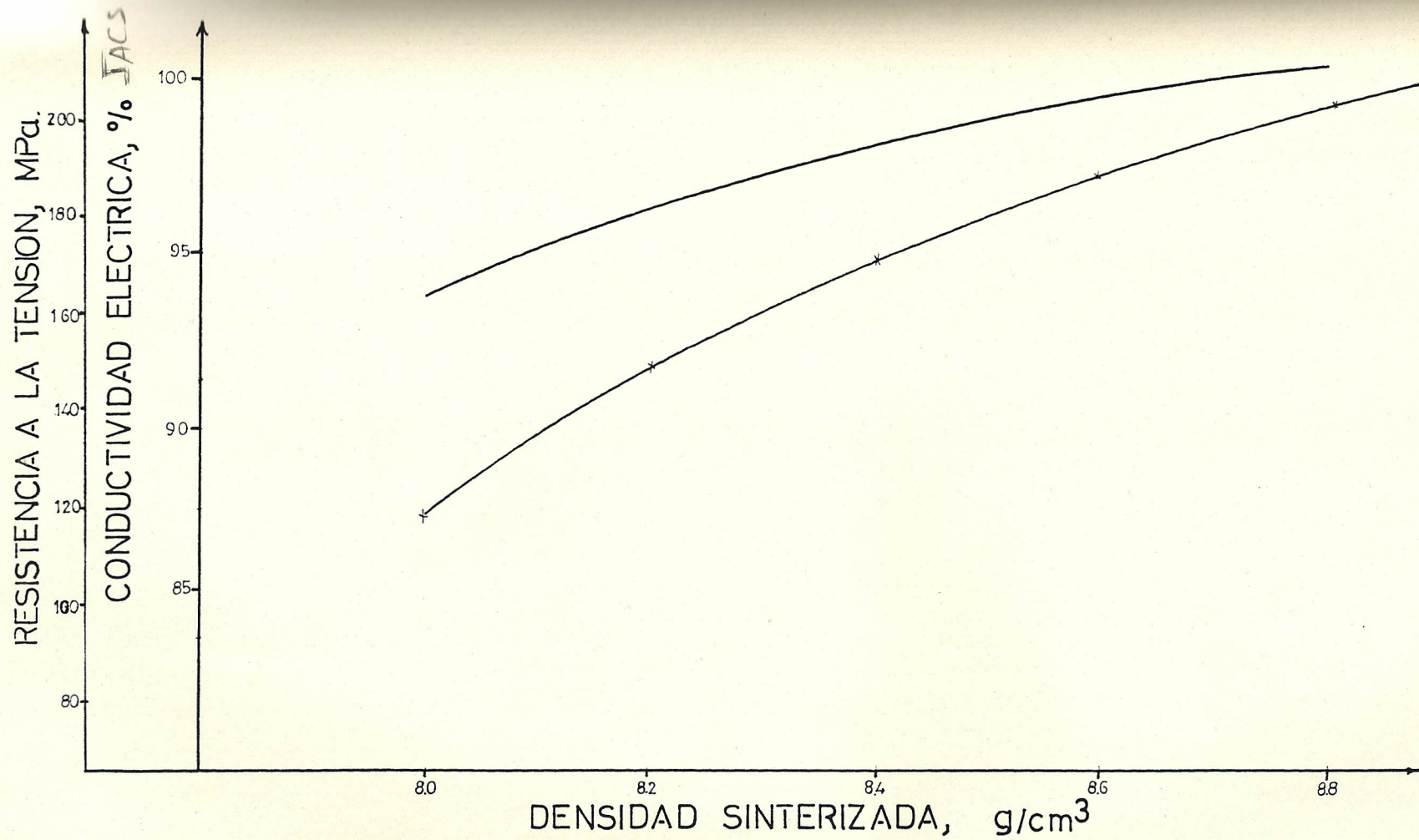


Fig 2.4 Efecto de la densidad sobre la conductividad eléctrica y la resistencia a la tensión

la conductividad eléctrica de una parte de cobre poroso depende de las características del poro, como por ejemplo: Poros pequeños, esféricos son preferibles que poros largos, elongados. Densidades máximas son alcanzadas por presión en ambas direcciones. Las aplicaciones típicas incluyen anillos conmutadores, contactos, bobinas auxiliares de arranque y enchufes eléctricos de vuelta. Los polvos de cobre también son usados con grafito en escobillas para motores y generadores, partes móviles para reóstatos, etc.

## CAPITULO III

### PRESIONADO Y SINTERIZADO DEL POLVO DE COBRE

#### 3.1. CONSOLIDACION.

La consolidación del polvo de cobre es usualmente ejecutada en un dado cerrado, sin embargo otras formas, tales como presionado en caliente, presión isostática, extrusión y forja pueden usarse.

Cuando la presión es aplicada se produce:

- (1) Rearreglo de las partículas con una mínima deformación
- (2) Compresión elástica entre los contactos de las partículas
- (3) Deformación plástica en los contactos que forman grandes áreas y
- (4) Deformación masiva de la masa total del polvo.

De acuerdo al polvo utilizado se requieren diferentes presiones de compactación. Por ejemplo, para partes pulvimetalúrgicas de cobre puro se usan presiones de compactación relativamente bajas. Estas

están en el rango de 205 a 250 MPa ( 15 a 18 tsi ) para secciones ligeras, sin embargo se usan altas presiones para secciones pesadas. Las presiones recomendadas y las razones de compresión para cobre y aleaciones de cobre estan resumidas en la Tabla VII.

Cuando el polvo es compactado en un dado, los esfuerzos dentro del compacto resultante no son iguales. Esta distribución de esfuerzos es causada por la fuerza de fricción del polvo sobre la pared del dado y también en menor grado por la fricción de una partícula del polvo moviéndose sobre otra. Esto crea una variación de densidad dentro del compacto, la cual puede ser reducida por la compresión del polvo en ambas direcciones. La Figura 3.1 muestra la distribución de densidad resultante en una compactación simple y doble. En la práctica comercial, la presión es aplicada en ambos lados del compacto para minimizar la variación de la densidad.

La distribución de la densidad es altamente dependiente de la razón L/D ( longitud del compacto al diámetro del compacto ). La variación de la densidad se minimiza reduciendo la razón L/D.

Hay también una limitación práctica para el espesor de un compacto ya que la columna del polvo es considerablemente más alta que la parte final. Esta

TABLA VII

PRESIONES DE COMPACTACION Y RAZON DE COMPRESION DE VARIAS PARTES PULVIMETALURGICAS DE COBRE

PARTES PULVIMETALURGICAS	PRESION DE COMPACTACION		RAZON DE COMPRESION
	MPa	tsi	
Partes de Bronce	414-689	30-50	2.4-2.6 a 1
Bocines de Bronce	193-275	14-20	2.5-2.7 a 1
Escobillas de Cobre-Grafito	345-414	25-30	2.0-3.0 a 1
Partes de Cobre Puro	206-248	15-18	2.6-2.8 a 1

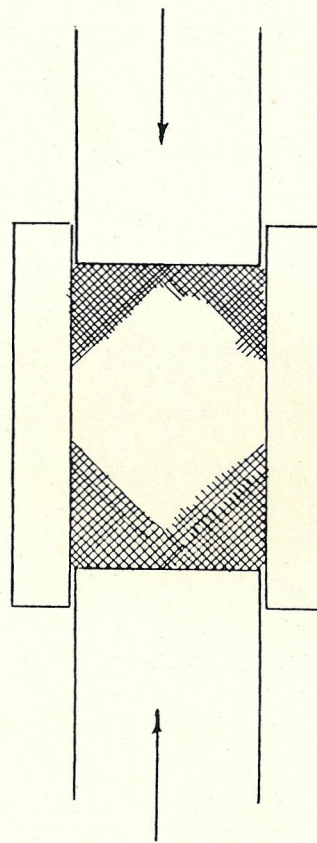
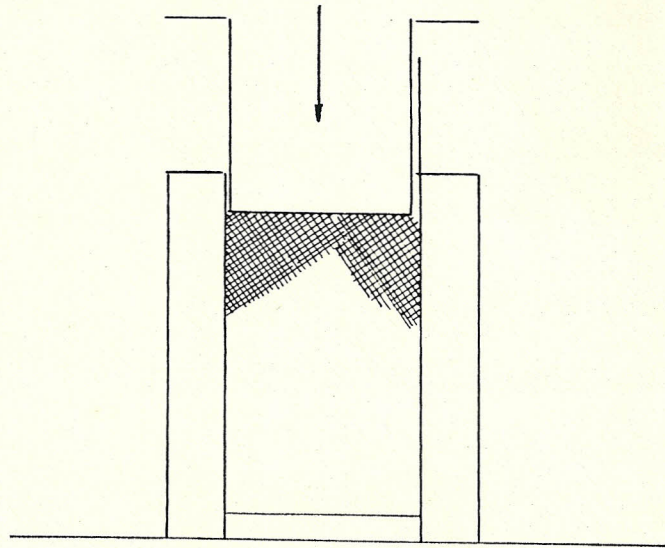


Fig. 3.1 Esquema de una compactación simple y doble

razón del polvo al compacto final conocida como "Razon de Compresion" se define de la siguiente manera: "El volumen del polvo suelto al volumen del compacto final". Ya que el área de un dado es constante, la razón de compresión es la razón de los espesores.

### 3.1.1. INTERDEPENDENCIA DE LAS PROPIEDADES EN VERDE SOBRE LAS CARACTERISTICAS DEL POLVO Y VARIABLES DE COMPACTACION.

Estas características se presentan en las Figuras 3.2 a 3.5. Esas Figuras describen formas generales. La Figura 3.2 muestra la relación entre la densidad en verde y la presión de compactación. La densidad se incrementa agudamente con la aplicación inicial de presión, pero tiende a nivelarse a altas presiones. Cuando el compacto se aproxima a la densidad teórica, se incrementa la dificultad para realizar futuros perfeccionamientos en la densidad, aun con grandes cambios en la presión. Esto es debido al incremento de restricciones en el movimiento de las partículas y por el hecho de que los materiales se endurecen con el trabajo, de modo que una futura deformación es obtenida a expensas de la aplicación

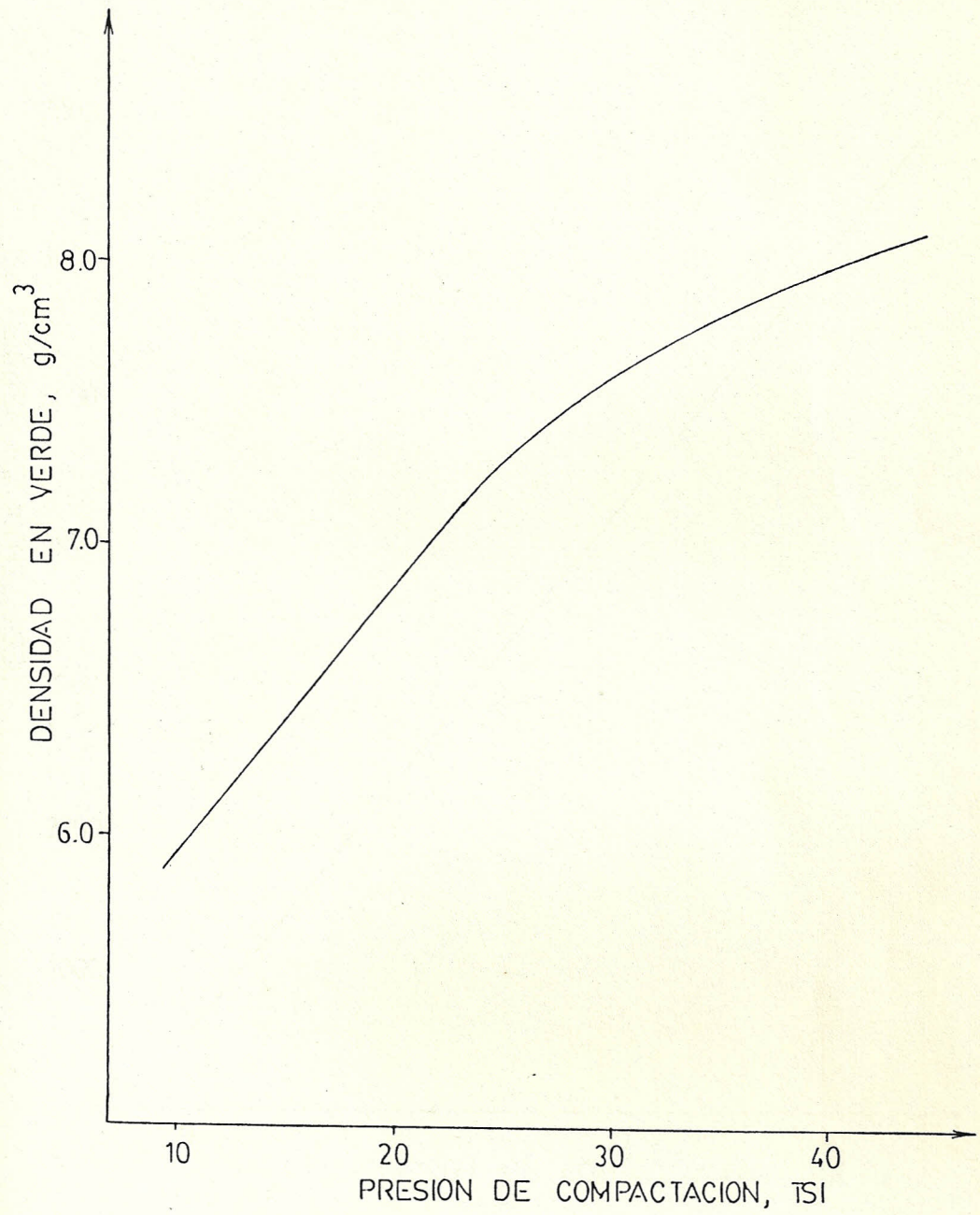


Fig. 3.2 Relación entre la densidad en verde y la presión de compactación

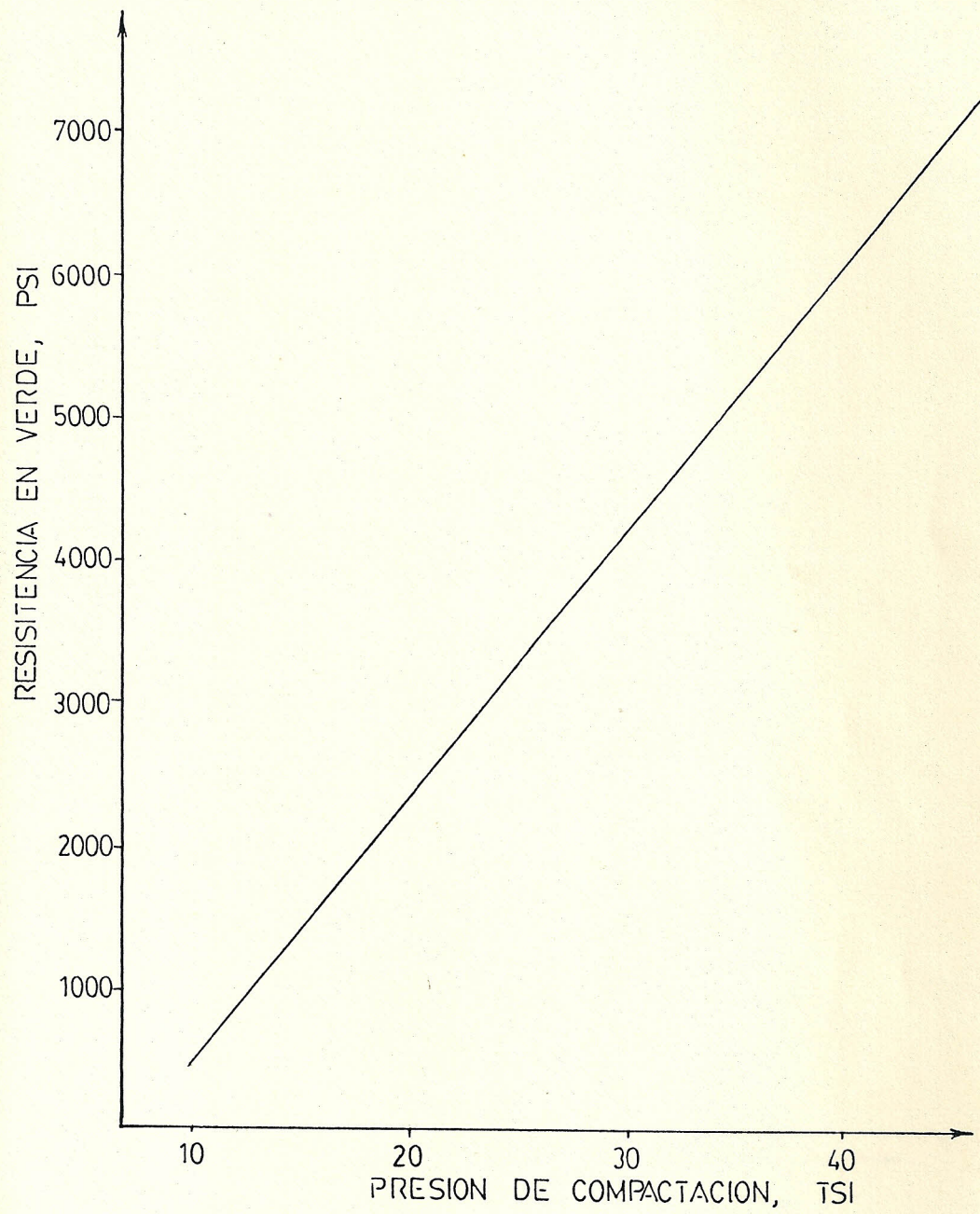


Fig. 3.3 Relación entre la resistencia en verde y la presión de compactación

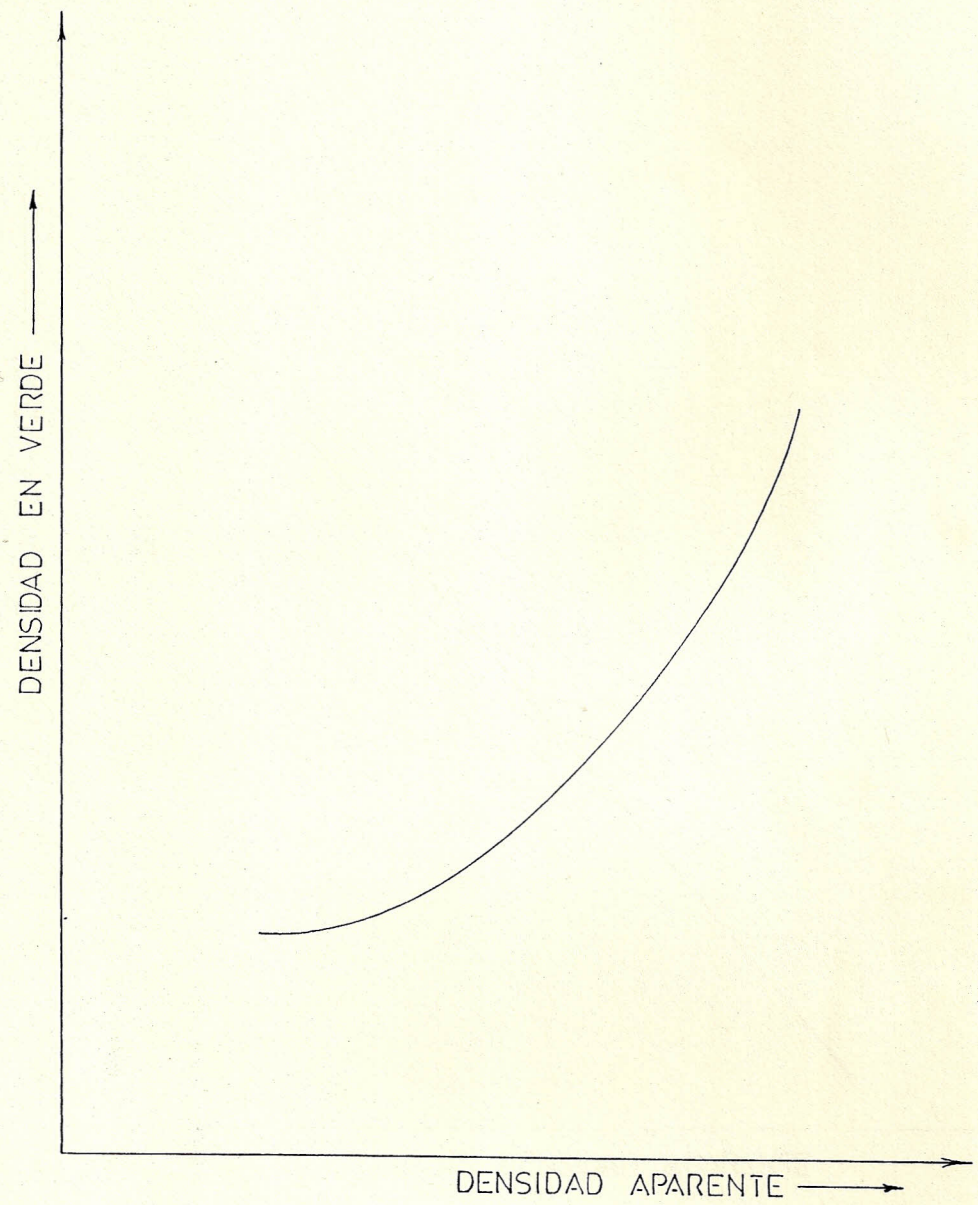


Fig. 3.4 Relación entre la densidad en verde y la densidad aparente

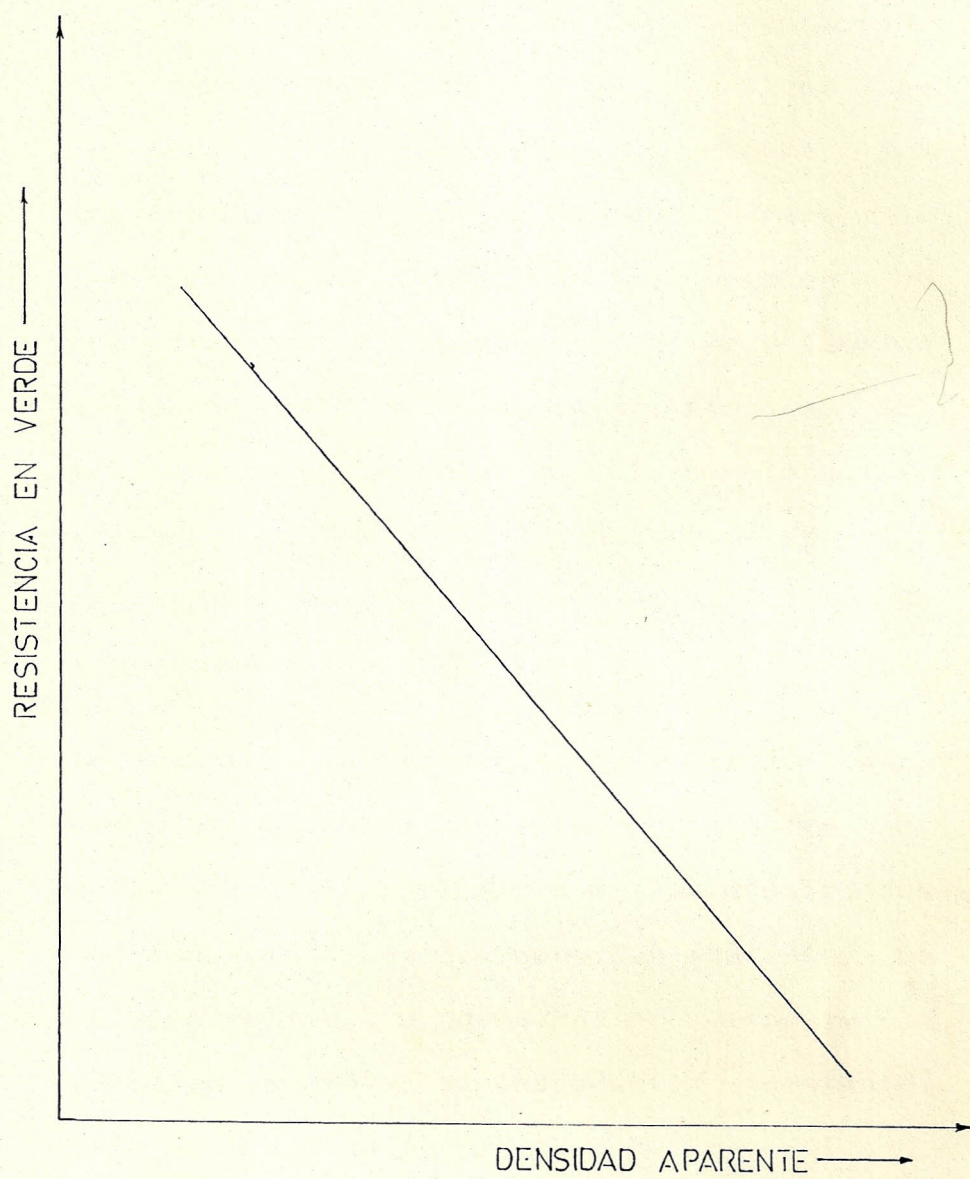


Fig. 3.5 Relación entre la resistencia en verde y la densidad aparente

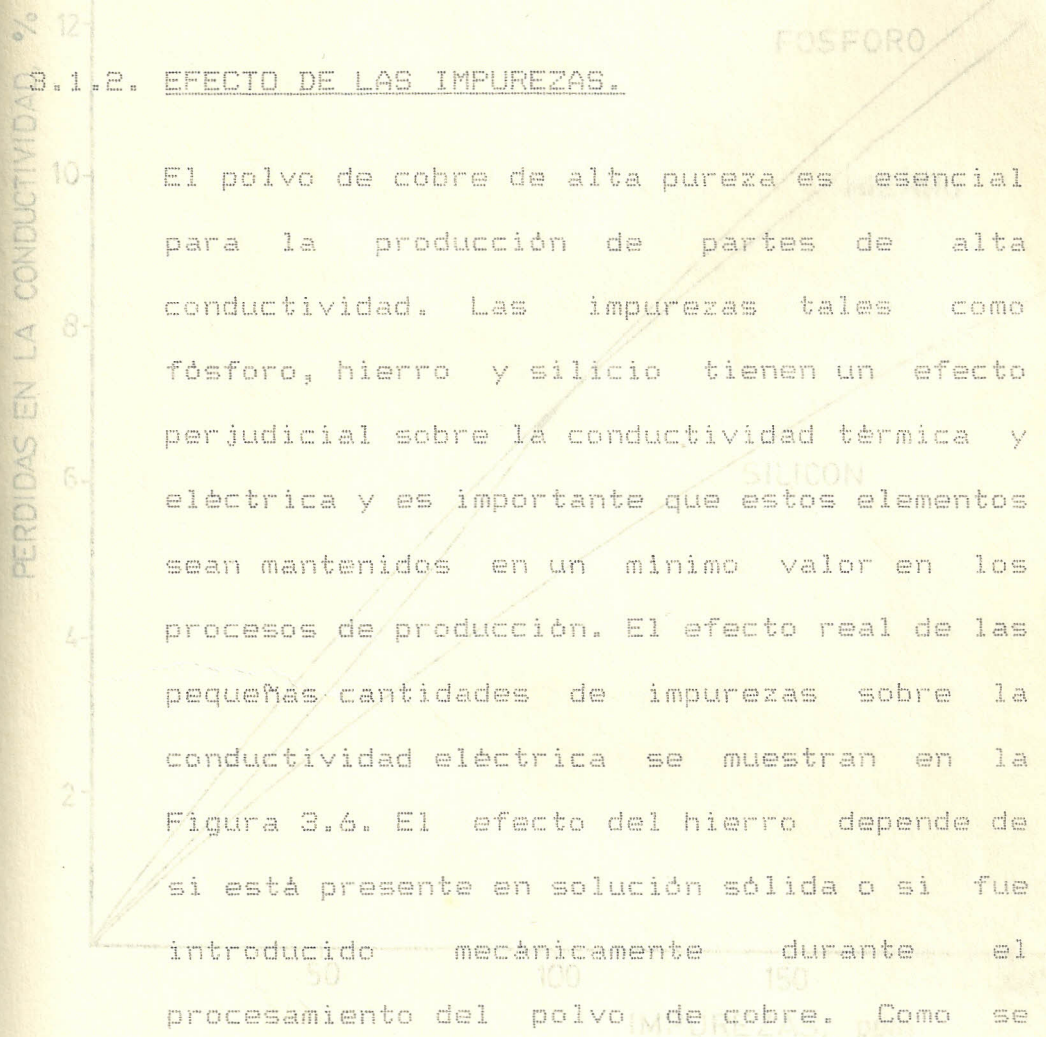
desproporcionada de presión.

Bajo las mismas condiciones de compactación, la resistencia en verde continúa su incremento, sin embargo. La Figura 3.3 muestra una relación lineal entre la resistencia en verde y la presión de compactación. La resistencia en verde también es dependiente de las características del polvo, y se incrementa con el aumento de la irregularidad en la geometría de las partículas debido al mejor enlazamiento de las mismas.

De tantas características usadas para describir un polvo específico, la única que tiene una mejor influencia en las propiedades del compactado es la densidad aparente. La relación entre la densidad en verde y la densidad aparente, a una presión constante, está mostrada en la Figura 3.4.

La dependencia de la resistencia en verde sobre la densidad aparente está ilustrada en la Figura 3.5. Como en la Figura 3.4, esta curva es obtenida a presión constante y muestra que la resistencia en verde se incrementa con el decremento de la densidad aparente. En la práctica comercial,

frecuentemente se usan polvos especiales con densidad aparente baja para mejorar la resistencia en verde. Esta resistencia también se incrementa con el aumento de la densidad en verde, como se muestran en las Figuras 3.2 y 3.3.



### 3.1.2. EFECTO DE LAS IMPUREZAS.

El polvo de cobre de alta pureza es esencial para la producción de partes de alta conductividad. Las impurezas tales como fósforo, hierro y silicio tienen un efecto perjudicial sobre la conductividad térmica y eléctrica y es importante que estos elementos sean mantenidos en un mínimo valor en los procesos de producción. El efecto real de las pequeñas cantidades de impurezas sobre la conductividad eléctrica se muestran en la Figura 3.6. El efecto del hierro depende de si está presente en solución sólida o si fue introducido mecánicamente durante el procesamiento del polvo de cobre. Como se muestra en la Figura 3.7, si el hierro está en solución sólida, como en el caso del cobre forjado, éste tiene un efecto más drástico en la reducción de la conductividad eléctrica.

### 3.1.3. EFECTO DEL LUBRICANTE.

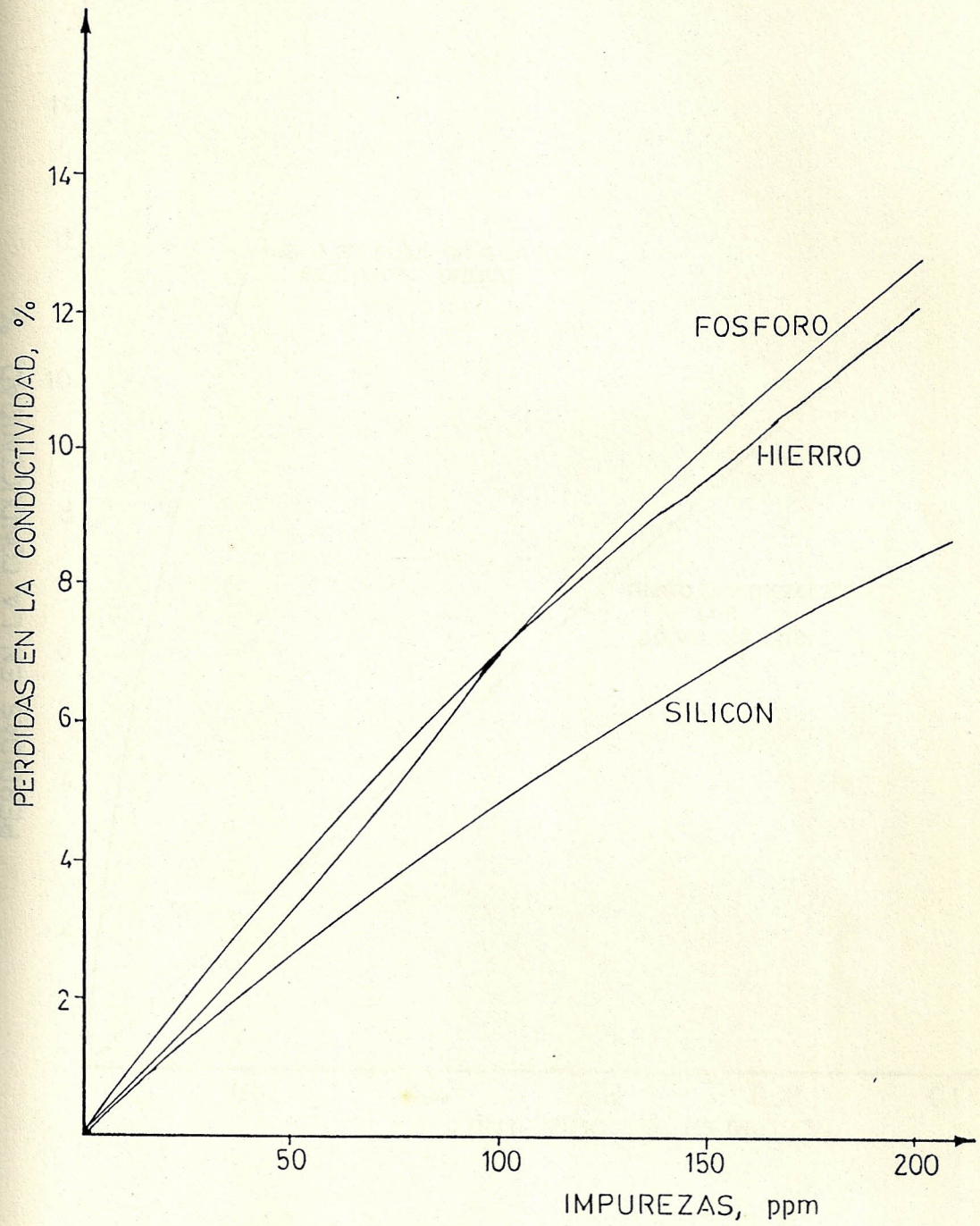


Fig. 3.6 Efecto de las impurezas sobre la conductividad eléctrica

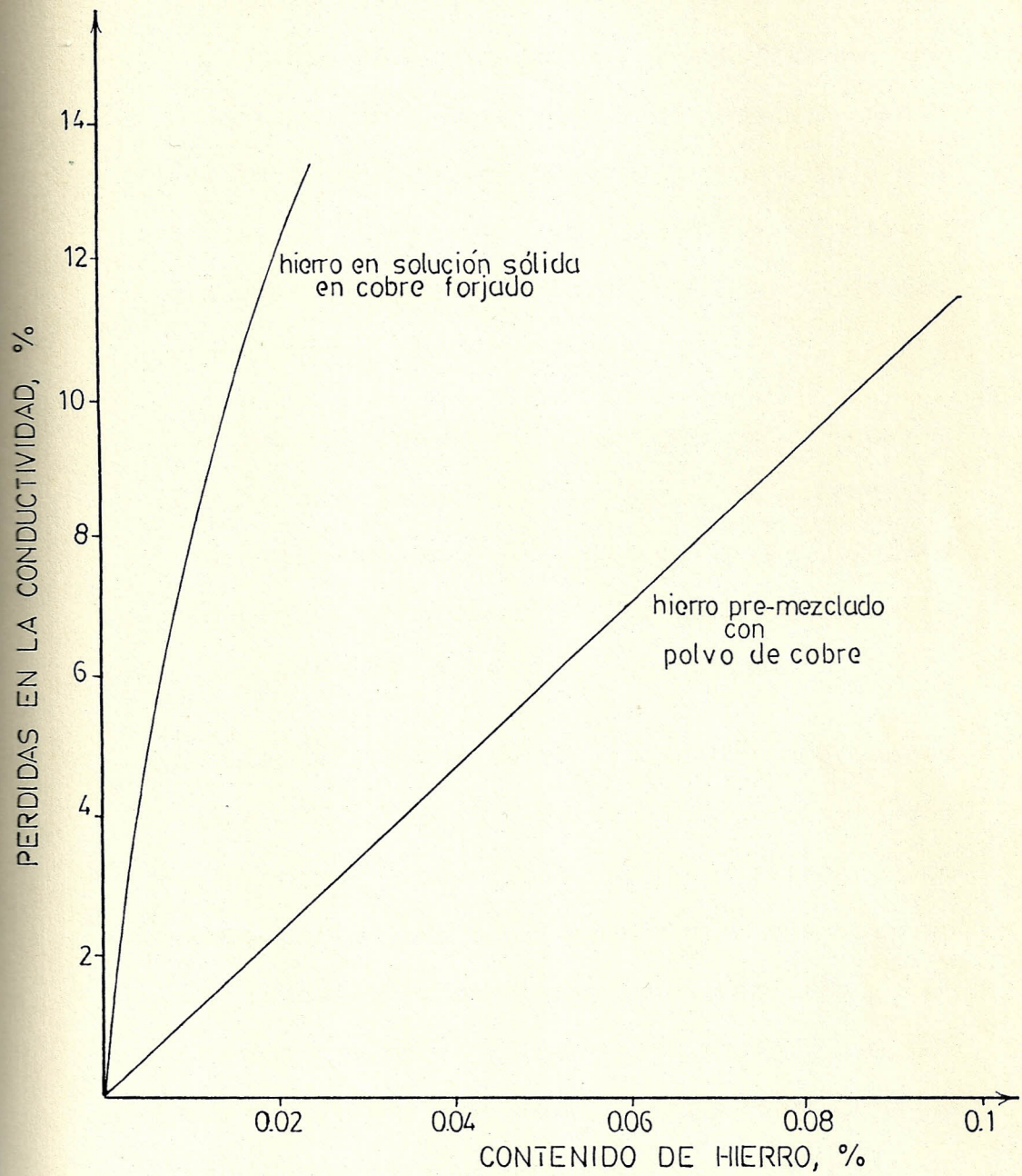


Fig. 3.7 Efecto del hierro sobre la conductividad eléctrica

La práctica pulvimetalúrgica requiere que un lubricante sea introducido en el proceso de consolidación. Esto se hace generalmente mediante lubricación de la pared del dado o a través de lubricantes mezclados con el polvo, sin embargo la segunda alternativa es de más común acceso.

Los lubricantes son necesarios para reducir la fricción interna la cual ocurre durante el rearreglo de las partículas del polvo, y para reducir la fricción del compacto contra la pared del dado durante la eyección.

La Figura 3.8 indica el efecto del lubricante sobre la presión de eyección para dos diferentes niveles de presión de compactación. Si bien los lubricantes pueden ser indeseables porque ellos interfieren con ciertos aspectos de compactación y sinterización, hay una cantidad mínima de lubricante requerido para permitir la eyección del compacto desde el dado. La cantidad dependerá de la presión de compactación y del material del dado, incluyendo su composición, dureza y acabado superficial.

Fig. 3.8 Efecto del lubricante sobre la presión de eyección

La adición de lubricantes generalmente se

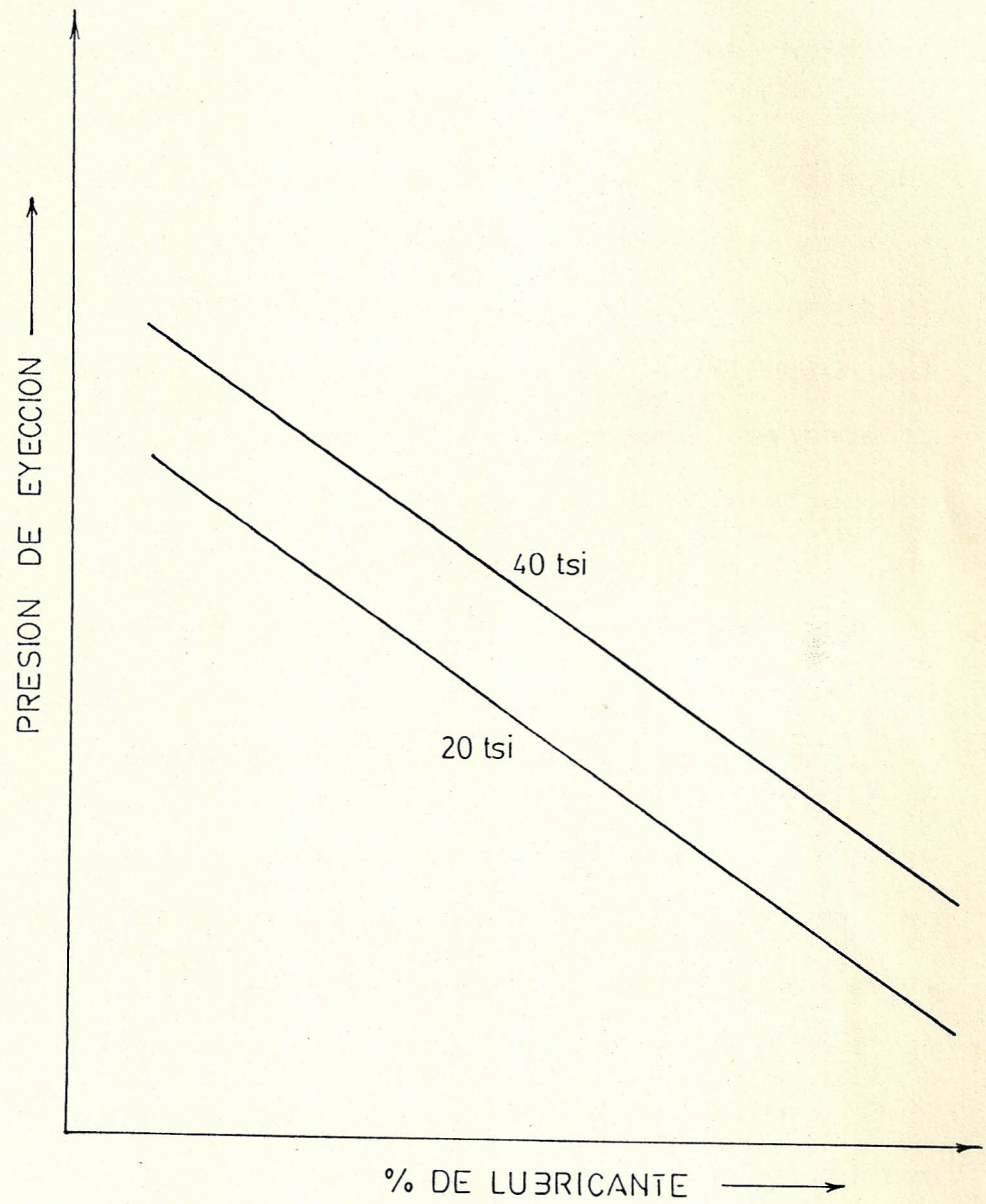


Fig. 3.8 Efecto del lubricante sobre la presión de eyección

RESISTENCIA EN VERDE  
 COMPRESIBILIDAD

basan sobre un porcentaje en peso, y el rango típico va desde 0.5 a 1 %. Ya que la gravedad específica del lubricante usado es bastante baja, un pequeño porcentaje en peso representa mas bien un considerable volumen. La adición de 1 % de lubricante ( en peso ) limita la máxima densidad teórica obtenible. Esta condición resulta de la disminución del peso del compacto ( a un volumen constante ), siempre y cuando el proceso de consolidación elimine completamente la porosidad. La densidad máxima de un compacto en verde es menor que la densidad máxima obtenible del mismo compacto después del sinterizado.

Cuando un lubricante es mezclado con un polvo metálico, éste afecta las propiedades en verde. La relación entre el lubricante, resistencia en verde y compresibilidad es mostrada esquemáticamente en la Figura 3.9.

El incremento inicial en la compresibilidad es seguido por un decremento en la densidad en verde. Note que hay una concentración óptima de lubricante la cual debe ser determinada experimentalmente. La resistencia en verde es reducida generalmente al aumentar

Fig. 3.9 Efecto del lubricante sobre la resistencia en verde y compresibilidad del compacto en verde, ya que el lubricante interfiere con el enclavamiento

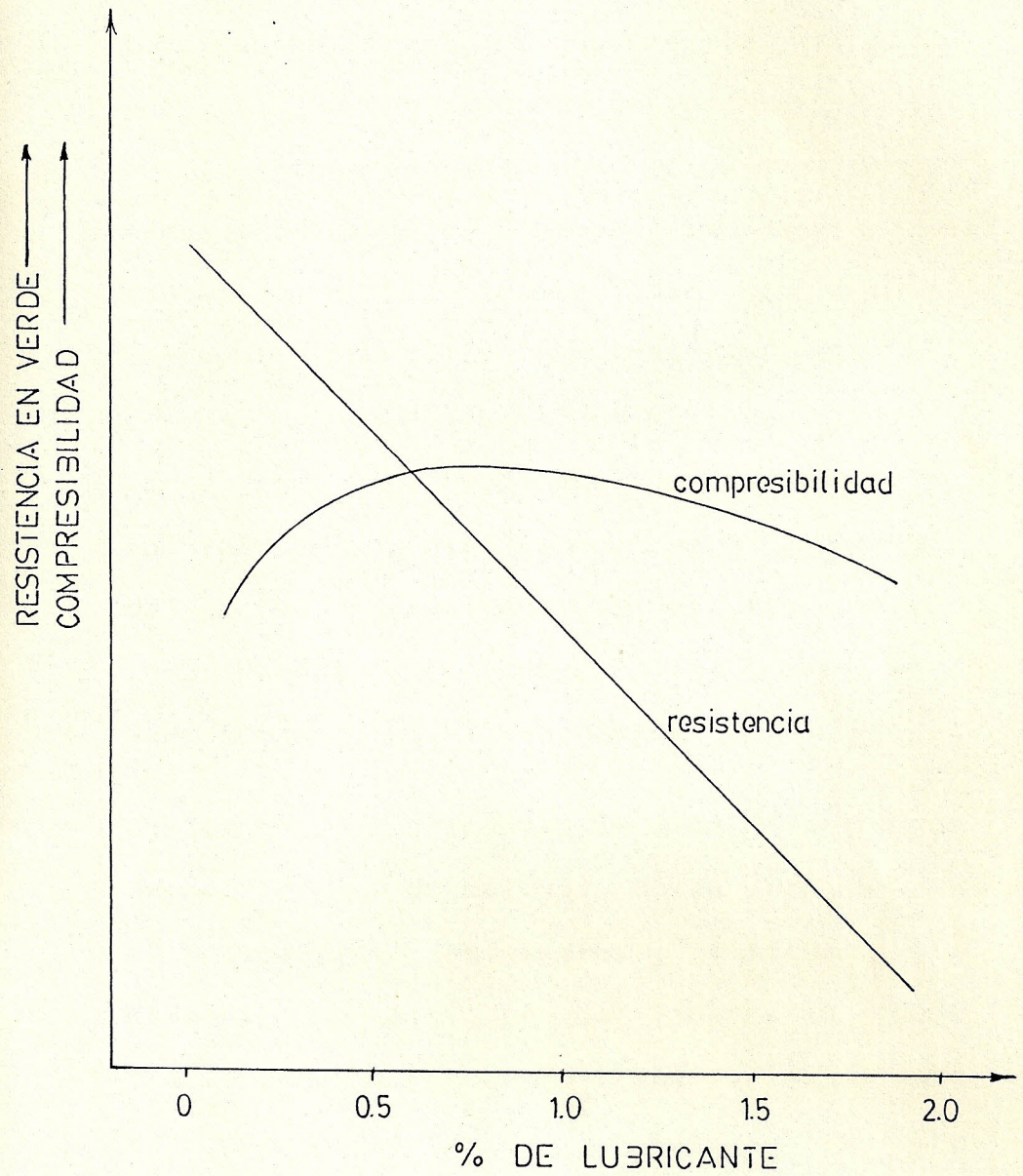


Fig. 3.9 Efecto del lubricante sobre la resistencia en verde y compresibilidad

mecánico de las partículas del polvo.

Es también importante notar el efecto de los lubricantes mezclados sobre la densidad aparente. Hay un pequeño incremento inicial en la densidad aparente, seguido de un marcado decremento conforme se aumenta el contenido de lubricante. Así, es posible conseguir una alta densidad aparente con polvos no lubricados bajo una crítica concentración. Pequeñas cantidades de lubricante ayudan en el rearreglo y embalaje del polvo. Esta cantidad es sin embargo insuficiente para reducir la presión de eyección a un nivel razonable.

Dos tipos de lubricantes se usan generalmente en metalurgia de polvos: ceras o parafinas sintéticas y estearatos metálicos. El estearato de litio en particular, es usado frecuentemente con cobre y materiales a base de cobre. El efecto de los lubricantes sobre las cargas de compactación y propiedades en verde para un bronce ( 90Cu-10Sn ) se muestran en la Tabla VIII. No existe un lubricante ideal y su selección debe hacerse basado sobre las propiedades más importantes para el uso. Por ejemplo: el lubricante tipo

TABLA VIII

EFECTO DEL LUBRICANTE SOBRE LAS PROPIEDADES EN VERDE

TIPO DE LUBRICANTE	CARGA (lbs)	RESISTENCIA EN VERDE (psi)	PRESION DE EYECCION (lbs)
CERA	12000	2150	1800
ESTEARATO DE LITIO	10500	1050	1600
ESTEARATO DE CINC	12000	1250	2000
ESTEARATO DE CALCIO	11000	1300	1800

Adición de Lubricante: 0.75 %

Densidad en Verde : 6.16 g/cm<sup>3</sup>

Material : Cu-10Sn

cera da una alta resistencia en verde, pero requiere relativamente grandes presiones de compactación y las presiones de eyección son indeseables. El estearato de litio por otro lado tiene muy baja compactación y baja presión de eyección pero también una baja resistencia en verde.

### 3.2. SINTERIZACION.

La sinterización es un proceso en el cual las partículas de una masa de polvo son enlazadas por atracción atómica o molecular en un estado sólido por calentamiento. Las etapas de la sinterización están ilustradas en las Figuras 3.10 y 3.11 y son las siguientes:

- (1) Enlazamiento inicial
- (2) Crecimiento de gargantas
- (3) Poros cerrados
- (4) Poros redondeados
- (5) Contracción de poros ( densificación ).

La Figura 3.12 muestra la densificación progresiva de compactos de polvo de cobre como una función de tiempo y temperatura.

La tasa de sinterización tiene un efecto pronunciado sobre las propiedades de los compactos y pueden ser modificados por tratamientos físicos o químicos del

Fig 7

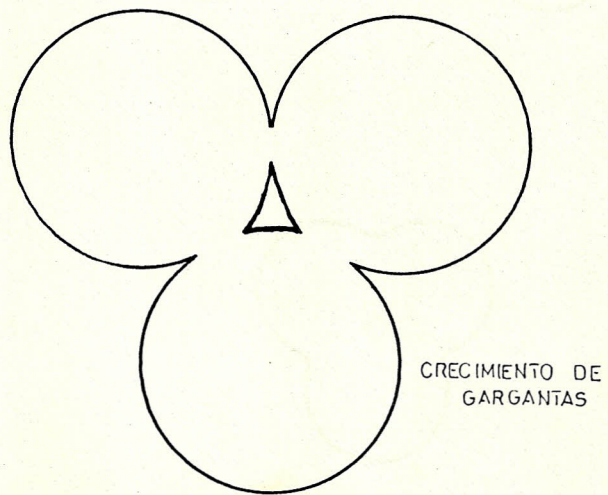
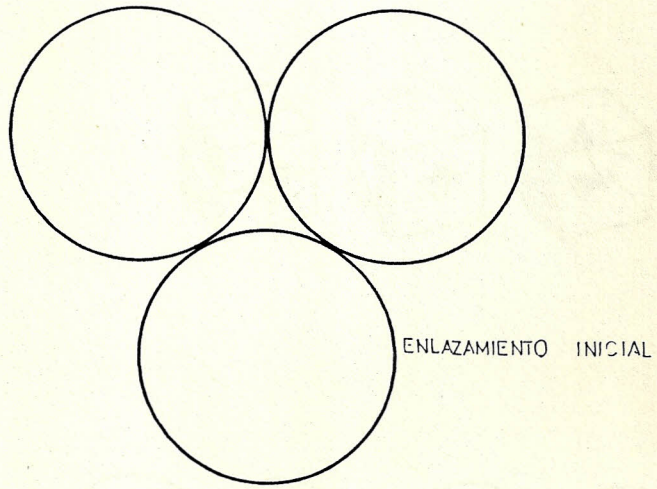
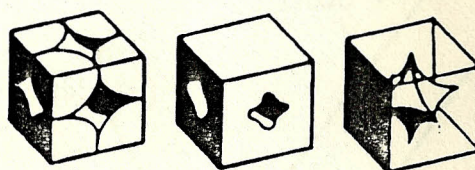


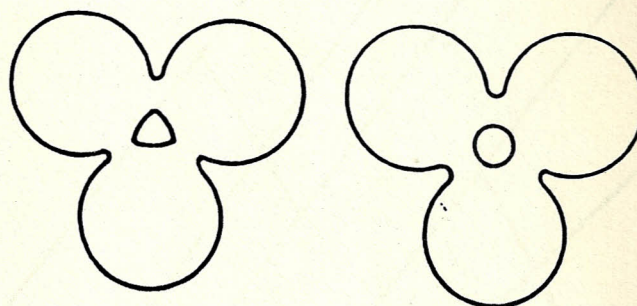
Fig. 3.10 Etapas de la sinterización

*Fig 8*

CERRAMIENTO DE  
POROS



REDONDEO DE  
POROS



CONTRACCION DE  
POROS

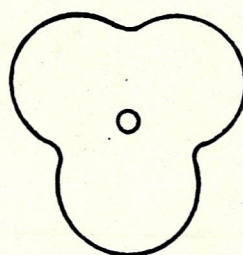


Fig 3.11 Etapas de la Sinterización

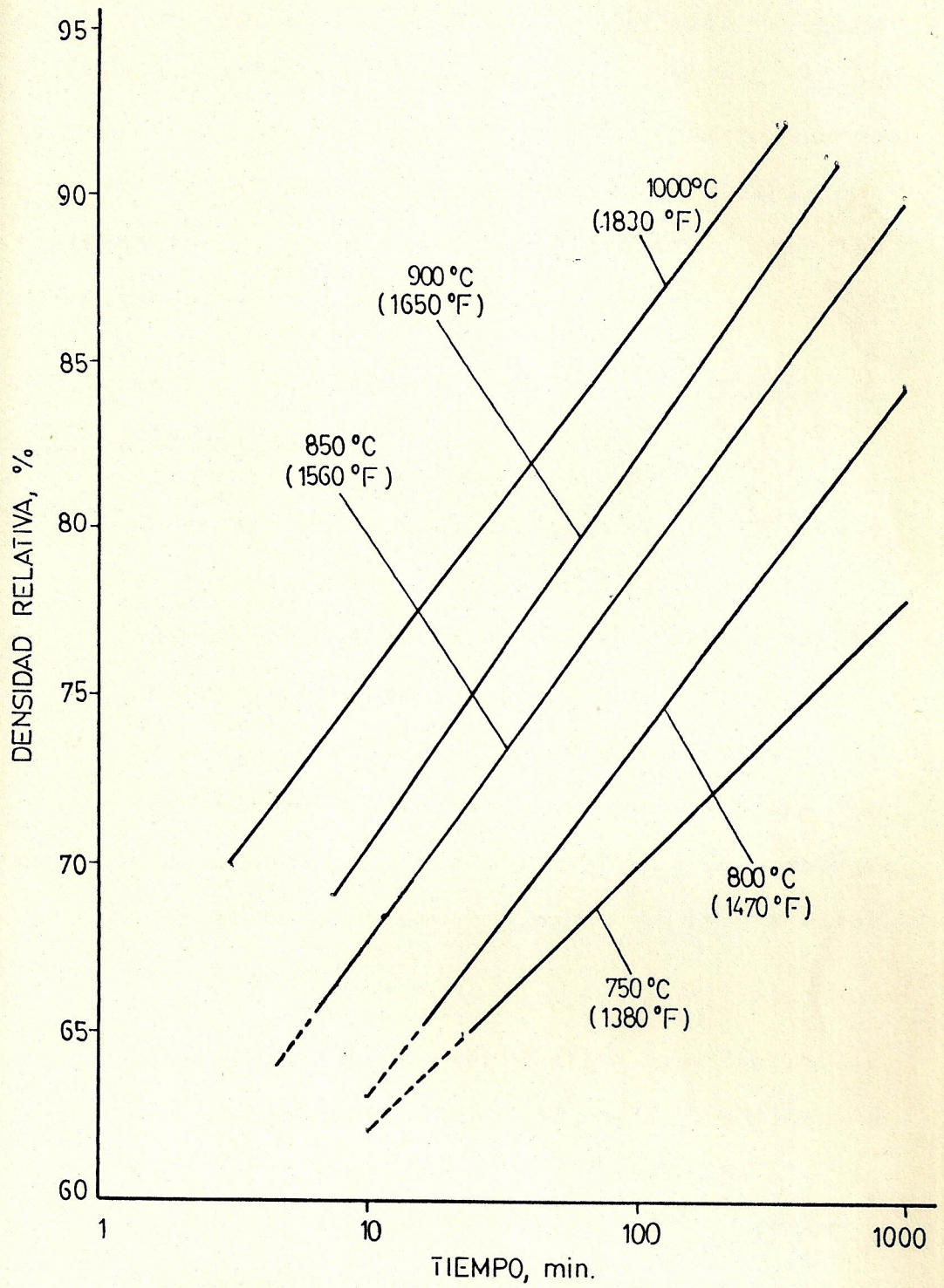


Fig 3.12 Efecto de la temperatura y tiempo de sinterización sobre la densificación de compactos de polvo de cobre

polvo o de los compactos, o por la adición de gases reactivos en la atmósfera de sinterización. Estos tratamientos son conocidos como " Sinterización Activada ". La activación mejora la densificación, resistencia y conductividad eléctrica de los compactos.

### 3.2.1. EFECTO DE LA TEMPERATURA Y TIEMPO DE SINTERIZACION.

En el proceso de sinterización, el tiempo y la temperatura actúan en el mismo sentido. El alargamiento del tiempo de calentamiento mejora la coherencia mecánica de un compacto para una cierta temperatura; al elevar la temperatura la coherencia mejora para un cierto periodo de calentamiento. Sin embargo, el efecto del tiempo es menos marcado a altas temperaturas.

Las fuerzas de sinterización como tales no son marcadamente afectadas por la temperatura y, la expresión " temperatura de sinterización " no tiene significancia fundamental. Debe comprenderse que la " temperatura de sinterización " variará con todas las influencias perturbadoras antes mencionadas, también con la sensibilidad del instrumento de medida. Puede decirse, sin

embargo, que la gran parte del trabajo experimental realizado en conexión con la sinterización de polvos metálicos ha involucrado la determinación de una temperatura de sinterización. El proceso de sinterización no tiene límite para una temperatura definida; el límite bajo es gobernado por el hecho que, por razones prácticas, el tiempo no puede ser extendido indefinidamente. El límite de temperatura superior es determinado por la completa fusión del compacto o por ciertos otros cambios tales como evaporación, transformaciones alotrópicas, solubilidad de gas excesiva, etc.

La densidad de un compacto de polvo metálico, y sus propiedades tales como resistencia a la tensión y elongación, tienden a incrementarse con el aumento de la temperatura y tiempo de sinterización, sin embargo, los efectos de esas condiciones sinterizadoras sobre las propiedades físicas están influenciadas considerablemente por la presión de compactación previamente aplicada.

Así, los polvos sueltamente apilados o ligeramente comprimidos por lo general

muestran un rápido incremento en la densidad y en las propiedades mecánicas, mientras que los polvos compactados a muy altas presiones frecuentemente muestran un decrecimiento en la densidad con el incremento de la temperatura de sinterización. Las Figuras 3.13, 3.14 y 3.15 presentan la densidad, resistencia a la tensión y dureza como una función de la temperatura de sinterización. En la Tabla IX se indican los rangos de "temperaturas de sinterización" y "temperaturas de sinterización preferidas" para polvos de aleación de cobre.

### 3.2.2. CAMBIO EN LA DIMENSION Y DENSIDAD.

Los cambios dimensionales están determinados como la diferencia entre los compactos verdes y los compactos sinterizados, paralelo y perpendicular a la dirección de presión, y se expresan en porcentajes de las dimensiones en verde. El cambio dimensional de gran importancia es aquel que hay entre las dimensiones del dado y el compacto sinterizado en la dirección radial, esto es en la dirección perpendicular a la presión.

Fig 3.13 Variación de la densidad en función de la temperatura de sinterización. Las densidades en verde y sinterizadas son las razones de las masas a sus volúmenes en

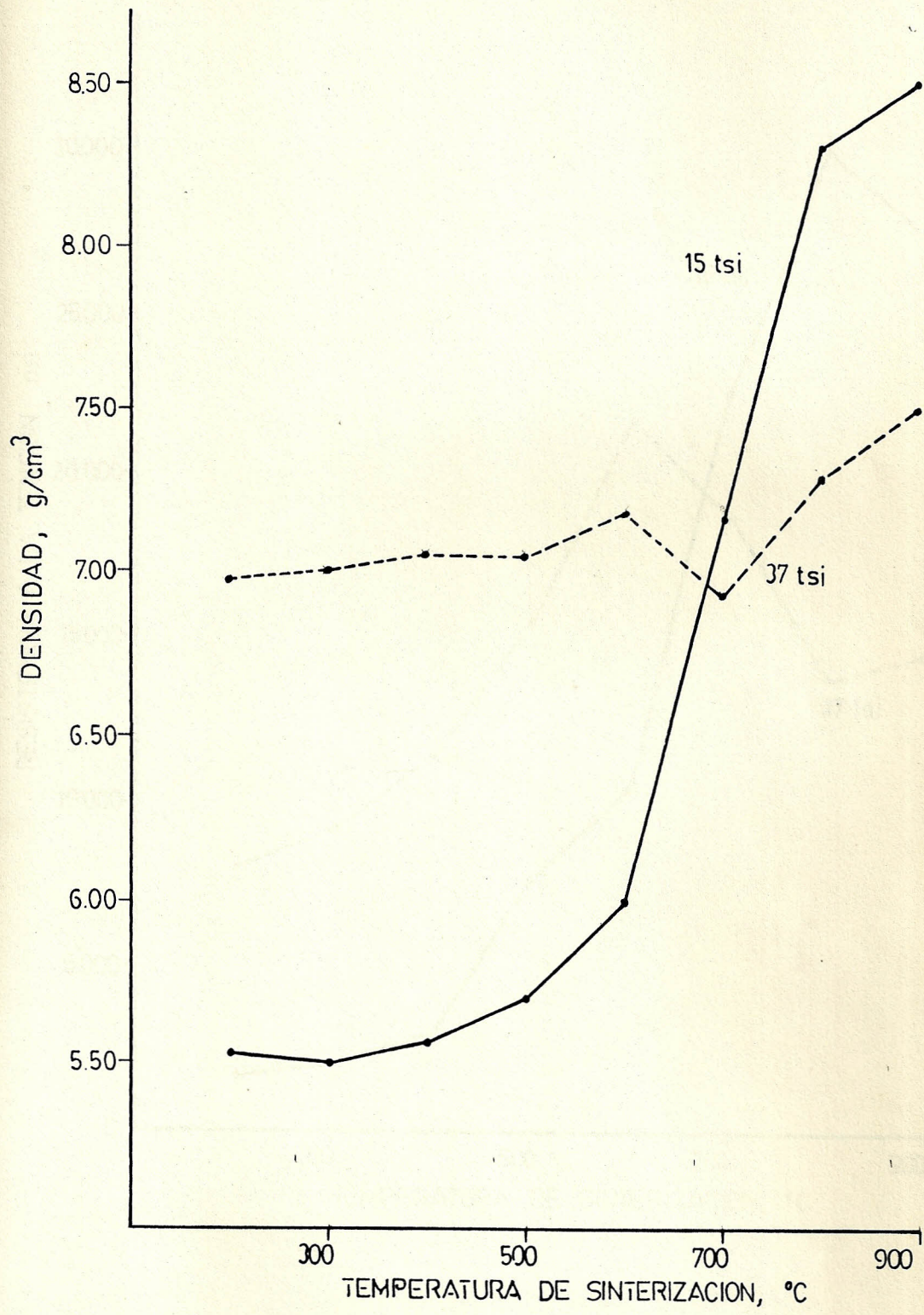


Fig 3.13 Variación de la densidad en función de la temperatura de de sinterización

Aug 70

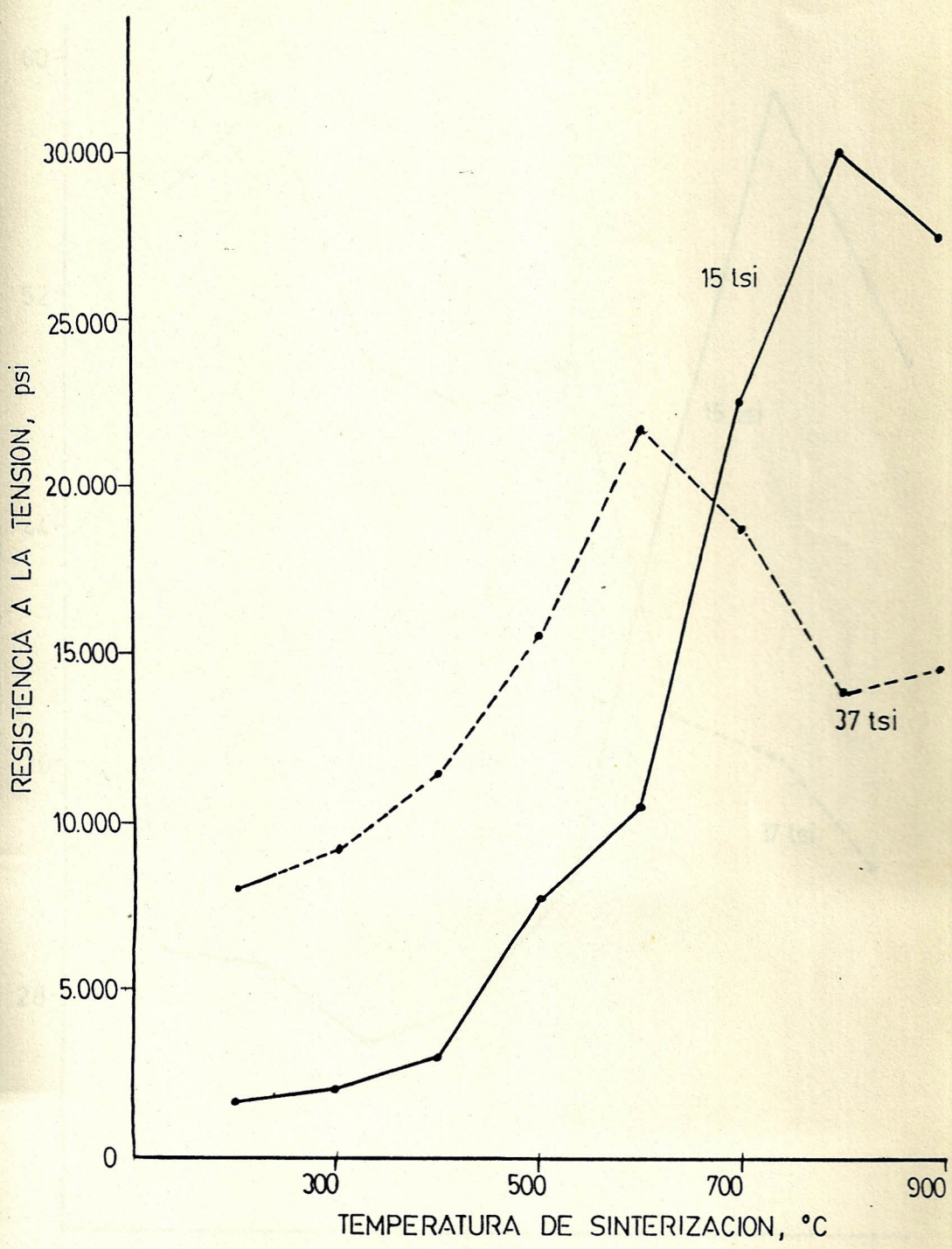


Fig 3.14 Variación de la resistencia a la tensión en función de la temperatura de sinterización .

Fig 3.15

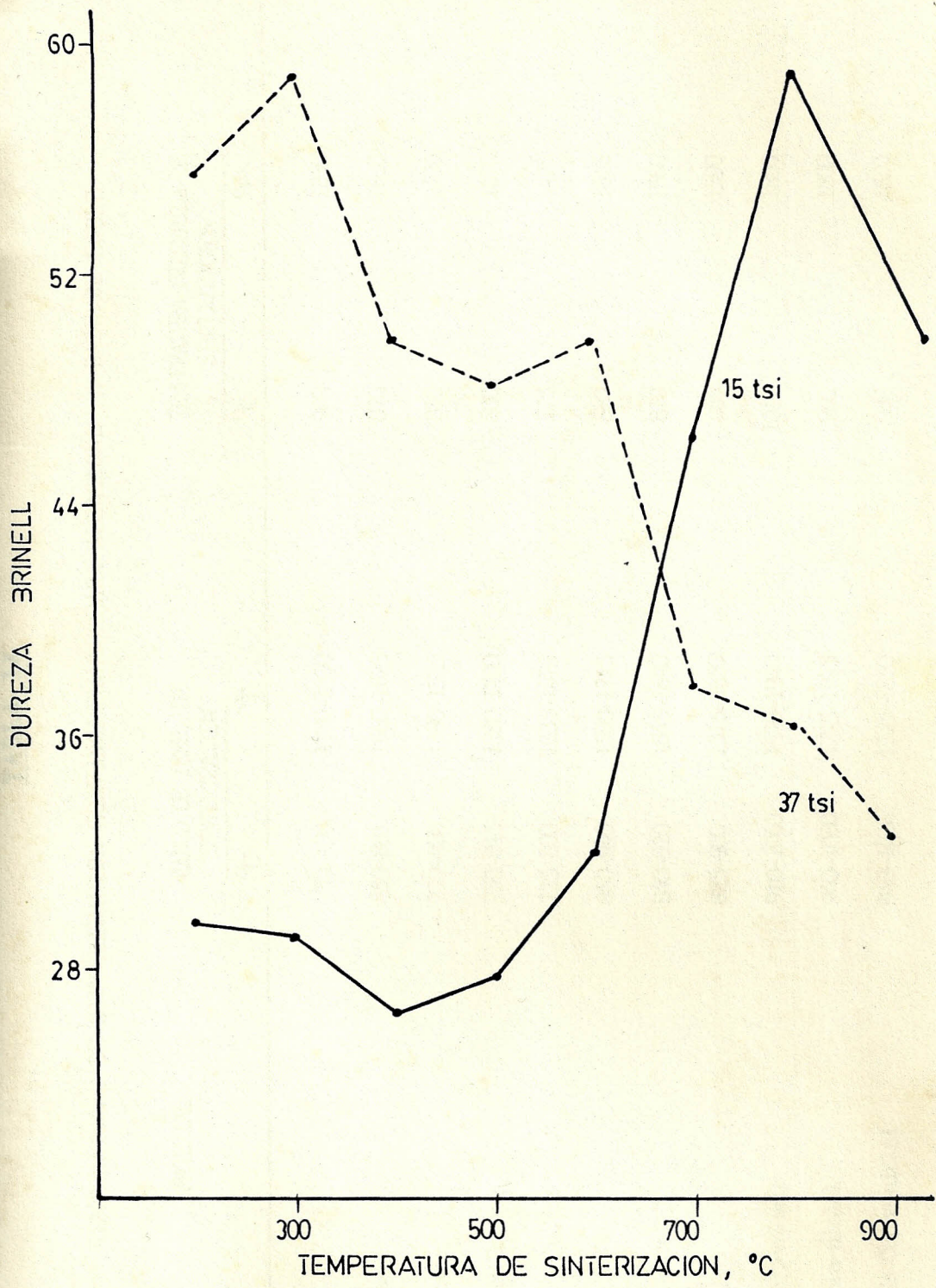


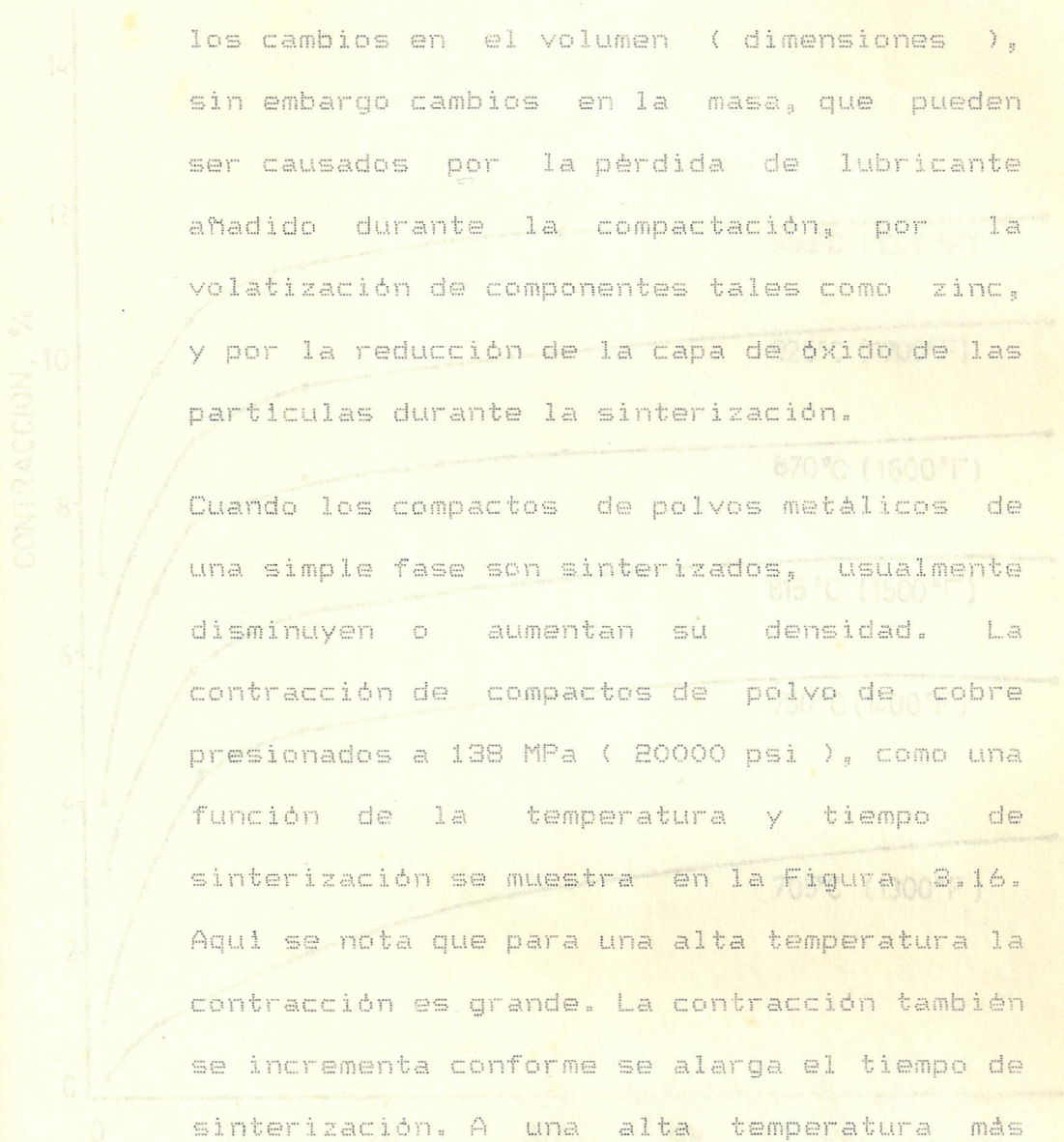
Fig 3.15 Variación de la dureza en función de la temperatura de sinterización

**TABLA IX**

TEMPERATURAS DE SINTERIZACION CONVENCIONALES PARA ALEACIONES A BASE DE COBRE

MATERIAL	RANGO DE TEMP. DE SINTERIZACION		TEMPERATURA PREFERIDA DE SINTERIZACION	
	°C	°F	°C	°F
Cobre	750-1000	1380-1830	900	1650
90-5 Cu-Sn Bronce	850-885	1560-1625	870	1600
90-10 Cu-Sn Bronce	750-830	1380-1525	810	1490
88-10-2 Cu-Sn-Zn Bronce	750-815	1380-1500	800	1470
88-10-2 Cu-Sn-Pb Bronce	725-800	1335-1470	775	1425
90-10 Brass	860-940	1580-1725	880	1615
80-20 Brass	840-920	1545-1690	870	1600
70-30 Brass	825-900	1515-1650	865	1590
90-10 Cu-Ni cupro-nickel	910-1060	1670-1940	1010	1850
70-30 Cu-Ni cupro-nickel	940-1080	1725-1975	980	1800
70-25-5 Cu-Ni-Sn Cupro-nickel	940-1010	1725-1850	980	1800

las condiciones verdes y sinterizadas, dados en g/cm<sup>3</sup>. Los cambios en la densidad durante la sinterización son primeramente debido a los cambios en el volumen (dimensiones), sin embargo cambios en la masa, que pueden ser causados por la pérdida de lubricante añadido durante la compactación, por la volatilización de componentes tales como zinc, y por la reducción de la capa de óxido de las partículas durante la sinterización.



Cuando los compactos de polvos metálicos de una simple fase son sinterizados, usualmente disminuyen o aumentan su densidad. La contracción de compactos de polvo de cobre presionados a 138 MPa ( 20000 psi ), como una función de la temperatura y tiempo de sinterización se muestra en la Figura 3.16. Aquí se nota que para una alta temperatura la contracción es grande. La contracción también se incrementa conforme se alarga el tiempo de sinterización. A una alta temperatura más rápido decrece la tasa de contracción. Por lo

Fig 3.16 tanto, altas densidades sinterizadas pueden obtenerse más fácilmente incrementando la temperatura de sinterización que alargando el tiempo de sinterización.

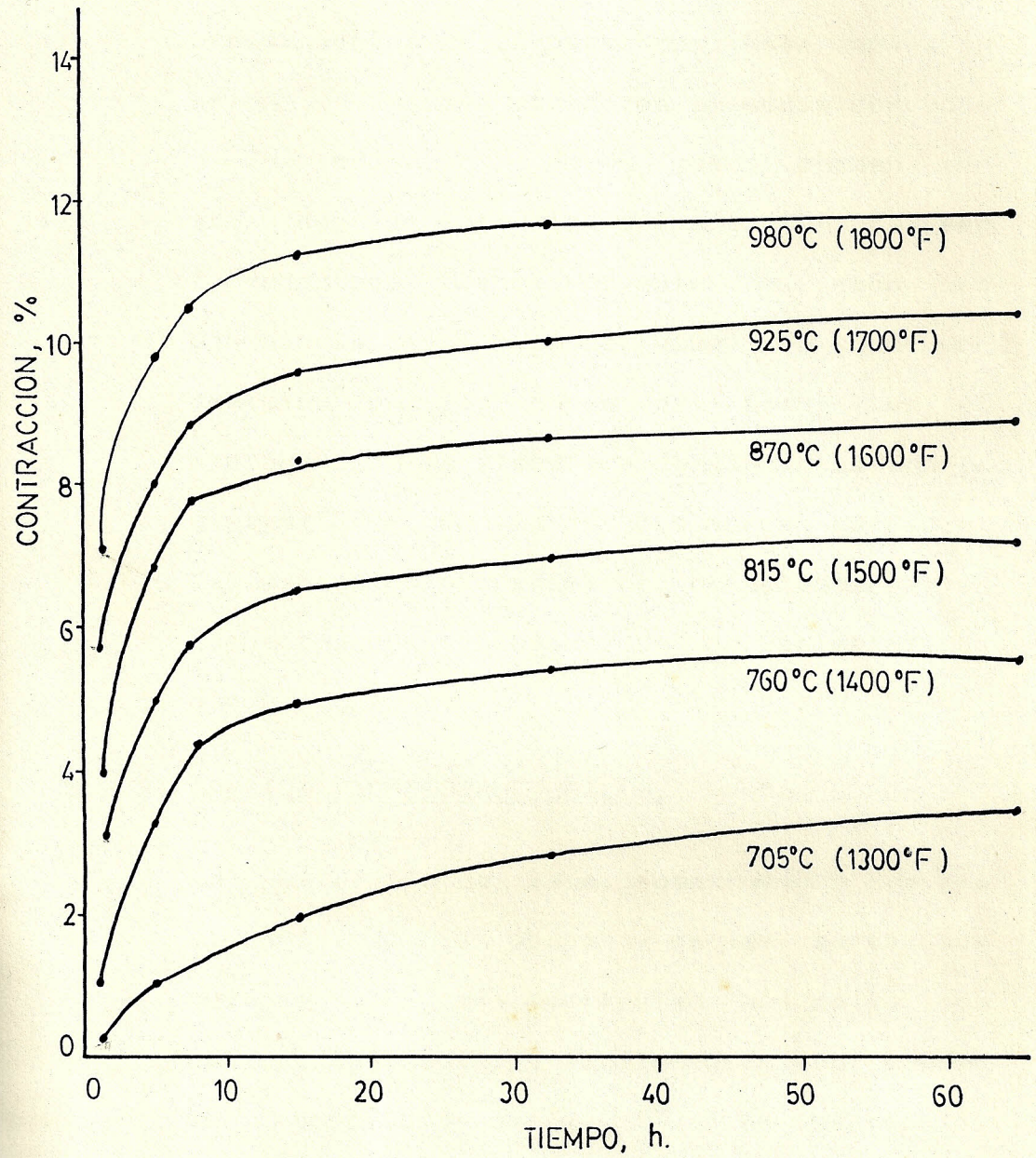


Fig 3.16 Contracción de los compactos de polvo de cobre

Una expansión durante la sinterización es común en compactos fabricados con polvos metálicos blandos, tales como cobre, que son presionados a altas presiones. Esta expansión es debido a gases atrapados en poros cerrados de los compactos. Estos gases pueden ser atrapados durante la compactación o ser formados por reacciones químicas, como por ejemplo la formación de vapor de agua por reacción de las capas de óxido con el hidrógeno de la atmósfera de sinterización la cual difunde dentro de los poros cerrados. Tal expansión o crecimiento no se observan en compactos que son hechos de polvos metálicos duros.

### 3.2.3. CAMBIOS MICROESTRUCTURALES.

La examinación de la microestructura revela el perfil de los poros y de las partículas del polvo. Si las partículas del polvo son policristalinas, los límites de grano pueden ser observados claramente. Las partículas pueden estirarse o retorcerse, dependiendo de la naturaleza del polvo y de la presión de compactación.

La microestructura de un compacto verde de polvo de cobre se muestra en la Figura 3.17,

en la que se descubre que algunas partículas tuvieron porosidad interior. La mayor parte de los límites entre partículas se observan claramente. En la Figura 3.18 esta la microestructura del compacto calentado a una baja temperatura. La principal diferencia que

Fig 3.17 se observa es en la forma de los poros dentro de las partículas del polvo. Si se calienta a una temperatura mayor permitiendo así una mejor sinterización, los límites entre las partículas no pueden ser descubiertas claramente, como se puede ver en la Figura 3.19.

#### 3.2.4. SINTERIZACIÓN FASE LIQUIDA.

Fig 3.18 Microestructura de un compacto de polvo de cobre presiona En sistemas que involucran polvos mezclados, la formación de líquido es posible debido a los diferentes puntos de fusión de los componentes. Los sistemas más comunes que envuelven formación de fase líquida durante la sinterización incluyen: Cu-Co, W-Cu, W-Ni-Fe, W-Ag, Cu-Sn, Fe-Cu, W-Co y Cu-p .

Fig 3.19 Microestructura de un compacto de polvo de cobre presiona Cuando el líquido se forma, éste fluye y humedece las partículas sólidas y comienza a actuar en la fase sólida. La Figura 3.20 proporciona un diagrama de las etapas de densificación durante la sinterización fase

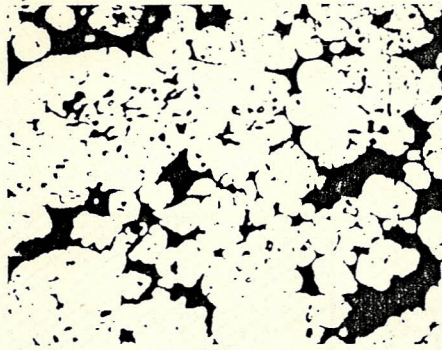


Fig 3.17 Microestructura de un compacto de cobre en verde presionado a 26000 psi

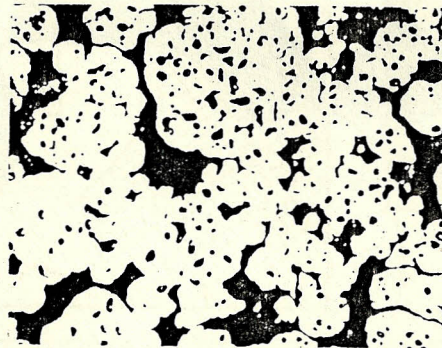


Fig 3.18 Microestructura de un compacto de polvo de cobre presionado a 26000 psi y sinterizado 15 min. a 705°C. Sin ataque

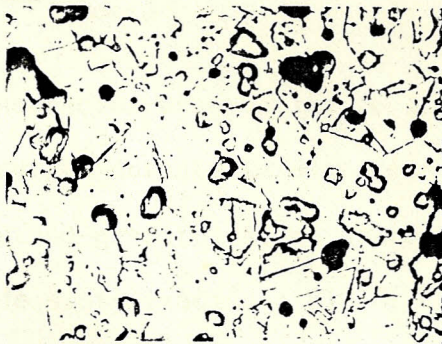


Fig 3.19 Microestructura de un compacto de polvo de cobre presionado a 26000 psi y sinterizado 30 min. a 950°C. Ataque: dicromato de potasio.

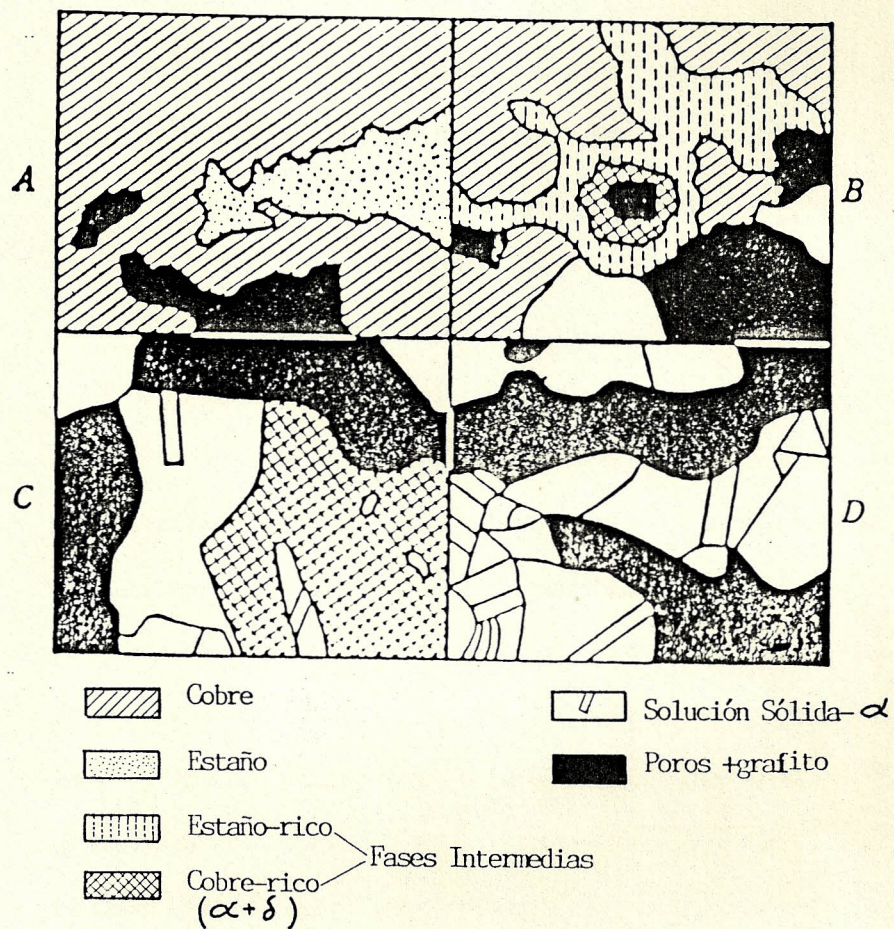


Fig 3.20 Representación esquemática de los cambios metalográficos que ocurren durante la sinterización de un compacto de cobre-estaño-grafito. A, no sinterizado; B, después de tres min. de sinterización a  $810^{\circ}\text{C}$ ; C, lo mismo, para 15 min; D, lo mismo, para 30 min.

liquida. La penetración de esta substancia derretida entre las partículas sólidas puede causar el engrosamiento del compacto, especialmente si la densidad verde es alta y las partículas gruesas. Sin embargo, en compañía de la penetración de la substancia derretida, es posible un rearrreglo de las partículas. La combinación de humedad, flujo líquido y rearrreglo de partículas contribuyen a un rápido cambio en el volumen del compacto. Con un calentamiento continuado en presencia de fase líquida, la fase sólida comienza a disolverse. Dependiendo del límite de solubilidad, cantidad de líquido, diagrama de fase y composición de la aleación, una de las dos acciones ocurren durante la disolución. Si el sólido tiene alta solubilidad en el líquido, entonces es posible para la composición líquida pasar a un límite sólido y solidificarse. En este caso la secuencia es llamada " Sinterización con fase líquida transiente " .

Una aplicación comercial de la sinterización con fase líquida transiente es la producción de bocines de bronce auto-lubricados. En estos bocines la porosidad debe ser controlada. La meta de este proceso es no



## CAPITULO IV

### PARTE EXPERIMENTAL

#### 4.1. PROPIEDADES Y CARACTERISTICAS DEL POLVO DE COBRE.

##### COMPOSICION QUIMICA DEL POLVO DE COBRE

El polvo de cobre que se utiliza es producido por ELEMENTO ALFA PRODUCTS cuya denominación dada por el PESO 3 fabricante es: 00094 Copper Powder n2N5, t98, la Cobre composición química del polvo n2N5, t98, se muestra Hierro en la Tabla X y aquí se puede ver que básicamente Insolubles está compuesta de 99.5 % de Cu., también existe la presencia de Fe en pequeño porcentaje y sustancias insolubles. El punto de fusión de este polvo es 1083 °C, su punto de ebullición es 2595 °C, su conductividad térmica 0.941 Cal/cm-seg- °C, y su resistividad eléctrica 1.6730  $\Omega$ -cm. Estas propiedades físicas se muestran en la Tabla XI.

El tamaño de grano es 10 micras. La Figura 4.1 muestra la microfotografía del polvo de cobre en la cual se puede ver la forma y tamaño relativo de grano.

El otro polvo que disponemos es una aleación de 90Cu-10Sn. Las propiedades físicas y químicas de

TABLA X

## COMPOSICION QUIMICA DEL POLVO DE COBRE

ELEMENTO	PESO %
Cobre	99.5
Hierro	0.013
Insolubles	0.03

TABLA XI

PROPIEDADES FISICAS DEL POLVO DE COBRE Y COBRE FUNDIDO

<u>PROPIEDAD</u>	<u>POLVO</u>	<u>FUNDIDO</u>
Punto de Fusión	1083 °C	1080 °C
Punto de Ebullición	2595 °C	2500 °C
Conductividad Térmica	0.941 cal/cm-°C-s	0.92 cal/cm-°C-s
Resistividad Eléctrica	1.6730 $\Omega$ -cm	1.7 $\Omega$ -cm

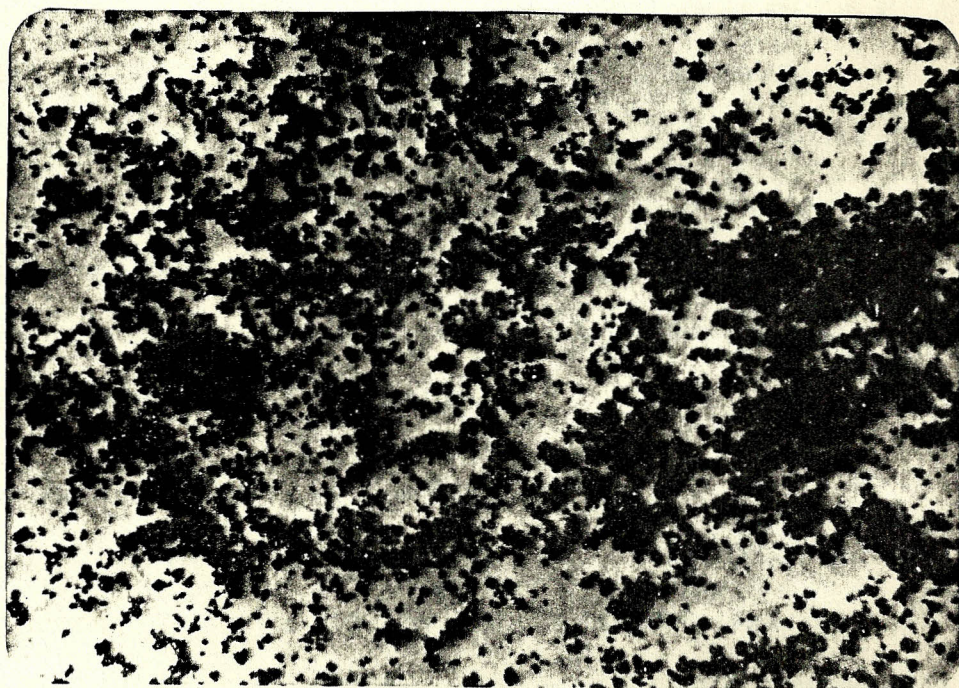


Fig 4.1 Microfotografía del polvo de cobre 32X

↓  
MACRO

este polvo están dadas en las Tablas XII y XIII respectivamente.

#### 4.2. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA MATRIZ.

Se diseñaron y se construyeron dos matrices. La matriz #1 la cual se muestra en la Figura 4.2 servirá para obtener probetas cilíndricas que se utilizarán para optimizar los parámetros que intervienen en el proceso de fabricación del bocin. La matriz #2 mostrada en la Figura 4.3 nos permitirá fabricar el bocin pulvimetalúrgico para lo cual utilizaremos los parámetros óptimos encontrados con las probetas cilíndricas.

La matriz #1 consta de un dado cilíndrico y de dos punzones, el material que se utilizará para la fabricación tanto de los punzones como del dado será

acero ASSAB XW5, que es un acero de alta resistencia a la compactación y al desgaste. La composición química de este acero es:

RESISTENCIA EN VERDE	C	2.05%
Determinado la altura transversal en barras (procedimiento de polvo)	Si	0.30%
	Mn	0.80%
Determinado la altura transversal en barras (procedimiento de polvo)	Cr	12.5%
1/4 de pulgada de espesor	W	1.30%

Para calcular las dimensiones del dado se parte de un diámetro interior conocido y también de las

TABLA XII

## PROPIEDADES QUIMICAS DEL POLVO 90Cu-10Sn

ELEMENTO	PESO %
COBRE	89.42
ESTAÑO	9.88
GRAFITO	----
LUBRICANTE	0.7

TABLA XIII

## PROPIEDADES FISICAS DEL POLVO 90Cu-10Sn

DENSIDAD APARENTE	3.15 g/cm <sup>3</sup>
TASA DE FLUJO	41 s/25cc
COMPACTABILIDAD*	6.11 g/cm <sup>3</sup>
RESISTENCIA EN VERDE**	734 psi

\* Determinada la ruptura transversal en barras presionadas a 12 tsi de gramos de polvo

\*\* Determinada la ruptura transversal en barras presionadas hasta 6.3 g/cm<sup>3</sup> y 1/4 de pulgada de espesor.

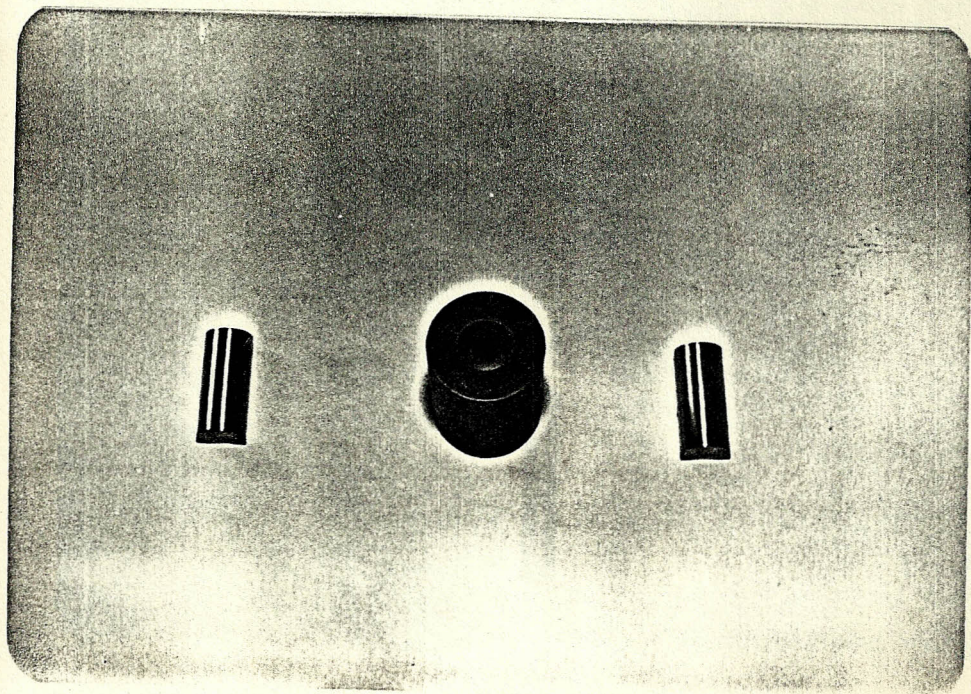


Fig. 4.2 Matriz No.1

propiedades mecánicas del material.

Aplicando la fórmula de Lamé, dada por GOETZEL, el diámetro externo está dado por la fórmula:

$$D = d \sqrt{S + P\mu / S - P\mu}$$

D = Diámetro externo del dado

d = Diámetro interno del dado

S = Esfuerzo límite de tensión

P = Presión máxima aplicada en el proceso de compresión

$\mu$  = Coeficiente de Poisson del material.

Para el dimensionamiento se utilizarán las siguientes propiedades mecánicas:

S = 40000 psi ( acero XW5 templado )

P = 80000 psi ( presión máxima de prueba )

$\mu$  = 0.30 ( para aceros duros )

d = 19 mm.

Introduciendo estos datos en la fórmula de Lamé obtenemos el diámetro exterior del dado:

$$D = 19 \text{ mm} \sqrt{40000 \text{ psi} + 80000 \text{ psi} * 0.3 / 40000 \text{ psi} - 80000 \text{ psi} * 0.3}$$

$$D = 38 \text{ mm}$$

Para calcular la altura del dado cilíndrico se toma en cuenta la razón de compresión del polvo que se va

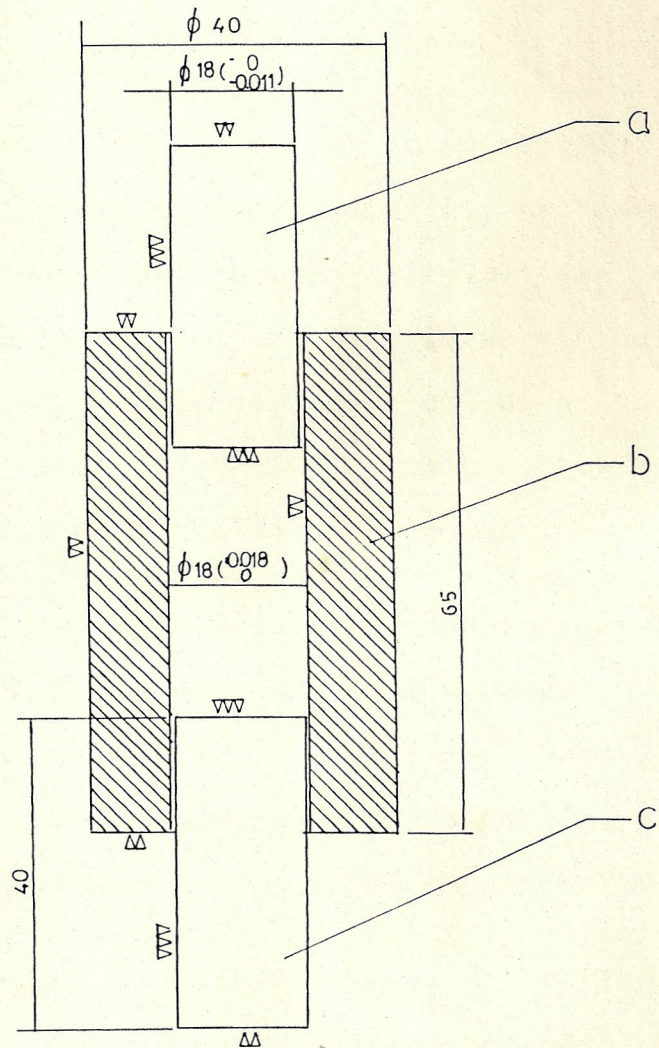
ha compactar, generalmente esta razón está en el rango de 2.5:1 a 3:1, por este motivo la altura del dado será de 65mm. Se debe tomar en cuenta también el juego que debe existir entre la pared del dado y los punzones ya que hay que evitar que partículas del polvo entren en ese espacio y ocasionen mayor desgaste de la matriz y también mayor fricción, incluso puede ocurrir una soldadura en frío al punzón o al dado por la presión que se aplica en la compresión de las probetas.

Las piezas fueron mecanizadas en el taller mecánico de la ESPOL, de acuerdo al diseño de la Figura 4.4.

A esta matriz se le realizó un tratamiento térmico para obtener las durezas apropiadas para el tipo de trabajo que va a realizar, este tratamiento térmico tiene como finalidad reducir los efectos abrasivos del polvo de cobre sobre las paredes de los punzones y del dado. El tratamiento realizado es el siguiente:

No. de Diseño	DENOMINACION
4-3a	PUNZON SUPERIOR
4-4b	PUNZON
Temperatura de calentamiento	TEMP: 930 °C
Tiempo de calentamiento	FACULTAD: 30 minutos
Medio de temple	: aceite
Dureza obtenida	: 62 Rc
MATRIZ No.1	
Elaborado: Mario L. Moreno	

PUNZONES:



No. de Dibujo	DENOMINACION	
4-4a	PUNZON SUPERIOR	
4-4b	DADO	
4-4c	PUNZON INFERIOR	
ASSAB XW5	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA	
MATRIZ No.1		Fig 4.4
		Escala 1:1
Tesis : Mario I. Moreno		

Temperatura de calentamiento	: 930 °C
Tiempo de calentamiento	: 20 minutos
Medio de temple	: aceite
Dureza obtenida	: 62 Rc.

Para el diseño y construcción de la matriz #2, la que fabricará el bocin pulvometalúrgico, se tomó en cuenta que la pared del bocin no puede ser muy delgada debido a la dificultad de colocar el polvo dentro de la matriz y principalmente debido a la no compactación uniforme de la columna de polvo ya que no se dispone de una prensa de doble acción.

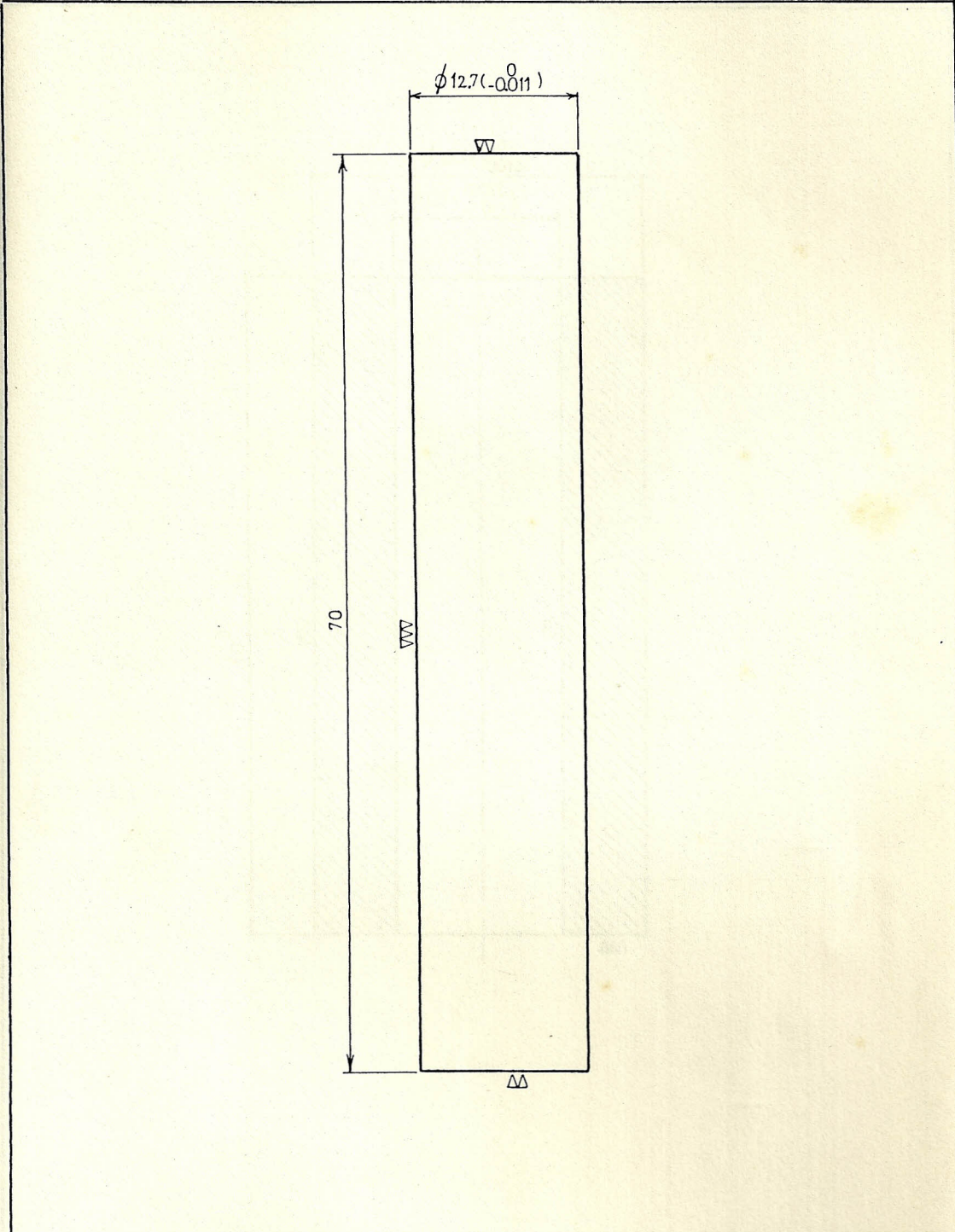
De acuerdo a las consideraciones anteriormente señaladas se diseñó la matriz que se muestra en la Figura 4.5. El material utilizado para la construcción de la matriz #2 que consta de un dado, dos punzones y un corazón, fue el mismo acero XW5.

Luego de ser mecanizadas las piezas en el taller de la ESPOL, se les realizó un tratamiento térmico que a continuación detallamos.

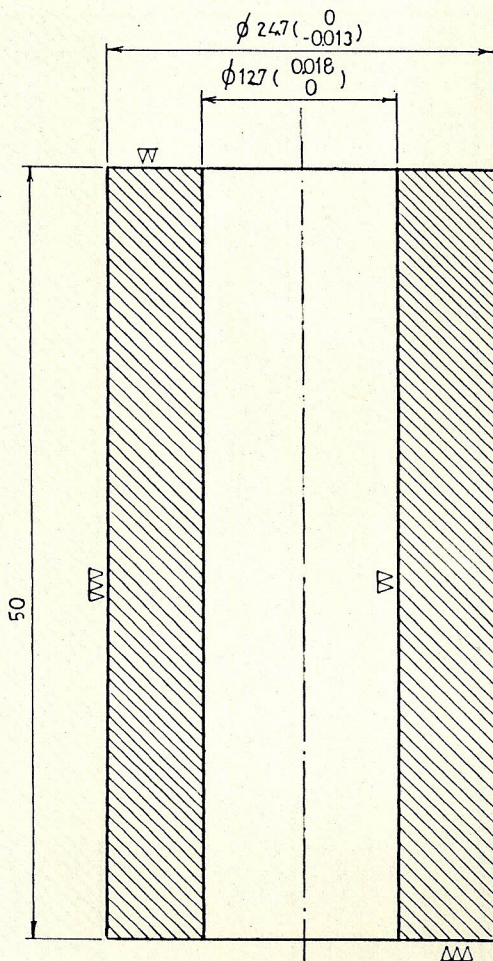
DADO:

Temperatura de calentamiento	: 930 °C
Tiempo de calentamiento	: 30 minutos
Medio de temple	: aceite
Dureza obtenida	: 62 Rc.
Temperatura de revenido	: 200 °C

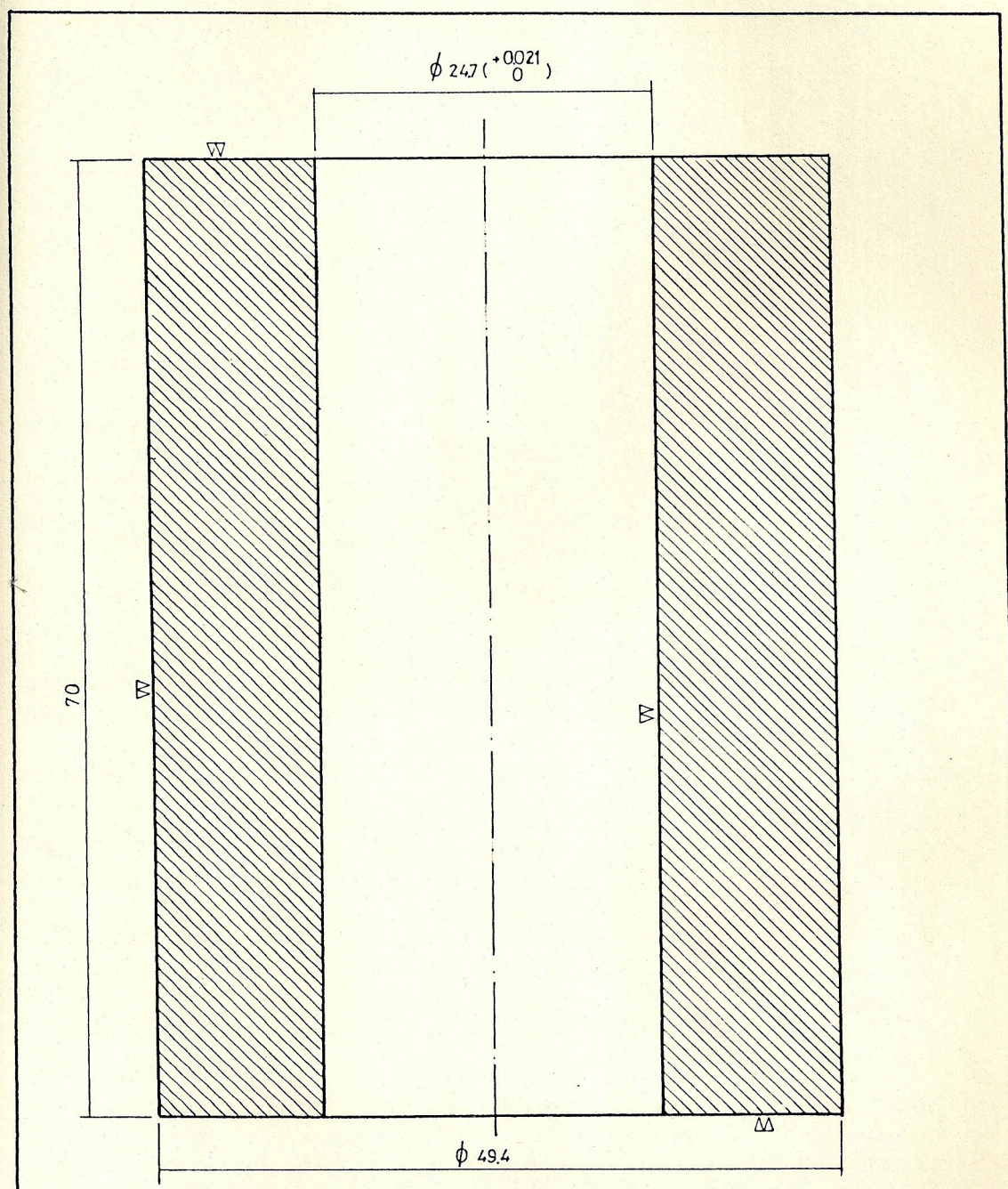
ACERO XW5  
 FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA  
 EJE  
 DE GRADO: MARIO MORENO  
 Escala 2:1  
 Fig 4.5



ACERO ASSA3 XW5	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
EJE	Fig 4.5
TESIS DE GRADO: MARIO MORENO	Escala 2:1



Acero ASSAB XW-5	FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
PUNZON	Fig 4.5
TESIS DE GRADO: MARIO I. MORENO	Escala 2:1



Acero ASSAB XW-5	FACULTAD DE INGENIERIA MECA.
DADO	Fig 4.5
TESIS DE GRADO: MARIO I. MORENO	Escala 2:1

Tiempo de revenido : 2 horas  
 Dureza obtenida después del revenido : 59 Rc.

PUNZONES:

Temperatura de calentamiento : 930 °C  
 Tiempo de calentamiento : 20 minutos  
 Medio de temple : aceite  
 Dureza obtenida : 61 Rc  
 Temperatura de revenido : 200 °C  
 Tiempo de revenido : 2 horas  
 Dureza obtenida después del revenido : 57 Rc.

CORAZON:

Temperatura de calentamiento : 930 °C  
 Tiempo de calentamiento : 15 minutos  
 Medio de temple : aceite  
 Dureza obtenida : 60 Rc.

4.3. DETERMINACION DE LOS PARAMETROS OPTIMOS

Para determinar estos parámetros óptimos, se fabricaron probetas cilíndricas utilizando la matriz #1. Teniendo en cuenta la altura del compacto verde que se quiere obtener, la relación de compresión aproximada, el gasto de polvo metálico, etc., se utilizaron masas de polvo de 36 gramos para luego ser ensayadas en el proceso de compactado y sinterizado que a continuación se detalla.

4.3.1. COMPACTADO.

En primer lugar se procedió a determinar la densidad aparente del polvo de cobre, para lo cual se llenó de polvo sin compactar el dado cilíndrico de la matriz #1, luego se pesó la cantidad de polvo de cobre que llenó el dado y conociendo también la altura del mismo se procedió a calcular la densidad aparente ( ) de la siguiente manera:

$$\rho_A = m / V$$

donde:

m = masa

V = volumen

$$V = A * h = \pi d^2 h / 4$$

donde:

A = área de la base

h = altura del dado

d = diámetro interno del dado

$$\rho_A = 4m / \pi d^2 h$$

m = 52.42 g

h = 65 mm

$$\rho_A = 4 * 52.42 / 3.14 * 17.8 * 65$$

$$\rho_A = 3.24 \text{ g/cm}$$

Equipo y material utilizado en la

optimización de los parámetros:

Balanza electrónica, Fig 4.6

Prensa hidráulica " Soiltest ", Cap 250000  
Lb, Fig 4.7

Polvo de Cobre

Lubricante " grafito en pasta ".

Se utilizó grafito en pasta por ser un lubricante que se encuentra fácilmente en el mercado nacional y en anteriores trabajos el uso de esta pasta de grafito ha dado muy buenos resultados.

Para optimizar los parámetros, densidad en verde, dureza en verde, resistencia máxima a la compresión, etc. y sus variaciones respecto a la presión de compactación; se prensaron porciones de 36 gramos cada una, y

Fig 4.6 se las compactó a diferentes presiones: 15 tsi, 20 tsi, 26 tsi, 32 tsi, 38 tsi y 45 tsi, estos resultados se muestran en la Tabla XIV y están graficados en las Figuras 4.8, 4.9 y 4.10, respectivamente. En esta Tabla y en los gráficos se puede observar que a medida que aumenta la presión de compactación las variaciones de las propiedades en los compactos en verde son menos pronunciados; por lo que elegimos 38 tsi como parámetro

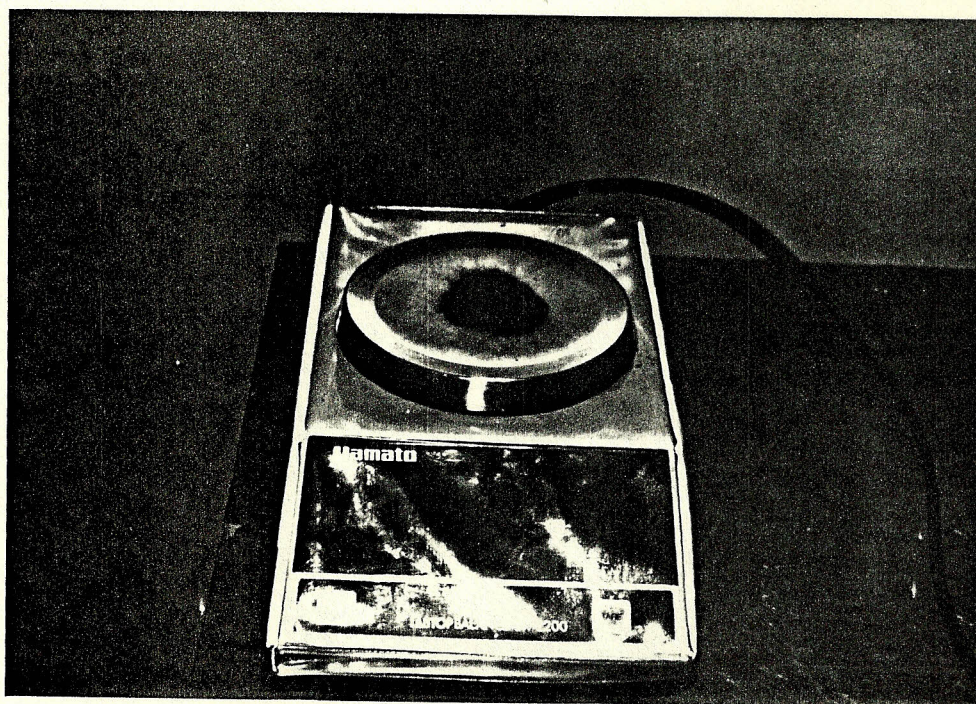


Fig 4.6 Balanza electrónica para el pesaje del polvo de cobre

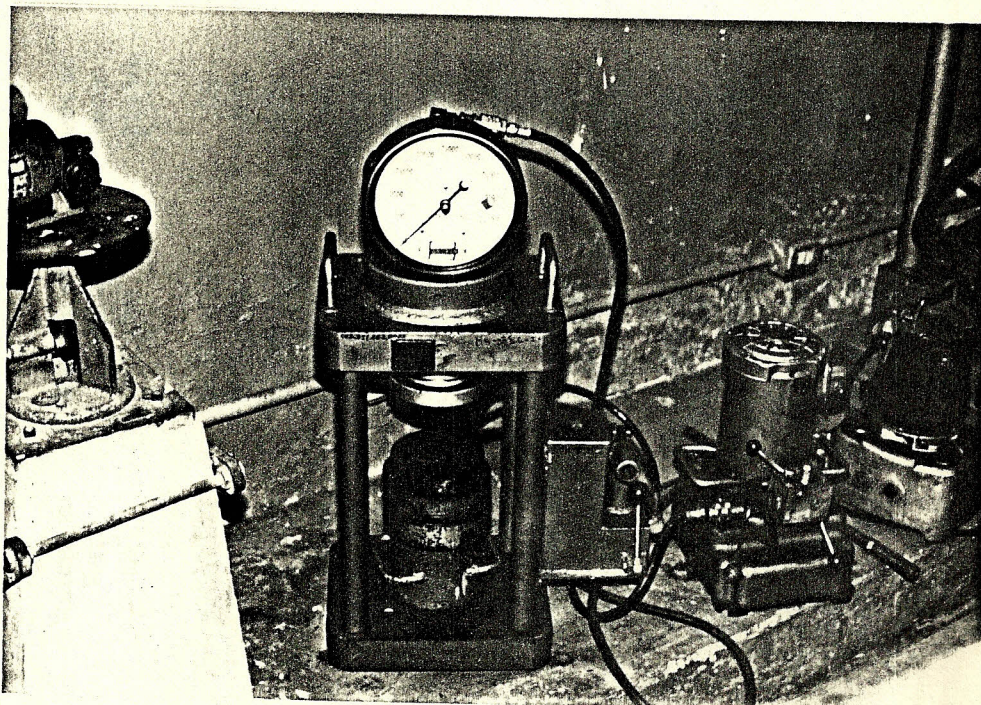


Fig 4.7 Prensa hidráulica utilizada en el proceso de compactación

**TABLA XIV**

RESULTADOS DE LOS COMPACTOS EN VERDE

Probetas	Presión de Compactación tsi	Masa g	Volumen en Verde <sup>3</sup> mm	Densidad en Verde <sup>3</sup> g/mm	Dureza en Verde Brinell	Esfuerzo Máx. en Compresión Kg/mm <sup>2</sup>
1	15	36	5236.142	0.006875	100	8.05
			5377.660	0.006694	100	
			5339.064	0.006743	100	
2	20		5133.220	0.007013	102	13.42
			5120.355	0.007031	100	
			5068.895	0.007102	100	
3	26	4863.051	0.007363	105	17.89	
		4875.916	0.007383	105		
		4850.186	0.007422	105		
4	32	4708.663	0.007645	120	25.05	
		4670.073	0.007709	115		
		4657.207	0.007730	115		
5	38	4541.421	0.007927	125	27.73	
		4502.825	0.007995	120		
		4528.555	0.007950	120		
6	45	4423.029	0.008139	125	34.00	
		4415.687	0.008153	125		
		4412.769	0.008158	122		

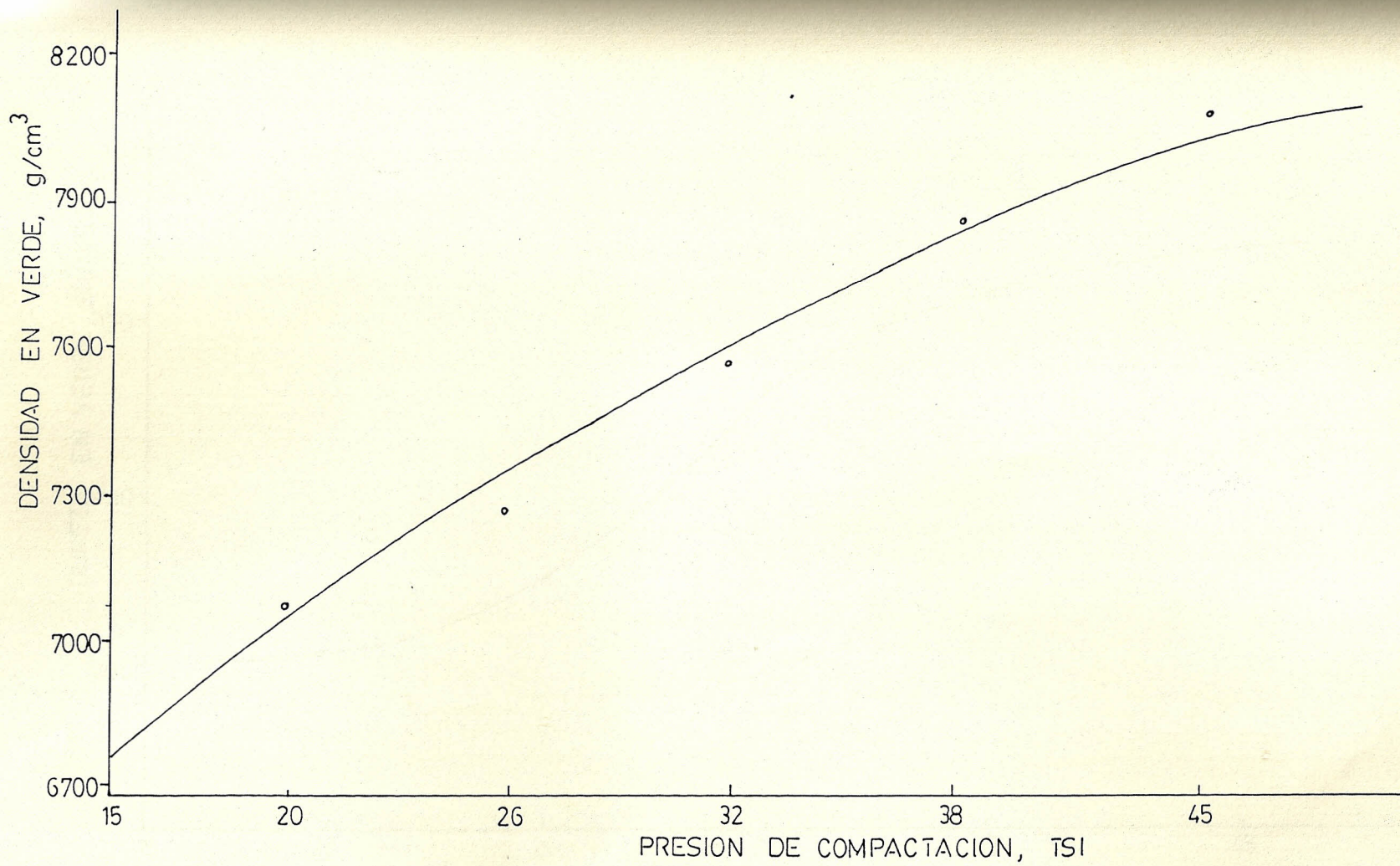


Fig 4.8 Curva de la Densidad en Verde vs. Presión de Compactación

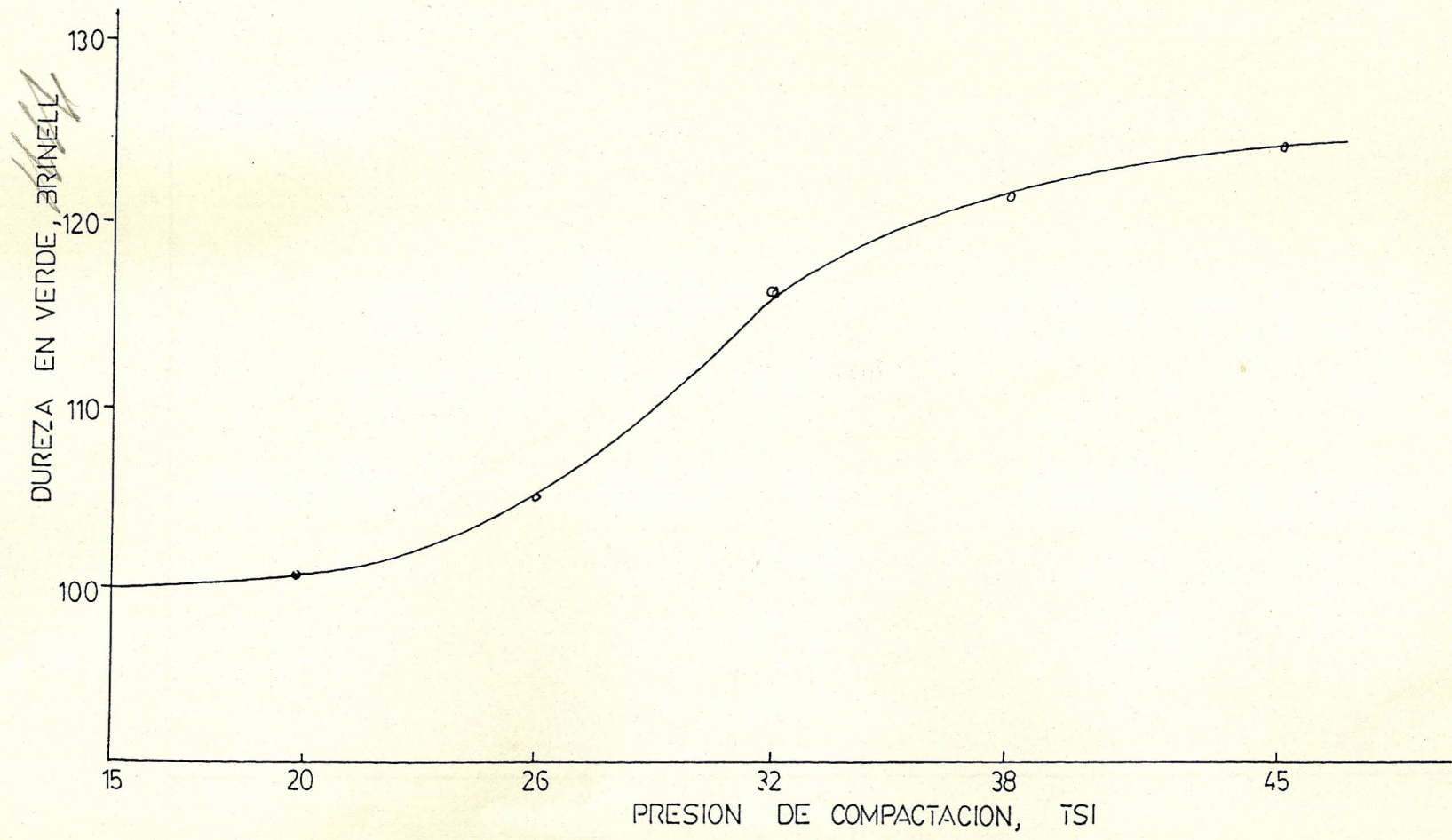


Fig 4.9 Curva de la Dureza en Verde vs. Presión de Compactación

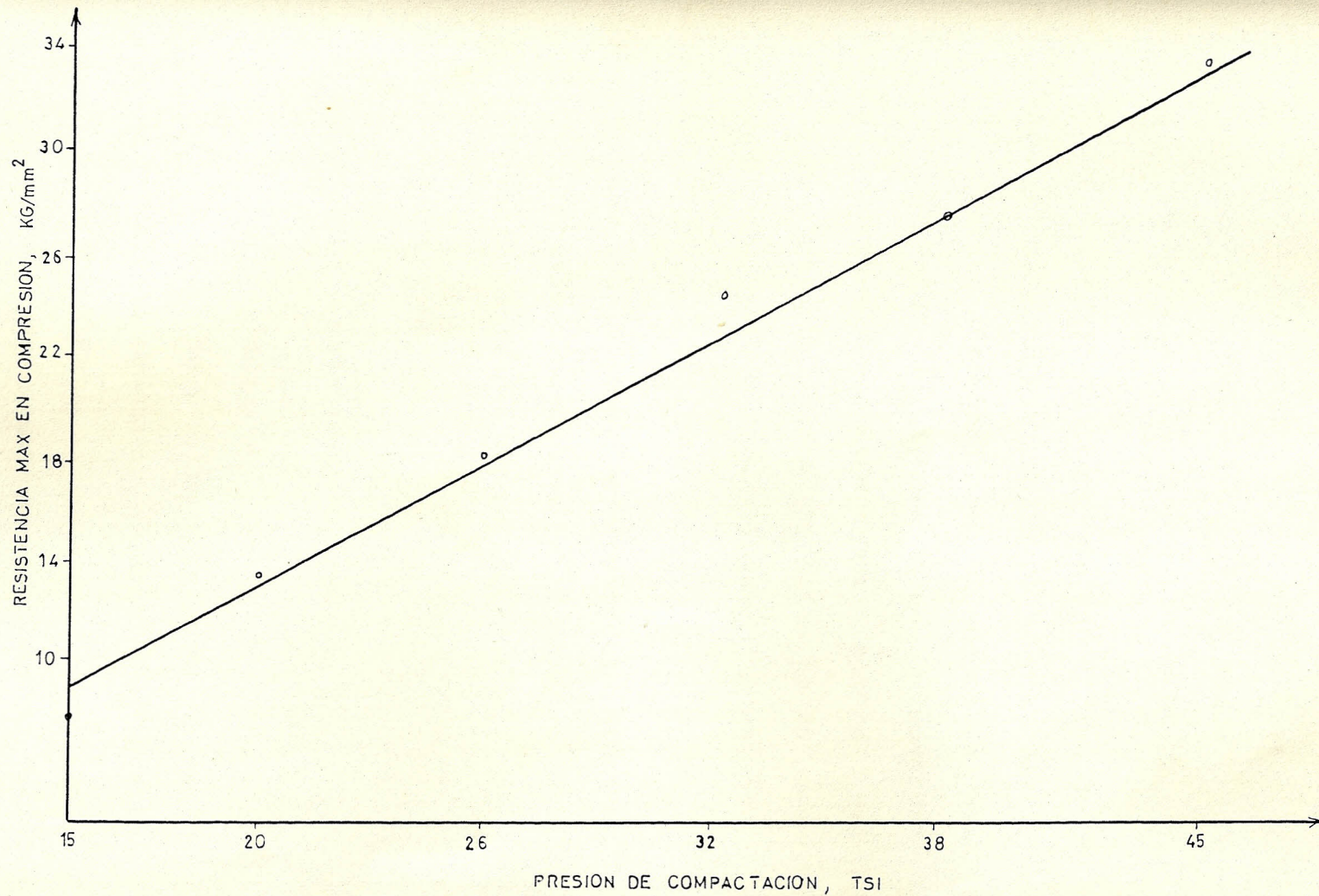


Fig 4.10 Curva de la Resistencia Máx. a la Compresión en Verde vs. Presión de Compactación

óptimo de compactación. Para este valor tenemos un valor de densidad en verde de  $7.96 \text{ g/cm}^3$ , dureza en verde de  $121.6 \text{ Brinell}$  y resistencia a la compresión de  $27.73 \text{ Kg/mm}^2$ .

Esta presión de compactación óptima de  $38 \text{ tsi}$  es la que se aplicará a la matriz que fabricará el bocín de  $36 \text{ gramos}$  de masa. En la Figura 4.11, se pueden observar los diferentes niveles de altura que se obtuvieron con las probetas de  $36 \text{ gramos}$  de polvo, para distintas presiones de compactación.

Las variaciones microestructurales de las probetas compactadas a distintas presiones están mostradas en la Figura 4.12.

#### 4.3.2. SINTERIZADO.

Equipo y material utilizado:

- Horno eléctrico Fig 4.13
- Botella de gas con nitrógeno Fig 4.13
- Válvula reductora de presión Fig 4.13
- Cronómetro
- Equipo de seguridad: guantes de asbesto y tenazas

La presión de la botella de nitrógeno es de

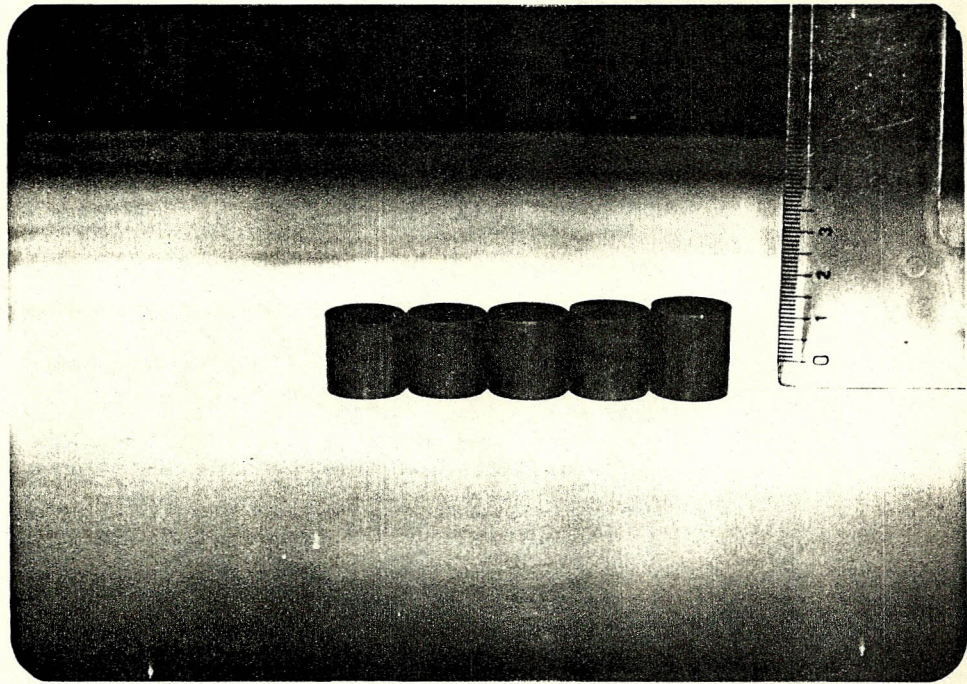
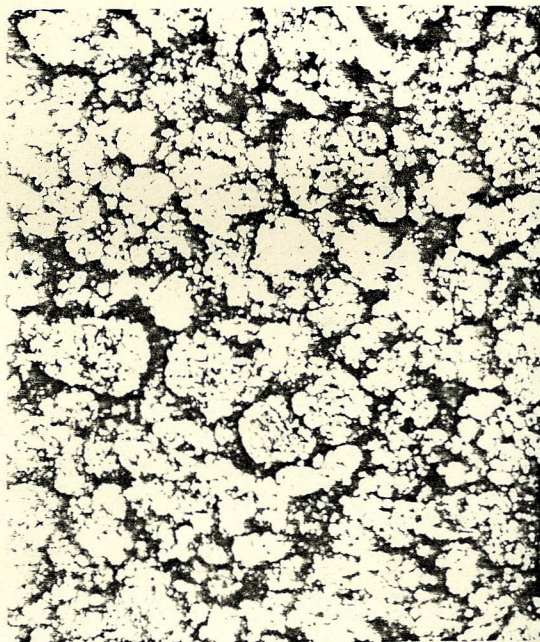
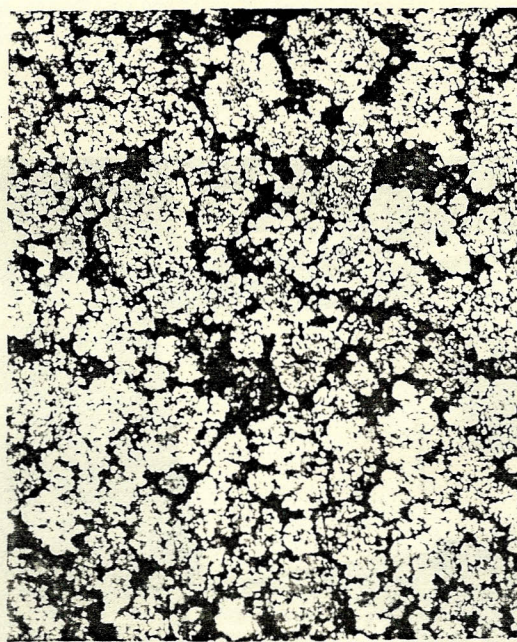


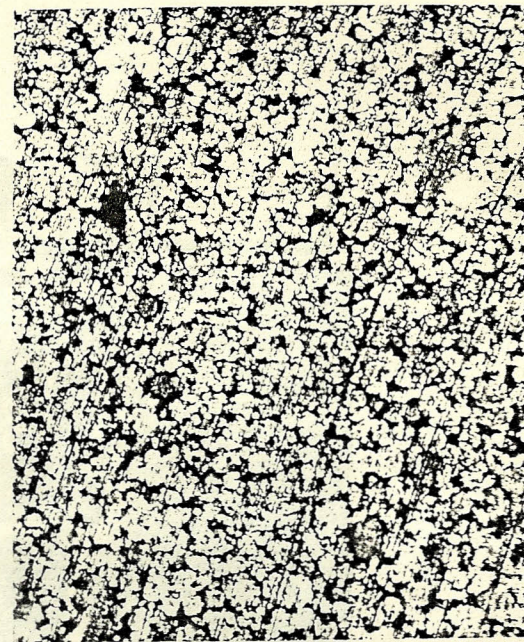
Fig 4.11 Diferentes niveles de altura de las pro  
betas de 36 gramos en verde



115 X  
 $P_c = 15 \text{ Tsi}$



115 X  
 $P_c = 26 \text{ Tsi}$



115 X  
 $P_c = 38 \text{ Tsi}$

Fig 4.12 Variaciones microestructurales de las probetas en verde compactadas a diferentes presiones

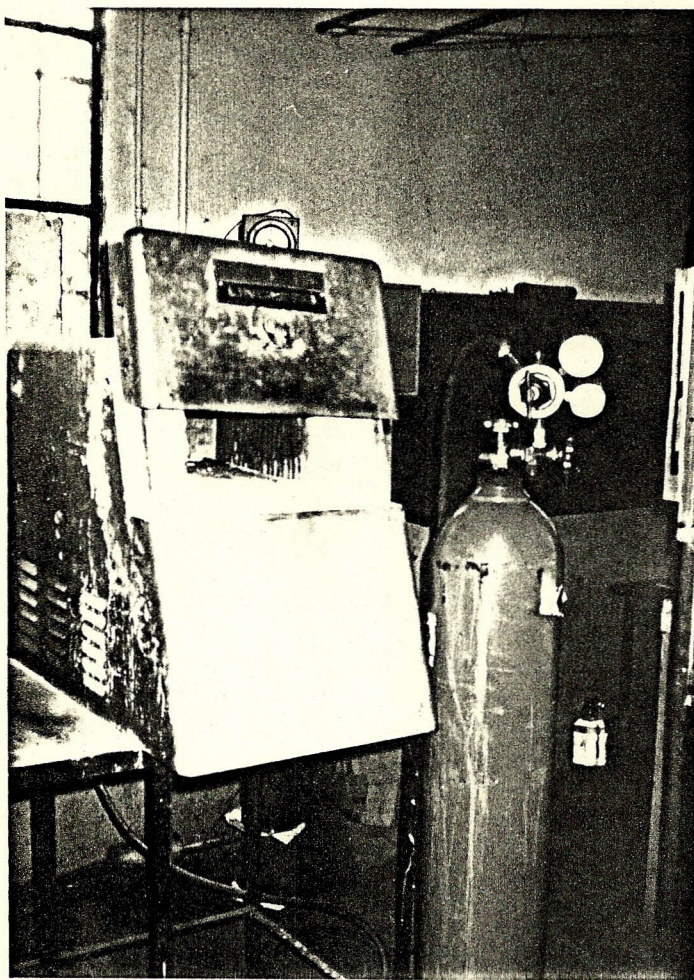


Fig 4.13 Equipo utilizado en el proceso de sinterización

2100 psi y el flujo de gas se lo mantuvo en aproximadamente  $2\text{m}^3/\text{hr}$ .

Este flujo de nitrógeno, que es un tanto elevado, se lo seleccionó debido a que el horno que disponíamos no era el apropiado y debíamos asegurarnos que la probeta no se contamine con el oxígeno.

Todas las pruebas de sinterización para optimizar los parámetros fueron ejecutadas en una atmósfera protectora de nitrógeno para evitar que el oxígeno se infiltre en la probeta causando oxidación, la cual se situaría en los límites de grano y disminuiría considerablemente las propiedades mecánicas de la pieza.

Para obtener el tiempo óptimo de sinterización, se tuvo en cuenta que la temperatura de sinterización debe estar arriba de la temperatura de recristalización del material (aproximadamente  $120^\circ\text{C}$ ) y cercana a la temperatura de fusión ( $1083^\circ\text{C}$ ), además considerando el rango de temperaturas de sinterización recomendado por GOETZEL, el cual nos habla que para el cobre estas temperaturas están entre  $750^\circ\text{C}$  y  $1000^\circ\text{C}$ . De este modo elegimos  $T = 900^\circ\text{C}$  para

investigar la influencia del tiempo de sinterización, principalmente sobre la densidad y dureza de los compactos.

Se compactaron cuatro probetas de 36 gramos cada una a una presión de 38 tsi, y luego se las sinterizó en una atmósfera de nitrógeno a 900 °C, por 10, 20, 40 y 60 minutos; luego de cada operación la probeta se sacó del horno y se la enfrió en el aire hasta la temperatura ambiente, así se obtuvieron los resultados que se presentan en la Tabla XV, con los que se realizó la gráfica de la Figura 4.14 y de donde obtenemos el tiempo óptimo de sinterización de 15 minutos. Las variaciones microestructurales están mostradas en la Figura 4.16.

En las pruebas realizadas anteriormente se ha obtenido que para una temperatura de sinterización de 900 °C el tiempo óptimo es de 15 minutos en una atmósfera de nitrógeno y como medio de enfriamiento el aire a temperatura ambiente. Estos parámetros serán los que utilizaremos en la fabricación del bocin.

#### 4.4. TRATAMIENTO TERMICO.

TABLA XV

RESULTADOS DE LAS PROBETAS CON EL TIEMPO DE SINTERIZACION VARIABLE

Probetas	Presión de Compactación tsi	Temperatura de Sinterización °C	Tiempo de Sinterización min.	Atmósfera Protectora	Densidad de Sinterizada ;g/mm <sup>3</sup>	Dureza Sinterizada Re
1			10		$8.02 \times 10^{-3}$	55
2			20		$8.05 \times 10^{-3}$	51
3	38	900	40	N <sub>2</sub>	$8.04 \times 10^{-3}$	43
4			60		$8.04 \times 10^{-3}$	47

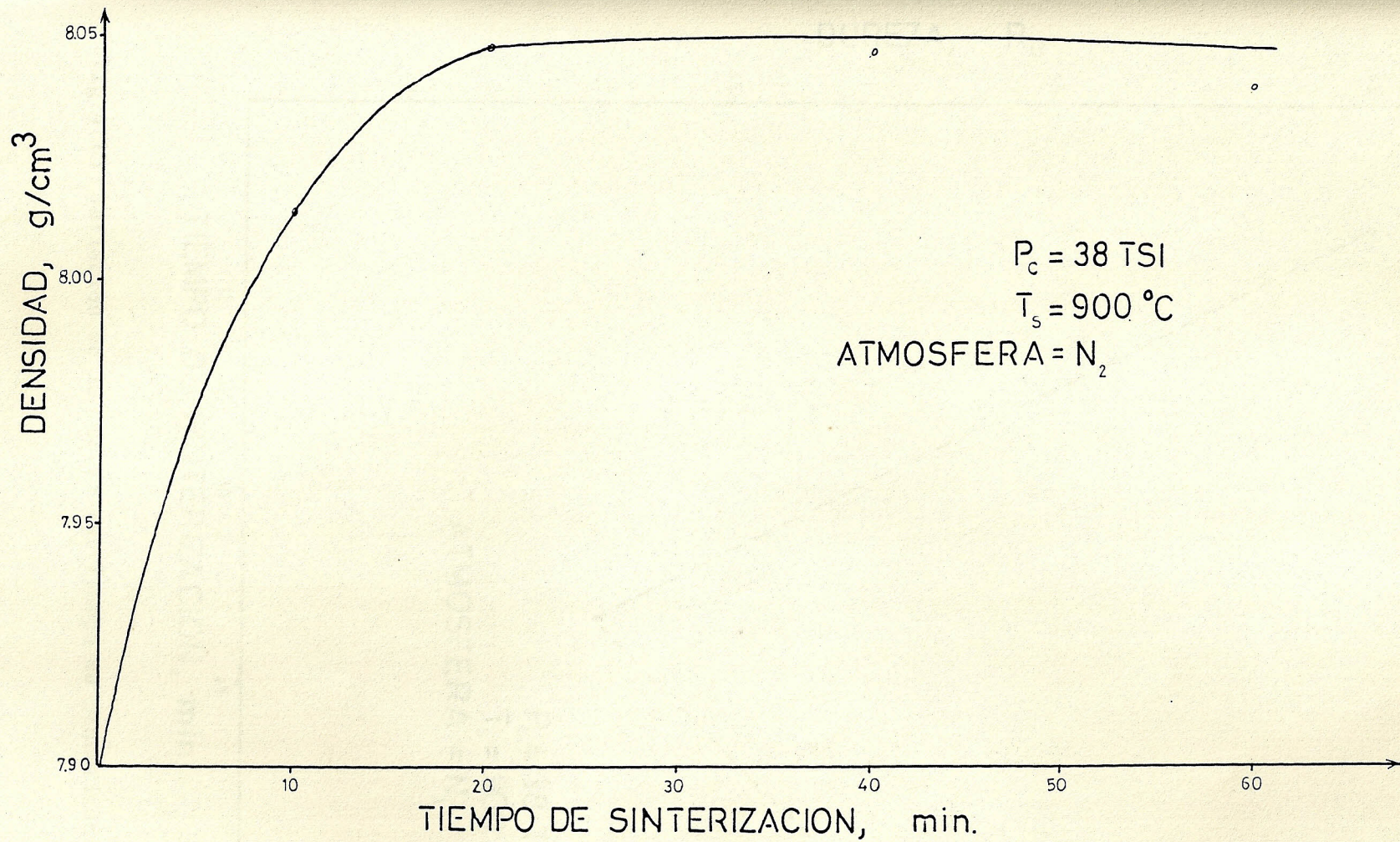


Fig 4.14 Variación de la Densidad vs. Tiempo de Sinterización

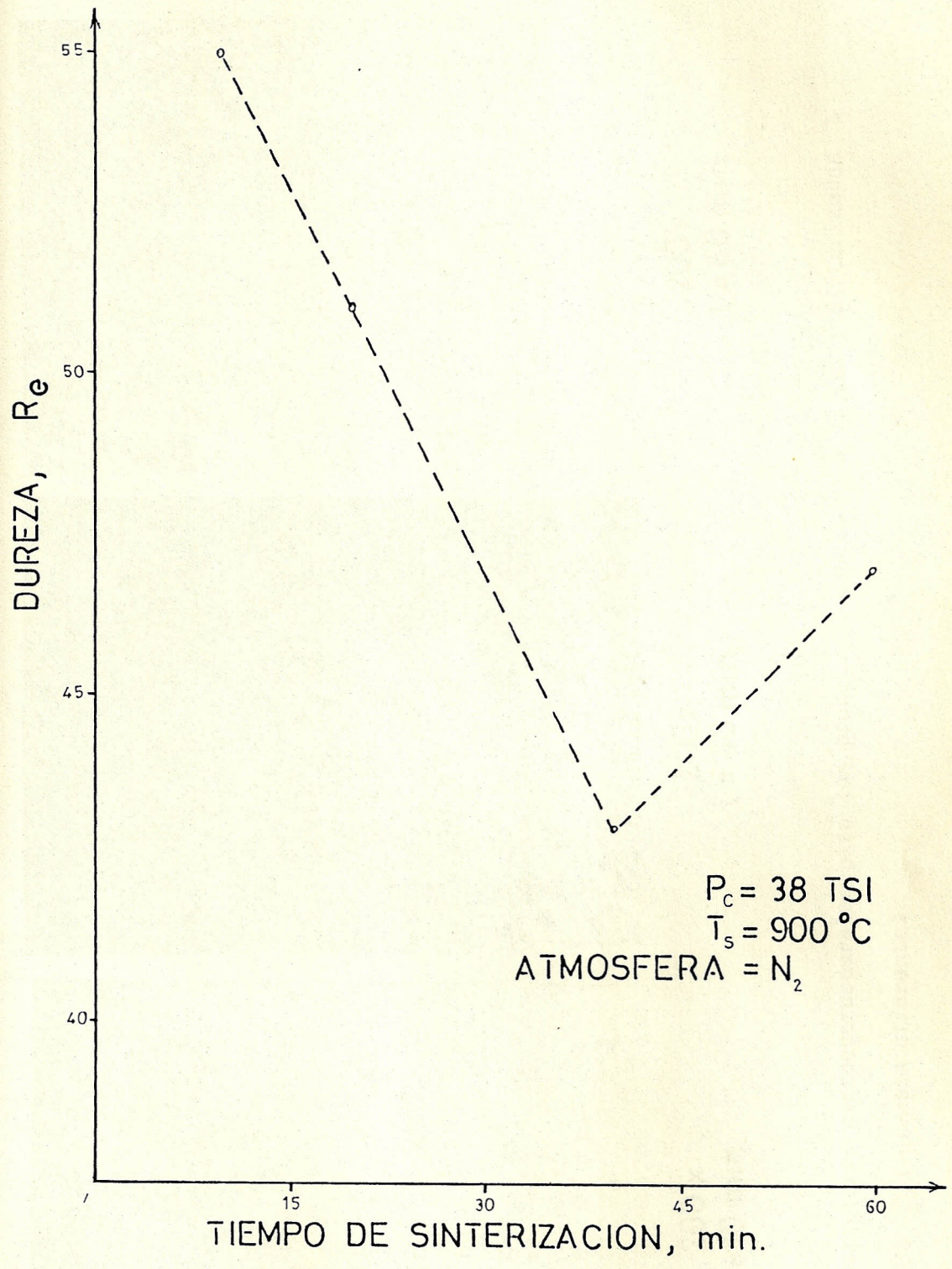
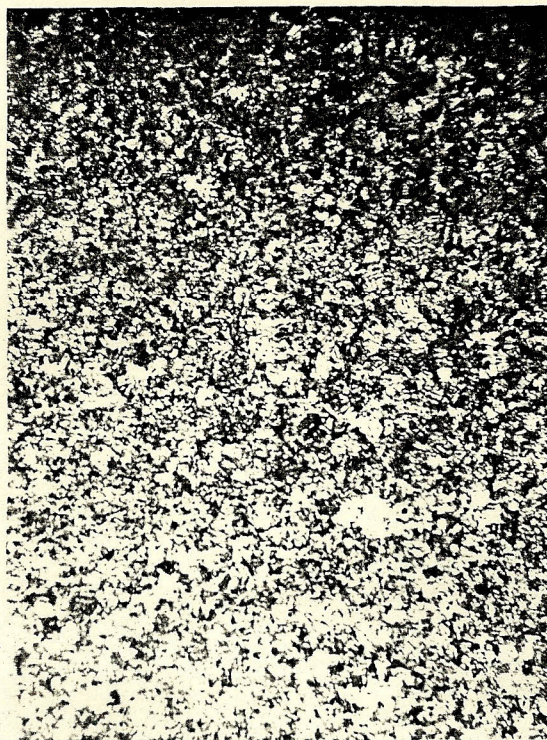


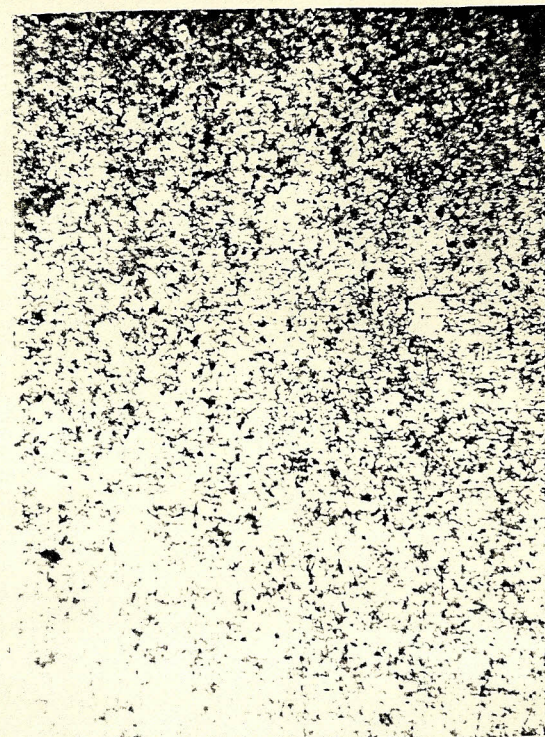
Fig 4.15 Variación de la Dureza vs. Tiempo de Sinterización



200 x  
t = 10 min



200x  
t = 40 min



200 x  
t = 60 min

Fig 4.16 Variaciones microestructurales para las probetas compactadas a 38 tsi y sinterizadas a 900 °C a tiempos diferentes

El tratamiento térmico de las partes sinterizadas es con el propósito de mejorar las propiedades mecánicas. Generalmente este tratamiento térmico es idéntico al aplicado a las partes obtenidas por los métodos convencionales y bajo las mismas condiciones.

Pero debido a que el cobre y la mayoría de la aleaciones de cobre constituyen fases homogéneas únicas, no son susceptibles a tratamiento térmico alguno. Por este motivo no realizaremos esta prueba.

#### FABRICACION DEL BOCIN PULVIMETALURGICO.

Para la fabricación del bocin se utilizará la matriz #2, con las dimensiones indicadas en la Figura 4.5 y con los parámetros obtenidos en las pruebas anteriores, las cuales son las siguientes:

- masa 36 g
- Presión de compactación 38 tsi
- Temperatura de sinterización 900 °C
- Tiempo de sinterización 15 min
- Atmósfera de sinterización N<sub>2</sub>
- Flujo de gas nitrógeno 2m<sup>3</sup>/h

El procedimiento seguido para obtener el bocin pulvometalúrgico es el siguiente:

- 1.- Se lubrican las superficies del dado, de los

punzones y del corazón con pasta de grafito ( preparada empíricamente ) para minimizar los efectos abrasivos y friccionantes entre las superficies durante la compactación y la eyección de los compactos.

2.- Se pesan 36 gramos de polvo de cobre y se lo introduce en la matriz utilizando un embudo, como lo muestra la Figura 4.17.

3.- Se monta la matriz, con el polvo en su interior y se lo coloca en la prensa como se indica en la Figura 4.18.

4.- Se aplica a la matriz una presión de compactación de 38 tsi.

5.- Se somete el sistema al proceso de eyección de los bocines, aplicando presiones relativamente bajas.

6.- Se sinteriza el bocín en verde, introduciéndolo para esto en el horno, mostrado en la Figura 4.19, el cual se encuentra a una temperatura de 900 °C, por un tiempo de 15 minutos bajo una atmósfera protectora de nitrógeno.

Los bocines obtenidos en esta forma se muestran en la Figura 4.20.

También se fabricaron bocines con la aleación

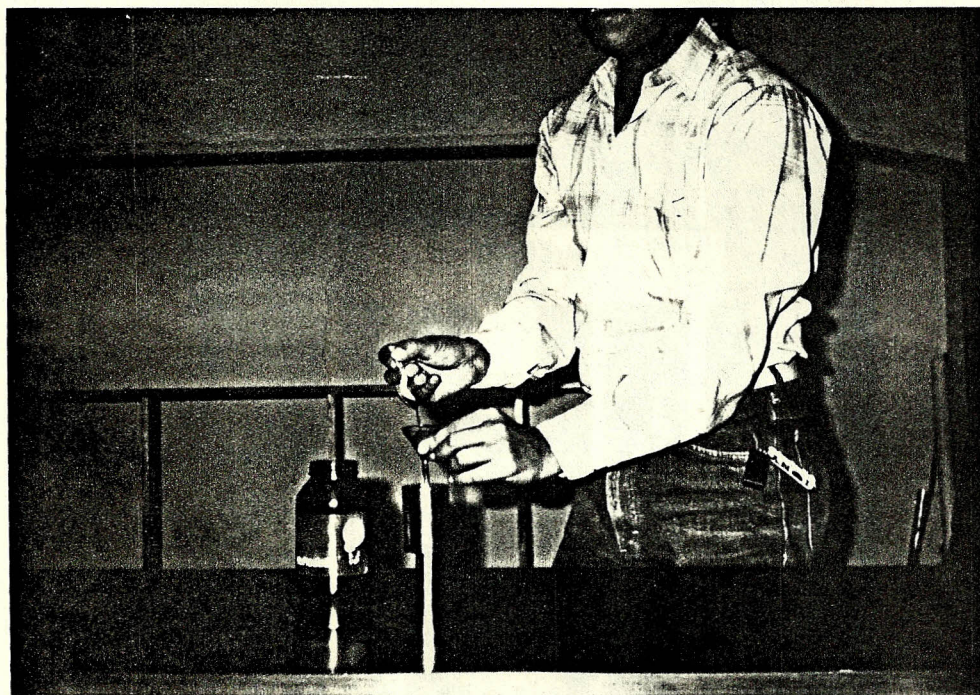


Fig 4.17 Introducción del polvo de cobre en la matriz

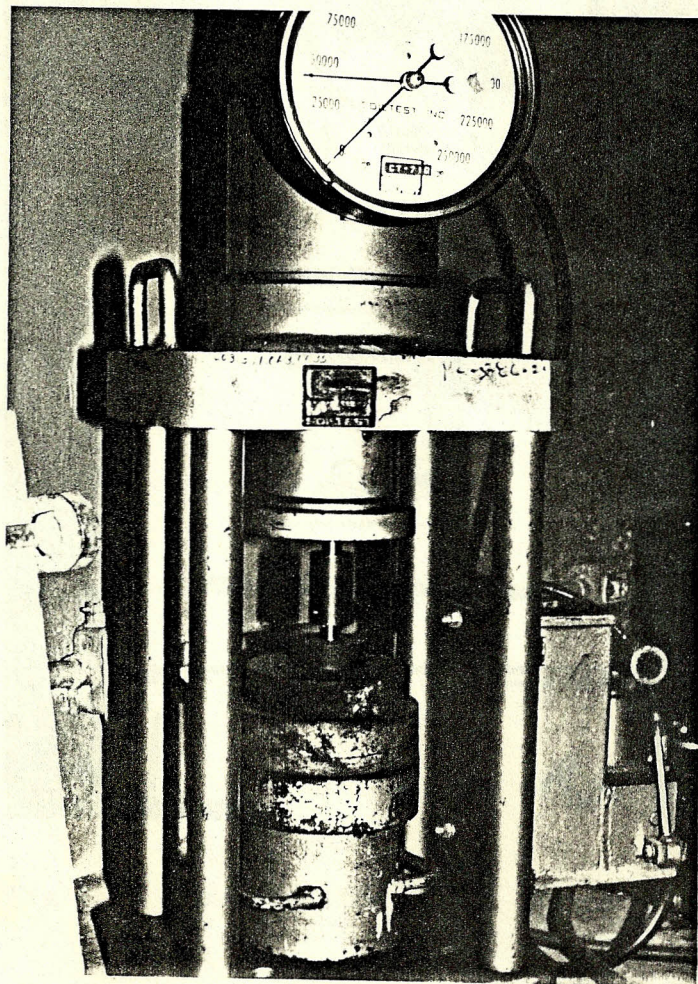


Fig 4.18 Iniciando el proceso de compactación

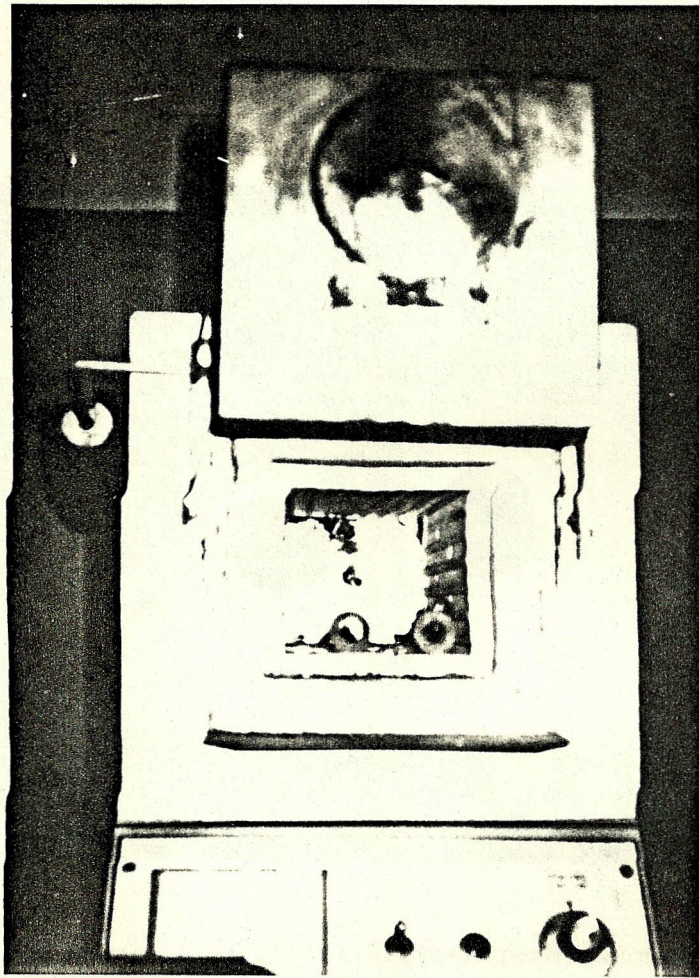


Fig 4.19 Sinterización de los bocines

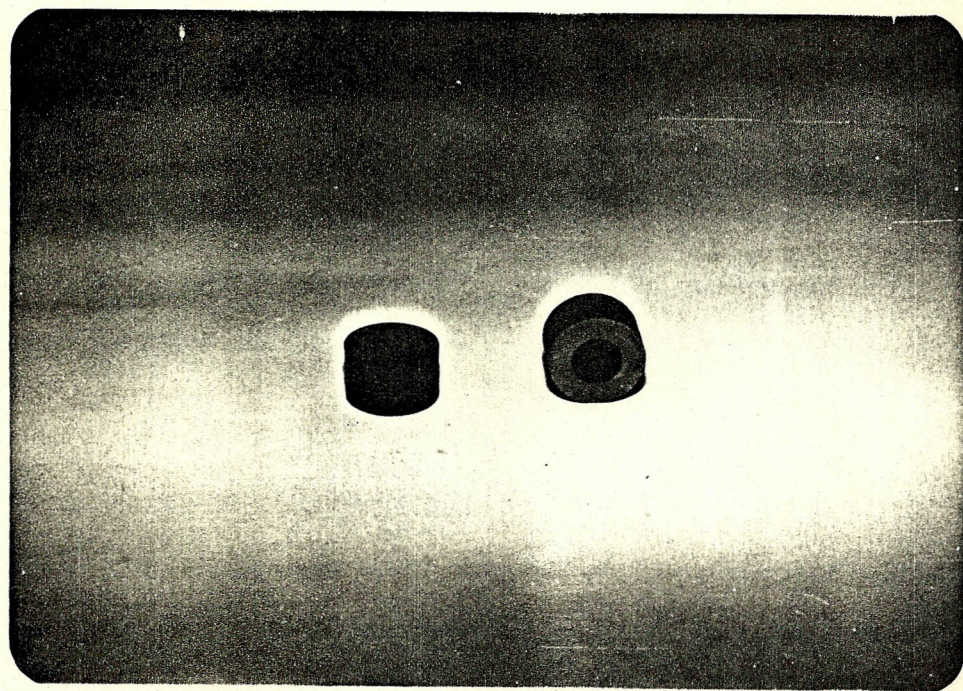


Fig 4.20 Bocines pulvimetalúrgicos terminados

90Cu-10Sn, cuyas características físicas y químicas están en las Tablas XII y XIII respectivamente. Debido a la cantidad disponible de este polvo se siguió el mismo procedimiento realizado para la obtención de los bocines de cobre, cambiando desde luego la temperatura de sinterización.

Se compactaron cinco porciones de 36 gramos cada una a presiones de 10, 15, 20, 25 y 30 tsi que es el rango de compactación típica para esta clase de polvo. Estos bocines se muestran en la Figura 4.21.

La sinterización se la practicó con una atmósfera protectora de nitrógeno. La temperatura para sinterizar esta aleación se encuentra en el rango de 750 a 830 °C. Una temperatura de 810 °C es recomendada por los fabricantes, por lo cual la elegimos para sinterizar los bocines.

#### 4.5. ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECANICAS.

En esta sección se describirá la forma como se realizaron los ensayos correspondientes.

##### 4.5.1. ENSAYO METALOGRAFICO.

En primer lugar se utilizó el microscopio "Photoautomat wild" mostrado en la Figura 4.22, para determinar la forma de las partículas a los dos tipos de polvo (cobre

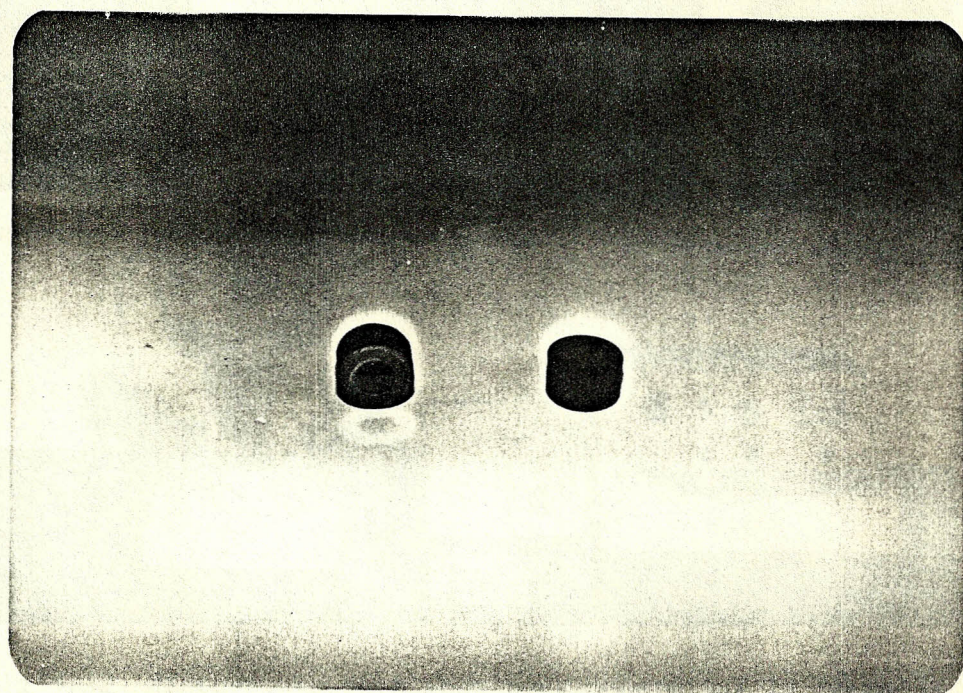


Fig 4.21 Bocines pulvimetalúrgicos fabricados con la aleación 90Cu-10Sn

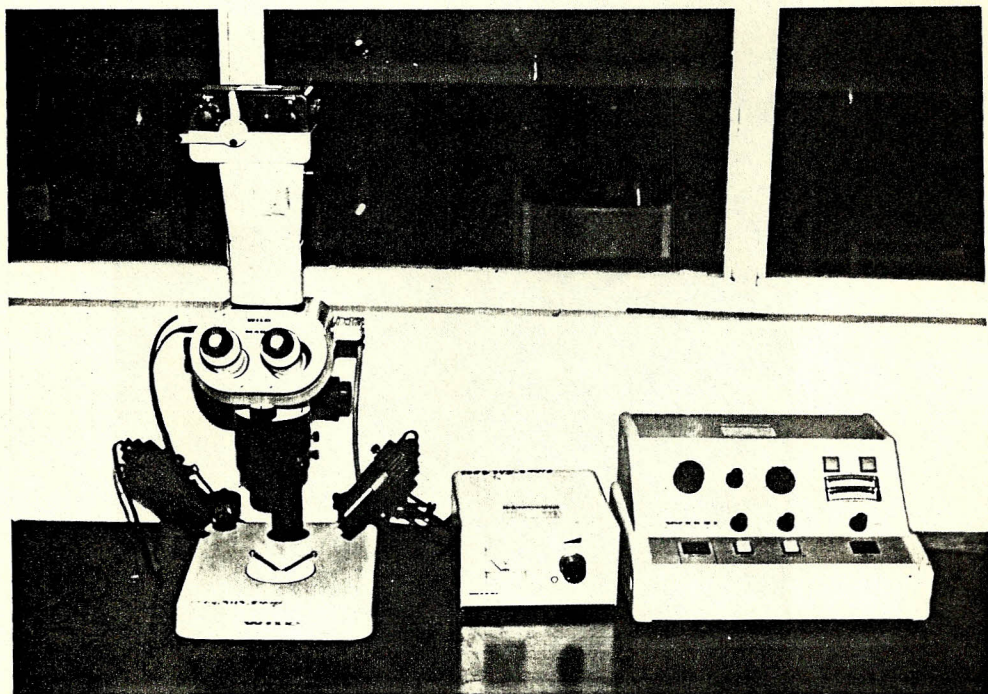


Fig 4.22 Microscopio utilizado para determinar la forma de las partículas de los polvos

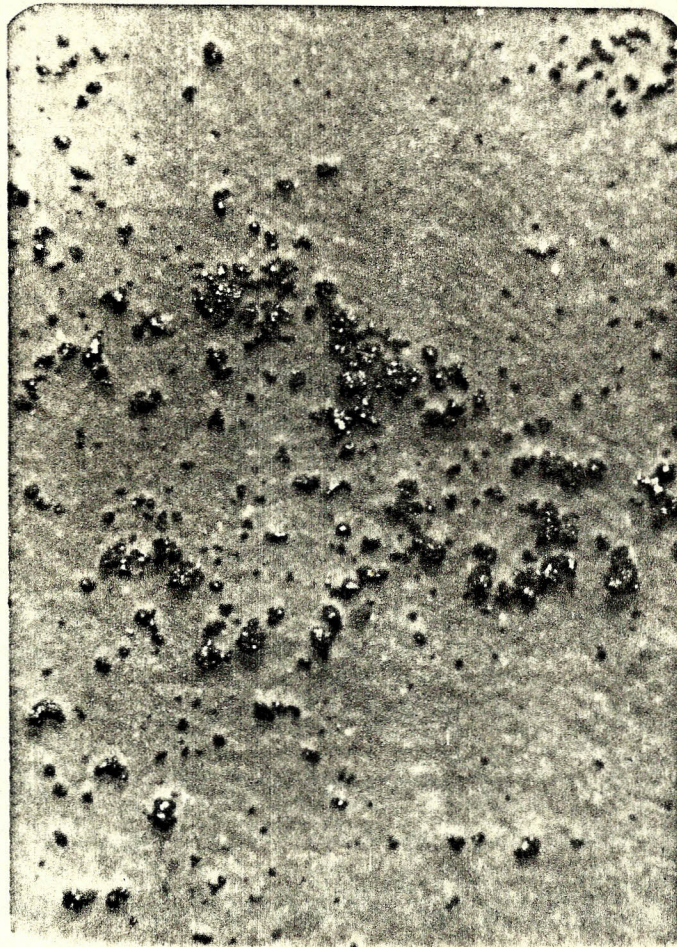


Fig 4.23 Microfotografía de la aleación  
90Cu-10Sn

puro y 90Cu-10Sn ), las microfotografías se muestran en las Figuras 4.1 y 4.23 respectivamente.

Para observar las microestructuras en las distintas etapas del proceso se utilizó el equipo mostrado en la Figura 4.24, de cada tipo de ensayo se obtuvieron probetas las cuales fueron sometidas al proceso de pulido, esto es, hasta lija 600 y posteriormente con alúmina sobre discos con paño. Así se obtuvieron superficies brillantes.

Para revelar los límites de grano se atacó a la superficie brillante con el reactivo dicromato de potasio. La Figura 4.12 muestra la microestructura de las probetas en verde a diferentes niveles de compactación, se puede

ver claramente que la superficie porosa disminuye a medida que aumenta la presión de compactación.

La Figura 4.16 muestra las microfotografías de los compactos sinterizados a 900 °C y a tiempos diferentes, observándose que no hay un cambio pronunciado en sus microestructuras.

La Figura 4.25 indica las microestructuras de

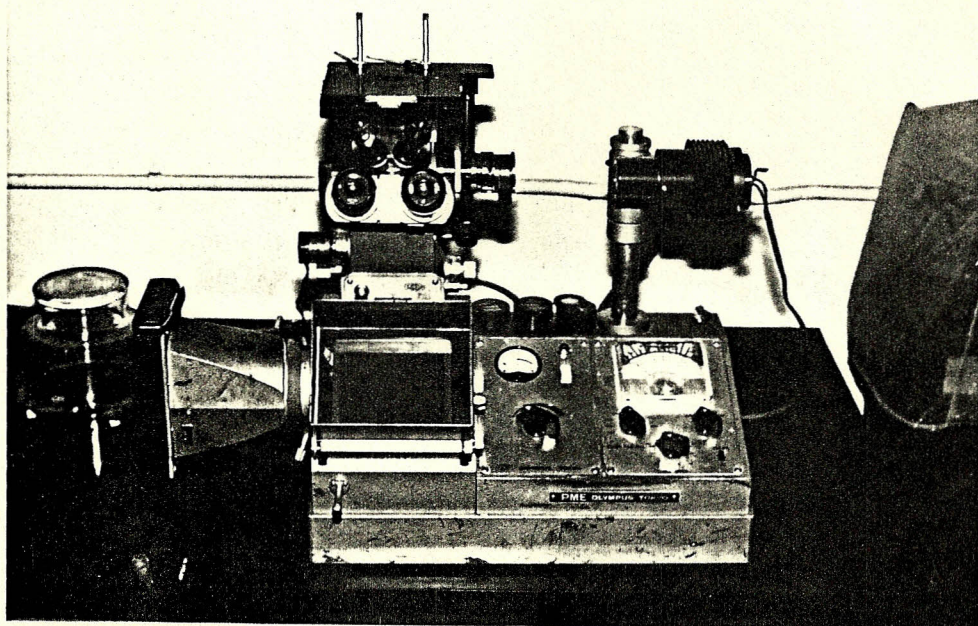


Fig 4.24 Microscopio utilizado para los análisis metalográficos

los compactos de cobre sinterizados a la misma temperatura y tiempo pero compactados a diferentes presiones.

#### 4.5.2. PRUEBA DE COMPRESION.

Se realizaron pruebas de compresión a las probetas cilíndricas obtenidas en las diferentes etapas del proceso de fabricación. Para ello se utilizó el equipo en que se compactaron las probetas cilíndricas. La Tabla XIV muestra los resultados obtenidos de las pruebas de compresión de las probetas cilíndricas en su condición verde para diferentes niveles de compactación.

#### 4.5.3. PRUEBA DE DUREZA.

Se tomaron durezas a las probetas cilíndricas de cobre así como también a los bocines de la aleación 90Cu-10Sn.

Durezas Brinell se tomaron a las probetas en la condición verde a distintas presiones de compactación. Estos resultados están en la Tabla XIV.

Luego del proceso de sinterización las probetas también fueron sometidas al ensayo de dureza, esta vez utilizando la escala



200 x  
 $P_c = 15$  TSI



200 x  
 $P_c = 38$  TSI

Fig 4.25 Variaciones microestructurales para probetas compactadas a diferentes presiones y sintetizadas a una temperatura de  $900^{\circ}\text{C}$  durante 30 minutos

Rockwell E ( Re ), en el durómetro " Wilson " mostrado en la Figura 4.26, lo cual nos arrojó los resultados indicados en la Tabla XV.

Después de realizar las pruebas anteriores con las probetas cilíndricas se tomaron durezas Rockwell E al bocín pulvimetalúrgico fabricado con los parámetros óptimos encontrados. El resultado fue 49 Re para la temperatura de sinterización de 900 °C y el tiempo de 15 minutos.

Utilizando la aleación 90Cu-10Sn se compactaron cinco bocines a 10, 15, 20, 25 y 30 tsi y luego fueron sinterizados a una temperatura de 810 °C durante 15 minutos y enfriados en aire a temperatura ambiente. Las durezas Re obtenidas están mostradas en la Tabla XVI.

#### 4.6. ENSAYO DE MAQUINADO.

Generalmente las partes fabricadas por el método pulvimetalúrgico no son sometidas a ensayos de maquinado debido a que la mayoría de estas partes salen con medidas exactas de fabricación, sin embargo teóricamente la maquinabilidad debe ser casi la misma que para las partes obtenidas por los

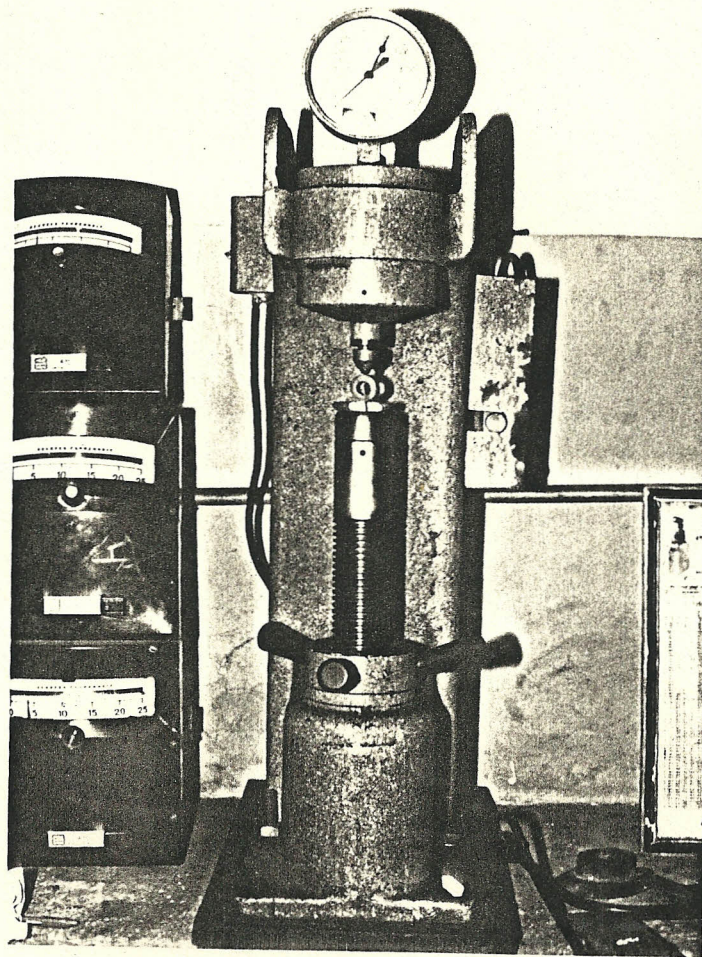


Fig 4.26 Tomando la dureza a los bocines  
pulvimetalúrgicos

TABLA XVI

DUREZAS OBTENIDAS CON LOS BOCINES SINTERIZADOS DEL POLVO 90Cu-10Sn

PRESION DE COMPACTACION, TSI	DUREZA, Re
10	32
15	39
20	48
25	50
30	53

Atmósfera de Sinterización: Nitrógeno

Tiempo de Sinterización : 15 min

Temperatura de Sinterización: 810°C

métodos convencionales y a veces las piezas pulvimetalúrgicas requieren de un dimensionamiento final debido a requerimientos de tolerancias muy cerradas. Es por esto que se procedió a realizar un ensayo de cilindrado a los bocines obtenidos, como se muestra en la Figura 4.27, de esta manera se pudo observar un excelente comportamiento al arranque de viruta y además obteniéndose superficies de muy buen acabado.

FIN

GRACIAS



Fig. 4.27. Bocines pulvimetalúrgicos acabanados

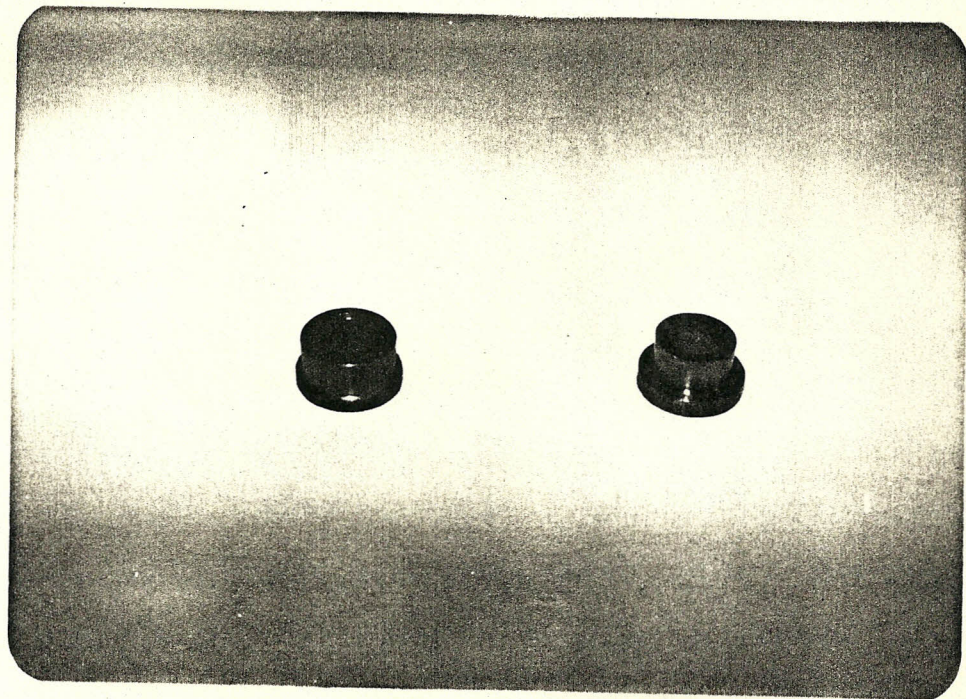


Fig 4.27 Bocines pulvimetalúrgicos maquinados

## CAPITULO V

### DISCUSION DE RESULTADOS

Durante las pruebas realizadas en las diferentes etapas del proceso pulvimetalúrgico se hallaron resultados que a continuación analizamos.

El polvo utilizado en las pruebas es cobre puro, cuya composición química se muestra en la Tabla X, su densidad aparente es  $3.24 \text{ Kg/dm}^3$  ( $3.24 \text{ g/cm}^3$ ), mediante la observación al microscopio de este polvo se pudo determinar que es de forma irregular y tiene una distribución de tamaño de grano bastante aceptable (Figura 4.1) para someterlos al proceso de compactación ya que este parámetro tiene mucha incidencia sobre las propiedades del producto final.

La conductividad y resistividad eléctrica del polvo de cobre son muy similares a las del cobre obtenido por los procesos convencionales, lo mismo se puede decir del punto de ebullición y fusión. Estos valores se observan en la Tabla XI.

Analizando la curva de la Figura 4.8, presión de compactación vs densidad en verde, que se la obtuvo

presionando 6 porciones de polvo de 36 gramos cada una a diferentes niveles de compactación; se observa que la densidad aumenta conforme se incrementa la presión de compactación y la curva se comporta de manera asintótica.

Observando la Figura 4.9, podemos analizar el comportamiento de la curva: Dureza vs Presión de compactación. La variación de la dureza no es muy significativa cuando la presión se incrementa entre 15 y 25 tsi, a partir de 26 tsi hasta 38 tsi se observa un notable incremento en la dureza. Para presiones mayores el aumento en esta propiedad mecánica es menos pronunciada, tomando finalmente la curva una forma asintótica. Este comportamiento tiene su explicación debido a que la aplicación de presiones iniciales producen la unión de las partículas pero sin una deformación mayor de las mismas, a medida que incrementamos la presión esta deformación se hace muy grande ( el trabajado en frío que se realiza sobre las partículas se incrementa ) por lo tanto aumenta la dureza bruscamente.

Otra propiedad mecánica que se analiza en esta primera etapa del proceso pulvimetalúrgico es la resistencia máxima en la compresión mostrada en la Figura 4.10. Podemos notar que esta resistencia aumenta conforme se incrementa la presión de compactación y su comportamiento es de una forma lineal

Analizando las curvas anteriores se puede dar cuenta que para una presión de compactación de 38 tsi se obtienen propiedades mecánicas aceptables y por lo tanto una magnífica coherencia entre las partículas factor muy importante para el libre manipuleo de las probetas en este estado. De esta manera escogemos como parámetro óptimo la presión de compactación de 38 tsi, valor para el cual tenemos las siguientes propiedades mecánicas en verde: Densidad en verde =  $7.9 \text{ g/cm}^3$ , dureza en verde = 120 Brinell y resistencia máxima en compresión =  $27.7 \text{ Kg/mm}^2$ .

Tanto el incremento en la dureza como en la densidad tienen justificación al observar las microfotografías mostradas en la Figura 4.12, en las cuales se puede ver claramente la disminución de la porosidad entre las partículas de polvo al incrementarse la presión de compactación.

El uso de un lubricante (grafito en pasta) en las paredes de dados y punzones ayudó a la compactación y eyección de los compactos pues no se tuvieron problemas de soldadura en frío y abrasividad entre las partículas del polvo y las matrices. La buena lubricación usada requirió la utilización de presiones relativamente bajas en la eyección de las probetas del dado.

En el proceso de compactación se pudo observar un crecimiento en las dimensiones radiales de las probetas

después de que el compacto fue eyectado del dado. Este crecimiento en verde es debido a la liberación de los esfuerzos elásticos en el material una vez que la fuerza usada en la compactación ha sido removida; esta liberación de esfuerzos puede causar la ruptura del enlazamiento mecánico entre las partículas del polvo. Sin embargo no tuvimos mayor inconveniente con este crecimiento radial en verde.

Analizando la curva de la Figura 4.14 vemos que en las probetas presionadas a 38 tsi y sometidas al proceso de sinterización a una temperatura de 900 °C se incrementa la densidad inmediatamente hasta alcanzar su máximo valor en un tiempo de 20 minutos, tiempo para el cual la densidad es aproximadamente 8.1 g/cm<sup>3</sup>; esto es debido a la alta temperatura usada en la sinterización la cual se refleja en una rápida contracción de los poros e incluso disminución en la cantidad, dando como resultado la densificación. Para tiempos mayores se puede decir que la densidad se mantiene constante, aunque se puede apreciar un decremento muy pequeño en esta propiedad.

Al analizar la curva de la Figura 4.15, se observa que la dureza de las probetas sinterizadas disminuye al aumentar el tiempo de sinterización hasta 40 minutos llegando a un valor mínimo de 43 Re para luego sufrir un incremento a 47 Re para un tiempo de 60 minutos. La caída en la dureza es causada indudablemente por una recuperación de las

partículas del metal que fueron endurecidas por deformación durante la compresión, especialmente porque la presión aplicada fue relativamente alta.

En las microfotografías tomadas a las probetas compactadas a 38 tsi y sinterizadas a tiempos diferentes, mostradas en la Figura 4.16, se puede observar un grano pequeño y conforme se incrementa el tiempo de sinterización se aprecia mejor el límite de grano.

En las microfotografías de la Figura 4.26, se aprecia una disminución en la porosidad (zonas oscuras) debido al incremento de la presión de compactación manteniendo el mismo tiempo y temperatura de sinterización.

En la fabricación de los bocines se utilizaron los parámetros óptimos encontrados durante el proceso pulvimetalúrgico; las durezas obtenidas en verde y sinterizadas son las siguientes:

Bocin en condición verde a 38 tsi	110 Brinell
Bocin sinterizado a la condición óptima	47 Re

Los resultados obtenidos con los bocines se diferencian un poco a los obtenidos con las probetas cilíndricas, debido principalmente a que la columna de polvo suelto es bastante alta con relación al espesor (tomando en cuenta que se utilizó la misma cantidad de polvo), dando como resultado una mayor variación de densidad en la longitud del bocin y por ende un menor enlazamiento mecánico entre

partículas lo que implica una disminución en la dureza debido a la menor deformación de las partículas del polvo.

En la Tabla XVI se presentan los resultados de los bocines fabricados con la aleación 90Cu-10Sn, compactados a diferentes presiones y sinterizados bajo una atmósfera protectora de nitrógeno durante 15 minutos, se puede apreciar un aumento en la dureza a medida que aumenta la presión de compactación.

En el ensayo de maquinabilidad se pudo comprobar una excelente adaptabilidad de los bocines pulvimetalúrgicos para requerimientos de maquinado, mostrando buen acabado superficial según se muestra en la Figura 4.27.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES

Para obtener el bocin pulvimetalúrgico se llevó a cabo un estudio profundo de las características que presenta el polvo de Cobre para su compactación y sinterización de cuyos estudios se ha sacado las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- El polvo de cobre de forma irregular obtenido por atomización presenta magnificas carateristicas para ser sometido al proceso de compactación.
- Las particulas del polvo de la aleación 90Cu-10Sn tienen igualmente una forma irregular.
- El enlazamiento mecánico por deformación plástica de las particulas fue muy buena, incluso para niveles de compactación relativamente bajos ya que no se presentó problema alguno en el manipuleo de las probetas es este estado ( verde ).
- El uso de lubricante ( grafito en pasta ) usado en el proceso de compactación, presentó magnificas características para contrarrestar la fricción entre

las paredes de dados y punzones y facilitó la eyección de los compactos, ya que para este propósito se usaron presiones muy bajas en relación a las utilizadas en la compactación.

- La presión óptima con la cual se obtuvieron los bocines fue de 38 tsi, para lo cual tenemos una densidad verde de  $7.9 \text{ g/cm}^3$  y una dureza de 120 Brinell.
- Aplicar presiones excesivamente grandes al sistema no tiene significación, ya que la mejoría en las propiedades mecánicas es mínima.
- La atmósfera protectora de nitrógeno en el proceso de sinterización evitó en gran medida que las piezas se contaminaran con los gases dañinos del aire, los cuales si hubieran entrado en contacto con la pieza hubiesen formado óxidos en los límites de grano y afectado su composición química dando como resultado una ineficiente sinterización y por lo tanto una disminución de las propiedades mecánicas.
- El tiempo óptimo de sinterización para el polvo de cobre fue de 15 minutos, con una densidad de  $8.1 \text{ g/cm}^3$  y una dureza de 51 Re para  $900^\circ\text{C}$  de temperatura de sinterización.
- La temperatura de sinterización cercana a la temperatura de fusión sirvió para formar los límites de grano en tiempos relativamente cortos.

- La porosidad en toda pieza fabricada por pulvimetalurgia estará presente, pero ésta disminuye con una presión de compactación mayor y con el incremento de la temperatura y tiempo de sinterización.
- El tamaño de grano aumenta con el aumento de la temperatura y tiempo de sinterización.
- Los bocines obtenidos son de gran precisión y de un excelente acabado superficial.
- En la fabricación de bocines con la aleación 90Cu-10Sn, que es la más ampliamente usada en la fabricación de bocines pulvimetalúrgicos, hubo presencia de sinterización en fase líquida, explicada en el Capítulo III.
- Los polvos de bronce son talvés los más dificultuosos de todos los materiales pulvimetalúrgicos para sinterizar. Esto es debido a su alta característica de crecimiento después de la compactación y durante la sinterización y su sensibilidad a las variaciones de densidad.
- El bocin " verde ", una mezcla elemental de cobre y estaño, se transformó a una aleación homogénea bronce alfa, aplicando una temperatura arriba del punto de fusión del estaño pero debajo del punto de fusión del cobre.

- Los bocines de bronce fabricados por pulvimetalurgia pueden ser mecanizados para darles un dimensionamiento final.

#### RECOMENDACIONES

- La producción de partes pulvimetalúrgicas resulta económico cuando se traten de grandes producciones ya que el costo de las matrices es oneroso.
- Pese al alto costo de la inversión inicial, la utilización de esta técnica se justifica en gran medida por la ausencia de desperdicios debido a que en la piezas pulvimetalúrgicas la maquinación es eliminada o en su defecto tremendamente reducida, la pérdida de material durante el proceso es casi nula y se pueden obtener directamente piezas de gran exactitud.
- Para obtener mejores propiedades mecánicas se recomienda utilizar prensas de doble acción.
- Algunas propiedades físicas, químicas y tóxicas del polvo de cobre aún no han sido investigadas totalmente, por lo que se recomienda, para futuros trabajos con este material, tomar las debidas precauciones.
- Se recomienda seguir en la investigación de la fabricación de bocines de bronce ya que, como dijimos antes, es uno de los materiales más difíciles de sinterizar.

## BIBLIOGRAFIA

1. ASM, Metals Handbook (Ninth Edition), OHIO 1986
2. AVNER, H. Metalurgia Física.
3. CHOUSSIN, C. - HILLY, G. Metalurgie, tomo II, URMO, Bilbao, 1972, P. 276-289
4. GERMAN, R. Powder Metallurgy Science, ISBN, New Jersey 1984  
P. 73-80
5. GOETZEL, G. Treatise on Powder Metallurgy, tomo I, 1949, tomo II, 1950
6. KLAR, E. Powder Metallurgy, Carnes Publication Services, Inc. 1983, P. 151-154
7. MENDOZA, I. Fabricación de Piezas por Pulvimetalurgia, Tesis de grado, 1984
8. TAUDENBLAT, P. Copper Base Powder Metallurgy, MPIF, New Jersey, 1980, PP 5-45, 123-145, 173-211