



308 917 26
Teje

UNIVERSIDAD PANAMERICANA

ESCUELA DE INGENIERIA
CON ESTUDIOS INCORPORADOS A LA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ANALISIS DESCRIPTIVO Y PROPUESTA
DE MEJORAS DEL PROCESO DE ESTIRA-
DO Y RECOCIDO DE ALAMBRE DE COBRE
PARA LA FABRICACION DE
CONDUCTORES ELECTRICOS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

AREA: INGENIERIA MECANICA

P R E S E N T A

RAFAEL MENDEZ MARTINEZ

DIRECTOR: FIS. MARIANO ROMERO VALENZUELA

MEXICO, D. F.

1994

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Este trabajo quiero dedicarlo:

A Gabriela por todo su amor y entrega.

A Paola y a sus futuros hermanos.

A mis padres Mariangeles y José por todo su apoyo.

A mis hermanos y amigos con todo cariño.

Agradezco especialmente al Ing. Armando Ortiz Prado y al Doc. Roberto Jacobus ya que gracias a su valiosa colaboración fué posible realizar y concluir este trabajo.

Indice

Introducción	4
Capítulo 1.	
El Cobre.	
1.0 Antecedentes.	7
1.1 Aleaciones y Características del Metal.	10
1.2 Estadística del Mercado Mexicano y Mundial.	12
Capítulo 2.	
Procesos y Características del Metal para su Utilización en Conductores Eléctricos.	
2.1 Procesos de Refinación.	25
2.1.1 Refinación Electrolítica.	25
2.1.2 Refinación por Hidrometalurgia.	29
2.2 Procesos de Colada Continua.	32
2.3 Efectos de las Impurezas.	38
2.4 Características Requeridas en el Alambrón de Cobre.	44

Capítulo 3.

Bases Teóricas del Proceso de Estirado.

3.1 Generalidades de los Procesos de Trabajo en Frío, Características y Clasificación.	48
3.2 Principios Básicos del Estirado.	52
3.3 Características de la Herramienta.	58
3.4 Análisis Teórico de los Esfuerzos.	62
3.5 Causas Típicas de Falla.	68

Capítulo 4.

Proceso de Recocido en Línea.

4.1 Efectos del Trabajo en Frío en Alambres Estirados.	70
4.2 Recocido.	72
4.3 Definición y Ventajas del Recocido en Línea.	74
4.4 El Recocedor Electro Resistivo.	77
4.5 Efectos en el Recocido del Alambre.	81

Capítulo 5.

Análisis Práctico del Proceso de Estirado.

5.1 Características de la Máquina.	87
5.2 Geometría de la Herramienta.	90
5.3 Cálculo de Líneas de Estirado.	91
5.4 Efectos de la Deformación.	94
5.5 Estudio Metalográfico del Proceso.	96
5.6 Cálculo de la Potencia Requerida en el Proceso.	104

Capítulo 6.

Desarrollo de Mejoras.

6.1 Incremento de Velocidades.	108
6.2 Los Angulos de Estirado.	111
6.3 Modificaciones al Equipo.	113
Conclusiones.	118
Bibliografía.	123

Introducción

En la Industria Mexicana se ha trabajado desde hace muchos años en la fabricación de conductores eléctricos. Estas tecnologías se han adquirido por medio de asociaciones tecnológicas con países más industrializados que el nuestro. Al paso de los años se han mantenido en operación los procesos, sin embargo, se han ido perdiendo las bases de esta tecnología. Existe en nuestro país una gran necesidad por conocer las nuevas investigaciones que se realizan en otros países que nos llevan la delantera y, de esta manera, actualizar y desarrollar las operaciones actuales. El objetivo de este trabajo es el realizar un estudio sobre las expectativas del uso del cobre, las bases técnicas actuales del estirado y recocido de éste, cómo se están operando los procesos en una empresa mexicana y cómo fue posible mejorar el proceso actual. Esta documentación actualmente no se tiene y servirá como punto de partida para desarrollar material de capacitación y plantear nuevos proyectos de estudio para la mejora del proceso.

El primer capítulo presenta un análisis actual de la situación del cobre en México, sus aleaciones y características y un estudio de mercado del cobre. En el segundo capítulo se muestran los procesos de refinación, los efectos de las impurezas, los procesos de colada continua para la fabricación de alambón y las características requeridas en el cobre para la fabricación de conductores eléctricos.

En el tercer capítulo se presentan los principios actuales de la teoría del estirado de alambre de cobre y en el siguiente se explica el funcionamiento de los recocedores electro resistivos utilizados en la manufactura de alambre suave de cobre. El quinto capítulo muestra las condiciones actuales del proceso de estirado en un empresa líder en la fabricación de conductores eléctricos de cobre. Posteriormente se muestra un análisis metalográfico de la deformación que sufre el metal a lo largo del proceso.

En el sexto capítulo se muestra el desarrollo de algunas mejoras realizadas al proceso y finalmente, en el séptimo capítulo se presentan las conclusiones del estudio.

Capítulo 1.

El Cobre.

1.0 Antecedentes.

La historia industrial del género humano se divide en dos grandes épocas: la edad de piedra y la edad del metal. Entre estas dos épocas hubo un período de transición, en él se encontraron algunos metales en su estado nativo y fueron convertidos en útiles herramientas incluyendo armas y objetos de arte. La palabra cobre proviene del nombre griego Kipros (que es la isla de Chipre) a través del latín coprum. La producción de cobre en esta isla se inició en el año 2,500 a.C., Chipre fue uno de los principales lugares de adoración de la deidad romana "Venus", y el signo del zodiaco para el planeta del mismo nombre es el jeroglífico egipcio que significa "vida perdurable" y fue utilizado para representar el cobre en los tiempos antiguos. También en la actualidad este signo ha sido adoptado y aceptado para simbolizar dicho metal. El cobre ya era utilizado por los egipcios hace 6,000 años y muy pronto descubrieron que este metal era fácilmente moldeable y según la habilidad para trabajarlo se le podía dar diferentes formas y aplicaciones.

Las propiedades del cobre, bronce (cobre - estaño) y latón (cobre - zinc), hicieron que estos metales tuvieran múltiples funciones a través de la edad

media, en la revolución industrial y aún más en nuestros días. Con el desarrollo de la energía eléctrica, comenzó la edad eléctrica y desde entonces la demanda de cobre ha crecido considerablemente. En el mismo siglo Gran Bretaña fue el mayor productor del metal rojo, después se abrieron nuevas minas en Estados Unidos, Chile y más tarde en África; hasta que en 1911 la producción mundial de cobre excedió el millón de toneladas por año, según información proporcionada por la Asociación Mexicana del Cobre (AMECOBRE).

Con el aumento de todas las ramas de la actividad humana, que siguió a la revolución industrial, se descubrieron nuevos e importantes usos para el cobre y los adelantos en la metalurgia permitieron encontrar numerosas y nuevas aleaciones de cobre.

Según AMECOBRE en 1990 el consumo de países como Francia, Alemania, Gran Bretaña, Italia, Japón y EE.UU., alcanzó la suma de 5.5 millones de toneladas, siendo los principales productores EE.UU., URSS, Chile, Canadá, Zambia, Zaire y Perú. La ductilidad del cobre que lo llevó a ser utilizado para la canalización de las aguas del Antiguo Egipto, se confirmó con los cientos de miles de tuberías que se

usan actualmente en los sistemas de calefacción y cañería.

La resistencia del cobre a la corrosión que indujo a los romanos a usarlo para forrar el techo del templo de sus dioses, está comprobada hoy por innumerables techos de cobre usados en pequeños y grandes edificios modernos.

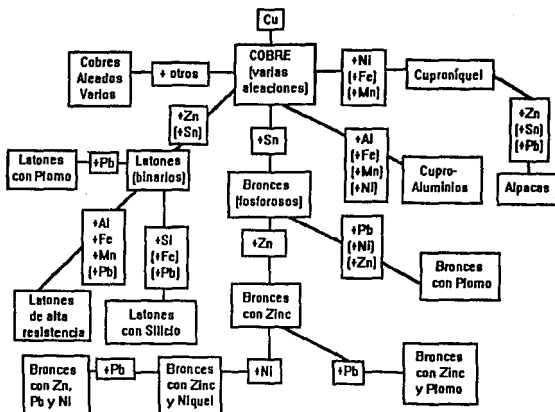


Figura 1.1 El cobre y sus aleaciones.

1.1 Aleaciones y Características del Metal.

La mayoría de los metales corrientes se combinan con el cobre para formar aleaciones, con excepción del hierro, existiendo más de 1,100 aleaciones de cobre. En la figura 1.1 se muestran estas combinaciones.

Las propiedades del cobre más importantes son la alta conductividad eléctrica y térmica, buena resistencia a la corrosión, maquinabilidad y facilidad de fabricación. Además el cobre no es magnético, tiene un color atractivo, puede ser soldado con latón o estaño, y fácilmente se termina por revestimiento metálico (galvanizado) o barnizado. Algunas de estas propiedades básicas pueden mejorarse mediante una aleación adecuada. La mayor parte del cobre que se utiliza para conductores eléctricos contiene sobre 99.9 % de cobre y se identifica como cobre electrolítico resistente al depósito de grasa (ETP) o como cobre libre de oxígeno de alta conductividad (OFHC). Algunas otras propiedades se describen a continuación en la tabla 1.1 .

Número Atómico.	29
Peso Específico.	8.89 gr/cm ³
Conductividad Eléctrica.	100 % IACS
Conductividad Térmica.	0.93 cal/cm ³
Temperatura de Fusión.	1,083 °C
Coefficiente de Dilatación Lineal por °C.	16.22 x 10 ⁶
Calor Específico.	0.0918 cal/gr°C
Resistencia Volumétrica a 20 °C.	0.017241Ω-mm ² /m
Resistividad Eléctrica (Ω en 304.8 m a 20 °C).	10.371 Ω
Esfuerzo de Tensión, Temple Duro.	3,870 Kg/cm ²
Esfuerzo de Tensión, Temple Suave.	2,250 Kg/cm ²
Módulo de Elasticidad.	1,200,000 Kg/cm ²
Resistencia al Corte.	1,750 Kg/cm ²
Resistencia Límite de Fluencia.	560 Kg/cm ²

Tabla 1.1 Propiedades físicas del cobre.

El cobre electrolítico también se utiliza en materiales para techos, albañales, tuberías, radiadores y empaques para automóvil, teteras, cubas, recipientes a presión en equipos para destilería y otros procesos. El cobre electrolítico contiene de 0.02 a 0.05 % de oxígeno, el cual se combina con el cobre en forma de compuesto óxido cuproso (Cu₂O). En la condición de fundido (sin tratamiento térmico), el óxido de cobre y el cobre forman una mezcla interdentritica eutéctica. Después de trabajada y recocida, la red se destruye, y la resistencia mejora. El cobre libre de oxígeno se utiliza en tubos

electrónicos o aplicaciones similares porque logra un sello perfecto con el vidrio.

1.2 Estadística del Mercado Mexicano y Mundial.

El mundo entero está cambiando rápidamente, ésta es una realidad con la que vivimos todos los días, en ésta sección se muestra información del entorno actual del cobre y de cómo éste ha cambiado en los últimos años.

En febrero de 1994 la compañía Noranda Sales Corp. de Canadá presentó en Nueva York una ponencia donde muestra las tendencias actuales en producción de mineral de cobre y el volumen de refinación mundial del mismo. La figura 1.2 nos muestra esta información.

Como se observa en estas gráficas de 1983 a 1993 Estados Unidos ha desplazado a Africa de tal manera que el mayor volumen de mineral de Cobre se produce ahora en conjunto con Chile. En cuanto a la producción de cobre refinado actualmente los Estados Unidos ocupan el primer lugar y Asia es tan grande como Sudamérica en un segundo lugar.

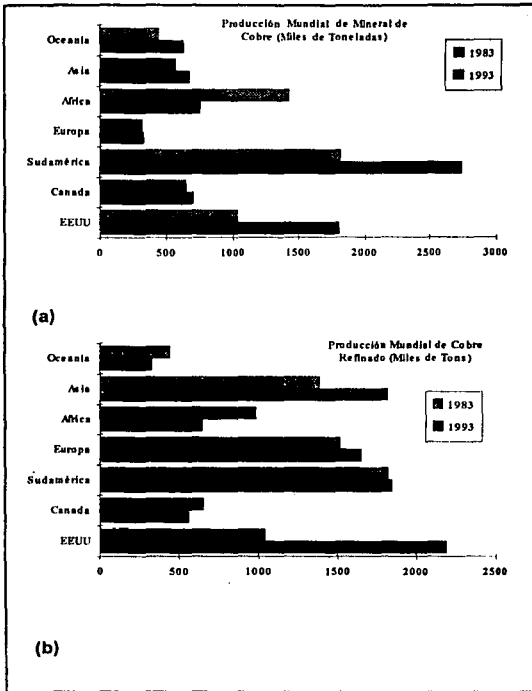


Figura 1.2 (a) Producción mundial de mineral de cobre en miles de toneladas y (b) volumen de refinación de cobre.

En los siguientes años según esta misma compañía, el volumen mundial de producción de mineral de cobre de 1993 se va a mantener en 6.8 millones de toneladas para 1994 y en 1995 y 1996 se esperan volúmenes de 7.1 y 7.5 millones de toneladas respectivamente. Esto se debe principalmente al potencial de la mina llamada Escondida en Chile, descubierta en 1991 que va a ser explotada con mayor impulso, y además a las expansiones en Freeport Indonesia y Kennecott Bingham Canyon en Estados Unidos.

La Asociación Mexicana del Cobre (AMECOBRE) mencionada anteriormente realiza publicaciones con información interesante del mercado del cobre, en 1992 publicó información que se resume en el resto de esta sección.

En primer lugar se presenta en la tabla 1.2 información estadística sobre el consumo de cobre refinado en México en los últimos años.

Como se aprecia en la tabla 1.3 durante 1991 el consumo total de cobre fue de 146,700 toneladas y para 1995 se espera un incremento para consumir 207,000 toneladas, éste crecimiento por sector se ilustra en la figura 1.3. La capacidad de producción

en México, incluyendo las instalaciones más recientes de refinación en Pasteje, no es suficiente para cubrir la demanda futura. Como se observa los sectores con mayor crecimiento serán el de comunicaciones y el automotriz.

AÑO	PRODUCCION	IMPORTACIONES		EXPORTACION	CONSUMO TOTAL
		DEFINITIVAS	TEMPORALES		
1986	89.5	3.5	-0-	24.3	68.7
1987	134.8	3.0	4.4	60.3	81.9
1988	140.9	29.0	21.0	69.8	121.1
1989	147.0	64.2	44.1	77.3	178.0
1990	152.8	36.5	37.1	58.6	167.8
1991	159.4	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.

N.D. = INFORMACION NO DISPONIBLE

TABLA 1.2. Consumo aparente de cobre refinado en México (miles de toneladas).

En la figura 1.4 se muestra en porcentajes cómo se conformó el mercado por los diferentes sectores industriales en 1991 y cómo se espera esta composición para 1995.

SECTOR	1991	1995	CRECIMIENTO ESPERADO
ELECTRICO			
1 DISTRIBUCION	17.6	23.5	33.5%
2 CENTRALES	0.4	0.5	25.0%
3 MOTORES	13.9	16.6	19.4%
4 TRANSFORMADORES	2.0	2.6	30.0%
CONSTRUCCION			
5 VIVIENDA	44.5	53.1	19.3%
6 INDUSTRIAL	25.2	30.8	22.2%
7 COMUNICACIONES	9.2	29.1	216.3%
8 AUTOMOTRIZ	19.3	30.1	56.0%
9 OTROS	14.6	20.5	40.4%
TOTAL	146.7	206.8	41.0%

Tabla 1.3 Proyecciones de consumo de cobre refinado en diferentes sectores industriales (miles de toneladas).

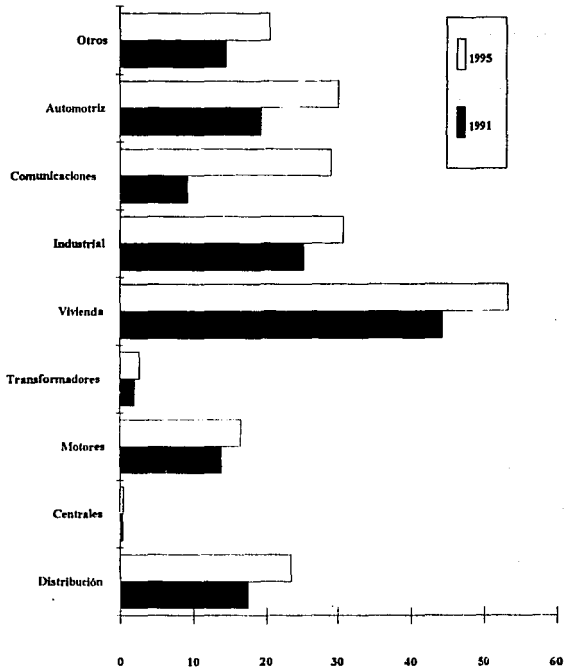


Figura 1.3 Crecimiento del mercado por sector en miles de toneladas.

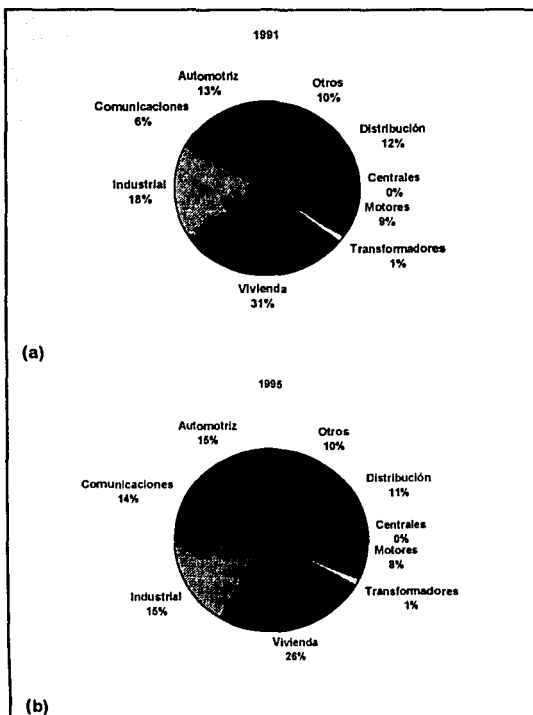


Figura 1.4 (a) y (b) Proyección de consumo de cobre refinado en diferentes sectores industriales.

El mercado de las maquiladoras presume un consumo importante de cobre y con la actual firma del Tratado de Libre Comercio con Estados Unidos y Canadá el consumo irá creciendo significativamente en los próximos años.

Por otro lado es importante no perder de vista la reducción de costos en productos por la competencia o por la miniaturización de los mismos, éstos son factores que frenan el crecimiento del uso de cobre en el largo plazo.

Otros factores que disminuyen el uso del cobre son la fibra óptica, el aluminio, el acero galvanizado y los plásticos ya que está más que comprobada su substitución con el cobre, sin embargo, a pesar de éstos, el cobre en México tiene un importante consumo potencial y un crecimiento en su uso asegurado. La intensidad de uso de cobre se define como el consumo de cobre entre el producto interno bruto constante y es un parámetro de medición del consumo en cada nación. Esta intensidad de uso aumenta hasta un cierto nivel de ingreso per cápita, después decrece. La tabla 1.4 nos presenta información estadística de

1960 a 1985. La fuente de información es Growth Patterns in Copper Consumption in Industrializing Countries.

PAIS	1965	1970	1975	1980	1985	PIB USD
India	0.66	0.47	0.25	0.48	0.55	240
Filipinas	N.D.	0.22	0.11	0.09	0.14	690
Turquía	0.26	0.39	0.40	0.59	1.12	1,470
Corea	0.12	0.27	0.64	1.35	2.37	1,520
Brasil	0.41	0.63	0.86	0.99	0.73	2,050
México	0.54	0.55	0.52	0.63	0.58	2,090
Chile	4.27	0.96	1.40	1.56	0.96	2,150
Sudáfrica	0.78	0.64	0.97	1.14	1.01	2,300
Portugal	0.83	0.78	0.71	0.75	0.61	2,370
Argentina	0.34	0.24	0.31	0.34	0.33	2,390
Yugoslavia	2.07	1.87	2.08	2.19	2.21	2,620
Japón	1.11	1.25	1.00	1.09	0.94	9,890
EE.UU.	0.98	0.96	0.63	0.72	0.64	11,360
Suecia	1.14	0.85	0.81	0.85	0.82	13,520

Tabla 1.4 Intensidad de uso de cobre basado en el Producto Interno Bruto constante (1980) de algunos países en años selectos.

En el contexto mundial, México ocupa los siguientes lugares:

	Lugar
1. Consumo	16o
2. Producción de Mineral	11o.
3. Producción de Blister y Anodo	15o.
4. Producción de Cobre Refinado	16o.

	Consumo	Población	Consumo P/C
Africa			
Egipto	6.0	54.8	0.11
Sudáfrica	67.5	35.8	1.89

Tabla 1.5 (a).

	Consumo	Población	Consumo P/C
Europa			
Dinamarca	0.9	5.2	1.73
Francia	476.5	55.9	8.52
Alemania	873.4	78.7	11.09
Noruega	13.3	4.2	3.17
Reino Unido	323.8	57.1	5.67
España	141.5	39.8	3.56
Italia	477.9	57.5	8.31
Asia			
India	135.0	816.8	0.17
Japón	1,576.5	123.2	12.80
Sur Corea	324.2	45.2	7.17
Taiwan	268.9	20.3	13.25
Turquía	101.1	55.4	1.82
Oceanía			
Australia	112.2	16.5	6.80
Nueva Zelandia	2.4	3.3	0.73

Tabla 1.5 (b).

	Consumo	Población	Consumo P/C
América			
Canadá	184.4	26.6	6.93
EE.UU.	2,159.8	247.5	8.77
Brasil	145.9	154.0	0.95
Argentina	26.3	31.9	0.82
Chile	45.2	12.9	3.50
México	133.5	88.1	1.52

Tabla 1.5 (c) Consumo per cápita de cobre refinado en diferentes países (1990). (Consumo Total en miles de toneladas, consumo per cápita en kilogramos y población en millones).

Para terminar esta sección se expone en la tabla 1.5 información del Newsweek, World Metal Statistics de 1990, ahí podemos apreciar el consumo per cápita de cobre en México de 1.52 Kg contra el de numerosos países del mundo y éste es inferior al de los países industrializados, lo cual confirma un crecimiento en el uso del cobre en México para los próximos años.

Capítulo 2.

Procesos y Características del Metal para su
Utilización en Conductores Eléctricos.

2.1 Procesos de Refinación del Cobre.

En México se utilizan fundamentalmente dos procesos de refinación de cobre. Tradicionalmente se ha obtenido el cobre con una pureza arriba del 99.99% a partir de procesos electrolíticos, sin embargo, actualmente La Compañía Minera de Cananea S.A. (CMC) aplica procesos hidrometalúrgicos en la obtención del cobre para uso en conductores eléctricos. En esta sección se presenta un resumen de estos procesos.

2.1.1 Refinación Electrolítica.

La refinación electrolítica inicia con el tratamiento del mineral, éste parte de la perforación y extracción de yacimientos para la obtención del mineral. La figura 2.1 nos muestra la secuencia del proceso. Básicamente se tienen yacimientos a cielo abierto, vetas que afloran o se encuentran cercanas a la superficie y depósitos profundos o subterráneos. El mineral obtenido de la mina tiene un contenido de cobre del 1 al 5% y es transportado a la sección de trituración primaria, en donde se efectúa una primera

reducción del tamaño del material, éste es enviado después, a través de bandas transportadoras, a la sección de trituración, obteniéndose partículas de tamaño menor a media pulgada.

El mineral se envía a la sección de molienda, mezclándose con agua se introduce a los molinos de bolas, donde el golpeteo de las mismas produce la fragmentación y reducción del tamaño del mineral, obteniéndose un polvo muy fino, el cual se lleva a la sección de flotación, que consiste en la separación del mineral con valor, del mineral estéril.

En las celdas de flotación, se introduce el mineral con ciertos reactivos químicos agitándose e inyectándose aire, siendo el resultado la formación de una espuma que capta aquellas partículas que contienen cobre y las hace flotar en la superficie.

El material no útil se va al fondo de la celda. La espuma superficial se descarga por derrame, enviándose a la sección de filtrado y secado, obteniéndose un concentrado cuyo contenido de cobre oscila entre 20 y 30%.

La segunda etapa del proceso es la fundición, esta operación se realiza en un horno y consiste en la fusión del concentrado de cobre, al que se le agrega la cantidad necesaria de sílice. En esta operación se generan dos productos líquidos: la mata de cobre y la escoria. La mata es una mezcla fundida de compuestos sulfurosos de cobre y hierro, mientras que la escoria contiene óxidos de hierro y sílice, en menor proporción se generan óxidos de azufre.

La mata obtenida se transporta en estado líquido al horno convertidor en donde se insufla aire, se añade sílice para formar escoria con el hierro y se separa el azufre como dióxido de azufre en los gases. El producto de la conversión es el cobre ya en estado metálico, fundido, al cual se le conoce como cobre ampollado.

Posteriormente se realiza una refinación primaria del cobre ampollado, consiste en la sobre oxidación y reducción del mismo para eliminar impurezas, colándolo en forma de ánodos. En esta etapa, el cobre obtenido tiene una pureza de hasta 99.5%.

Finalmente la materia prima de la refinación la constituyen los ánodos, que son piezas de forma tal,

que pueden ser introducidos en las celdas electrolíticas.

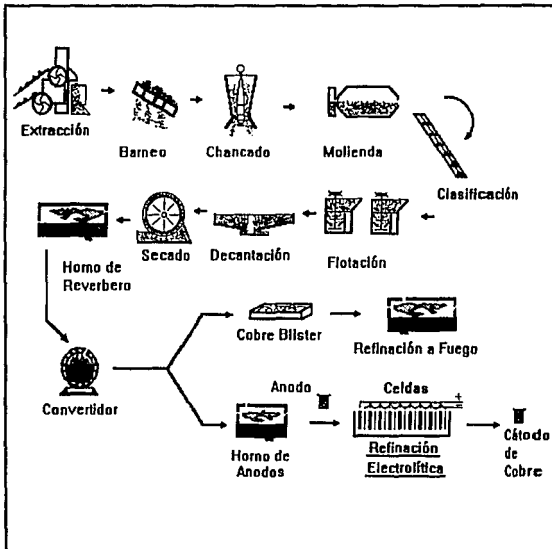


Figura 2.1 Diagrama del proceso de refinación.

La refinación del cobre, se efectúa en bancos de celdas, en donde se colocan alternados los ánodos y las hojas iniciadoras, siendo estas laminillas muy

delgadas de cobre con el área suficiente para iniciar el depósito, sumergidas en una solución de sulfato de cobre.

El proceso final de refinación consiste en producir una diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo, disolviéndose el primero en la solución y depositándose en el segundo el cobre disuelto. Las impurezas y con ellos los metales preciosos, caen al fondo, formando lo que se conoce como lodos anódicos, de donde se extraerán posteriormente oro, plata, selenio, telurio y plomo, los cuales son materias primas para otras áreas industriales muy importantes.

2.1.2 Refinación por Hidrometalurgia.

Como comentamos, es posible en la actualidad obtener placas de cobre puro a través de procesos hidrometalúrgicos. En sentido amplio la hidrometalurgia envuelve la recuperación de componentes valiosos de materiales crudos, primarios o secundarios, por medio de reacciones a temperatura relativamente baja y en un medio acuoso. De manera general un proceso hidrometalúrgico consta de tres operaciones:

- Lixiviación.
- Concentración y/o purificación de la solución.
- Recuperación del producto.

La lixiviación consiste en una reacción para disolver selectivamente un elemento del material crudo, con el objeto de obtener una solución de dicho elemento. El reactivo usado en la operación debe ser lo suficientemente selectivo para evitar que sean disueltos otros componentes y facilitar las etapas subsecuentes. En el caso de CMC se utiliza como reactivo una solución acidulada con H_2SO_4 . La concentración y purificación tiene por objeto preparar la solución lixiviada para la recuperación del producto. Existen varias técnicas que se clasifican de acuerdo a la reacción química que se lleva a cabo e incluyen las siguientes categorías:

- Precipitación.
- Cementación.
- Extracción por solventes.
- Intercambio iónico.

Su aplicación depende de las impurezas a remover y de los componentes a recuperar.

La recuperación del producto es el proceso que lo convierte en un material comerciable con especificaciones de calidad asociadas. Esta parte de la hidrometalurgia engloba la purificación de una fase sólida o la recuperación de una solución acuosa purificada y concentrada. Las técnicas más comunes para la recuperación del producto son:

- Electrólisis.
- Reducción gaseosa.
- Precipitación.

Una vez explicados en forma general los procesos hidrometalúrgicos para la refinación del cobre hablaremos concretamente de los procesos utilizados en Cananea. El inicio del proceso de CMC tiene sus raíces en el área de tajo, en él se provee el mineral con el que se forman los terreros que posteriormente se riegan con una solución acidulada con H_2SO_4 como reactivo, para obtener un licor de lixiviación que es captado en una serie de represas para su posterior bombeo a la planta de extracción por solventes y depositación electrolítica. También se realiza un proceso de cementación, del que se obtiene cobre cemento a partir de chatarra de cobre. El cobre

cemento se envía a la fundición para la recuperación del cobre en un producto comercial.

2.2 Proceso de Colada Continua.

La producción de alambón de cobre ha sufrido en las últimas décadas un constante desarrollo tanto en modo o técnica de fabricación como en volúmenes de producción. La tecnología de fabricación hoy en día es a través de procesos que incluyen las etapas de fabricación continua, colada o formación de barra o lingote, laminación en caliente y decapado, todo ello en "Tandem".

Estos procesos son conocidos como colada continua, sustituyendo la fabricación tradicional de rollos sin decapar (oxidados) de 113 a 226 Kg de peso. Hoy en día los rollos son de 2,000 hasta 6,000 Kg.

La constante modernización en los procesos de laminación condujo al desarrollo de la colada continua. Esto es un sistema continuo del proceso de formación de barra y laminación. Para el alambón de cobre y otras aleaciones no ferrosas los diferentes sistemas de colada que han liderado el mercado son:

- Sistema Southwire (SCR).
- Proceso Dip-Forming.
- Proceso Hazelett de Colada Continua.
- Sistema Properzi.

Todos ellos manejan las etapas continuas de:

- a) Fusión.
- b) Colada.
- c) Laminación.
- d) Decapado (limpieza).
- e) Empaque.

En cada uno de estos sistemas se utilizan conceptos diferentes y particulares en cada etapa, que llevan al mismo fin: producir alambre de cobre de manera continua y con las características de buena práctica comercial, con el beneficio mutuo a productores y usuarios.

Todos los procesos de fusión son muy similares, normalmente el cátodo de cobre electrolítico es

alimentado a un horno vertical y fundido a $1,150^{\circ}\text{C}$ aproximadamente. Entonces el cobre líquido es guiado vía un canal hacia un horno de retención y de aquí a una máquina de colada, en este trayecto puede ser controlado el contenido de oxígeno. Ahora describiremos brevemente los procesos de colada continua partiendo de la etapa de fusión.

A) Proceso Properzi.

El cobre líquido es alimentado a una rueda de colada, ésta rota conjuntamente con una banda de acero formando un molde continuo. De aquí se obtiene una barra continua, la cual se dirige a la máquina de laminación. En caso de problemas en ésta, pueden cortarse barras a la salida de la rueda. La laminadora utiliza tres bloques de rodillos, cada paso contiene tres rodillos colocados 120° uno del otro formando un área triangular. Dependiendo del diámetro final deseado puede tener de 13 a 17 pasos de laminación, todos adaptados a un solo motor. La producción de las primeras plantas fue de 5 ton/hr y se ha incrementado a 20.

B) Proceso SCR.

El sistema Properzi fue posteriormente desarrollado por la compañía Southwire, USA. Principalmente en cuanto a la rueda de colada y enfriamiento, resultando una máquina de mayor velocidad. En la laminadora se colocó un arreglo horizontal - vertical de pares de rodillos. Otra mejora importante fue la limpieza continua del alambón entre la laminación y colección por un decapado de ácido sulfúrico. El alambón se embobina con un sistema llamado "trompa de elefante" formando rollos hasta de 5 tons. Actualmente esta planta puede producir 30 ton/hr.

C) Proceso Dip-Forming.

Dado que los resultados iniciales de las primeras plantas de colada continua no fueron regulares y la calidad del alambón convencional no fue obtenida, General Electric, desarrolló otro proceso que se conoce como Dip-Forming. Este método utiliza una "Semilla Madre" que no es más que un alambón de 8 mm de espesor. Dado que el diámetro es muy variable se pasa por una guía que lo redondea perfectamente y elimina la pequeña cantidad de óxidos adheridos superficialmente. Este alambón pasa posteriormente a través de una laminadora de 6 pasos donde se produce

alambrón de 8 mm, que es el producto terminado y a la vez la "semilla" para iniciar el mismo. La producción de este proceso es de aproximadamente 6 tons/hr.

D) Proceso Contirod.

En 1970 la compañía Metallurgic Hoboken Belgium desarrolló cadenas de colada continua denominadas Contirod las cuales conjuntamente con bandas de coladas Hazelett dió por resultado una máquina de colada continua versátil, que a la vez combinada con la laminadora de Krupp resultó un éxito, formándose un nuevo proceso de colada y laminación continua. En 1973 se presentó al mercado internacional.

En este proceso, el cobre líquido es colado en una máquina Hazelett con bandas de acero y con un par de cadenas que avanzan paralelamente en conjunción con las bandas formando un molde rectangular continuo de 120 x 50 mm. La eficiencia de la colada se incrementa con un enfriamiento secundario con agua espreada directamente sobre la barra colada, lo cual ayuda a obtener un producto con tamaño de grano pequeño y uniforme.

Existe un péndulo de corte, el cual tiene la función de contener la colada continua durante paros de laminación, realizando cortes de barra, las cuales pueden ser recicladas al Horno de Fusión.

La laminadora consta de 3 etapas, una de desbaste, una intermedia y la de terminado, pudiendo realizarse ajustes en esta última, sin alterar la colada o laminación. Existe un sistema de control automático con retroalimentación que asegura una laminación sin tensión.

Los rodillos de laminación están dispuestos en pares, alternativamente horizontales y verticales, generando secciones transversales ovaladas y redondas. Existe un enfriamiento intenso al final de la laminación que ayuda a obtener una temperatura de recristalización baja en el alambro terminado.

Posteriormente se forman espiras con un dispositivo especial (trompa de elefante) y éstas pasan a una solución de decapado a 80°C de ácido sulfúrico, donde el baño elimina la oxidación superficial. Después se enjuaga y se recubre con una película de un aceite soluble que lo protege de la oxidación posterior.

Los rollos obtenidos van de 3 a 5 tons, en las primeras plantas se procesaron hasta 40 tons/hr.

Este proceso Contirod se tiene en operación desde 1985 en Celaya, Guanajuato. La mayor parte de los conductores eléctricos fabricados en el país utilizan alambro de 8 mm de diámetro preparado por esta empresa. La calidad del producto es muy buena y cumple con las normas definidas en la sección 2.4 de

este capítulo. El cobre que ahí se procesa proviene de Cobre de México (CDM) y de Compañía Minera de Cananea (CMC).

2.3 Efectos de las Impurezas.

Como las impurezas reducen sensiblemente la conductividad y las propiedades mecánicas del cobre, en la industria de conductores eléctricos se utiliza principalmente cobre electrolítico (99.97% de pureza).

El cobre electrolítico para ser procesado como alambón para la producción de conductores eléctricos debe cumplir con las especificaciones que se definen en la Tabla 2.1.

A manera de confirmar la importancia de estas especificaciones, se mostrarán cuáles son los efectos nocivos de cada elemento en el cobre.

Algunos autores han definido el término de recocibilidad como la capacidad de suavizar un metal mediante un tratamiento térmico y ésta, como se muestra, es afectada fuertemente por las impurezas, a este término se hará referencia en los efectos descritos a continuación.

Cabe mencionar que mientras estas impurezas permanezcan en niveles menores que los especificados, su efecto dañino será prácticamente nulo.

SELENIO: Causa un efecto dañino tanto en la recocibilidad como en la conductividad eléctrica. Puede provocar fracturas durante el laminado.

TELURIO: Afecta tanto la recocibilidad como la conductividad y puede provocar fracturas oxidadas durante el estirado.

BISMUTO: Afecta la ductilidad y recocibilidad, además favorece el agrietamiento de la barra en laminación, pues vuelve al cobre frágil y quebradizo (debilita los bordes de grano).

CROMO: Afecta la conductividad eléctrica.

MANGANESO: No presenta por sí mismo un efecto dañino relevante en las propiedades del cobre.

ANTIMONIO: Afecta la recocibilidad y la conductividad además de causar fragilidad.

CADMIO: Afecta principalmente la conductividad eléctrica.

ELEMENTO	SIMBOLO	* LME	ASTM	CONTIROD
		CONTRACT	B-115-82	
Selenio	Se	2	4	2
Telurio	Te	2	2	2
Bismuto	Bi	2	2	2
Cromo	Cr	-	-	-
Manganeso	Mn	-	-	-
Antimonio	Sb	4	5	4
Cadmio	Cd	-	-	-
Arsénico	As	5	5	5
Fósforo	P	-	-	-
Plomo	Pb	5	8	5
Silicio	Si	-	-	-
Estaño	Sn	-	10	6
Niquel	Ni	-	8	5
Hierro	Fe	10	12	10
Zinc	Zn	-	-	-
Cobalto	Co	-	-	-
Azufre	S	15	25	10
Plata	Ag	25	25	25
Oxígeno	O2	-	200	150-350
TOTAL		65	90	65

* Contratos de Cobre del Mercado de Metales de Londres.

Tabla 2.1. Especificaciones para cátodos de cobre electrolítico (Grado 1). Concentración máxima en ppm.

ARSENICO: Efecto nocivo sobre la conductividad eléctrica. Puede provocar fracturas oxidadas durante el estirado.

FOSFORO: Afecta principalmente la conductividad eléctrica.

PLOMO: Afecta la recocibilidad, aunque no tanto como el Se, Te, etc.. Puede provocar fracturas durante el laminado. En concentraciones mayores a 20 ppm puede tener un efecto benéfico sobre la elongación de resorte cuando alguna otra

impureza es alta también, esto es, puede inhibir el efecto dañino de otras impurezas.

SILICIO: Afecta la conductividad eléctrica.

ESTAÑO: Afecta la ductilidad y conductividad eléctrica.

NÍQUEL: Afecta la conductividad eléctrica y endurece el cobre.

HIERRO: Afecta la conductividad, además endurece y fragiliza el cobre.

ZINC Y COBALTO: Afectan la conductividad eléctrica.

AZUFRE: Afecta la recocibilidad y conductividad, provoca fragilidad.

PLATA: Tiene un efecto positivo sobre la conductividad y endurece el cobre.

OXIGENO: Afecta la conductividad y ductilidad del alambroón, como se verá adelante su presencia inhibe el efecto dañino de las otras impurezas.

Elemento	Recocibilidad	Ductilidad con oxígeno	Conductividad Eléctrica	Efecto sin Oxígeno
Selenio	4	2	3	5
Telurio	4	2	3	5
Bismuto	3	3	1	5
Cromo	0	0	2	3
Manganeso	0	0	0	0
Antimonio	3	1	4	4
Cadmio	1	1	2	3
Arsénico	1	0	5	4
Fósforo	0	1	2	5
Plomo	3	2	1	5
Silicio	1	1	2	5
Estaño	0	1	1	4
Níquel	0	0	3	3
Hierro	0	1	1	5
Zinc	1	1	2	2
Cobalto	0	0	2	2
Azufre	3	1	3	4
Plata	1	0	1	0
Oxígeno	0	1	3	2

Tabla 2.2 Efectos de las impurezas en las propiedades del cobre en el proceso de fabricación de alambroón.

El efecto de todas estas impurezas en las propiedades del cobre depende si están presentes en la red cristalina (formando parte de la misma) o bien precipitadas en los bordes de grano en forma de óxidos, es decir, el oxígeno formará óxidos con las impurezas disminuyendo su efecto dañino.

Cuando las impurezas se encuentran en solución sólida (en la red cristalina) aumentan la temperatura de recristalización y por lo tanto afectan la recocibilidad del cobre.

En la tabla 2.1 se muestran diferentes especificaciones para la cantidad de impurezas en ppm que pueden tener los cátodos de cobre comercial, en la 2.2 se presenta un resumen del efecto comparativo de las impurezas en las propiedades del cobre y su efecto cuando el oxígeno no está presente, el valor presentado es más dañino cuando es más alto, el valor "0" indica que no se afectan las características del cobre.

2.4 Características requeridas en el Alambre de Cobre.

La fabricación de conductores eléctricos con alambre de cobre requiere de características de pureza, propiedades mecánicas, resistividad eléctrica y dimensiones, como referencias a esta sección se tienen algunas normas nacionales e internacionales, éstas son:

ASTM B-49-90 Especificación de Alambre para
 usos Eléctricos.

ASTM: B-193 Metodo de Prueba para evaluar
 la Resistividad Eléctrica de
 Materiales Conductores.

NOM 3-215-1989 Norma Oficial Mexicana para
 Alambre de Cobre Electrolítico
 para usos Eléctricos.

NOM 3-66 Determinación del diámetro en
 Conductores Eléctricos desnudos.
 Método de Prueba.

NOM J-212 Productos Eléctricos, Conductores,
 Resistencia y Resistividad
 Eléctrica, Método de Prueba.

NOM J-312 Determinación del Esfuerzo de
 Ruptura por Tensión y Alargamiento
 de Alambres para Conductores
 Eléctricos.

En cuanto a la pureza, en la sección anterior se presentaron los requerimientos del cátodo electrolítico (materia prima del alambón), en este punto, como mencionamos anteriormente trataremos

sobre el alambrcn. Los requerimientos de este se muestran en la tabla 2.3.

ELEMENTO	ppm máximo
Selenio	2
Telurio	2
Bismuto	1
Total del Grupo	3
Antimonio	4
Arsénico	5
Estaño	5
Plomo	5
Hierro	10
Níquel	5
Azufre	10
Plata	25
Mercurio	--
Cadmio	--
Fósforo	--
Zinc	--
Manganeso	--
Cobalto	--
Máximo Permisible	65
Oxigeno	100 - 450

Tabla 2.3 Impurezas en Partes por Milln (ppm) admisibles en el alambrcn de cobre para conductores eléctricos.

Como propiedades mecánicas se define que el alambón después que ha sido obtenido de la laminación en caliente, deberá tener un mínimo de 35% de alargamiento a ruptura, medido en una longitud inicial de 250 mm. Deberá también presentar un mínimo de 50 vueltas a ruptura cuando su diámetro sea de 8 mm en una muestra de 250 mm a una velocidad de 33 r.p.m. El espesor de Oxido Residual en el alambón recién producido no deberá ser mayor a 200 Angstroms.

La resistividad en el cobre recocido no deberá ser mayor a $0.15176 \Omega/\text{m}^2$, equivalente a 101.00% IACS de conductividad.

Finalmente el alambón de cobre tiene una tolerancia máxima de dimensiones en mm respecto al diámetro nominal de +/- 0.5 y un ovalamiento máximo también en mm de 0.5.

Capítulo 3.

Bases Teóricas del Proceso de Estirado.

3.1 Generalidades de los Procesos de Trabajo en Frío, Características y Clasificación.

Aún cuando algunas piezas metálicas producidas por deformación plástica son llevadas a su forma final por trabajo en caliente, en general estos métodos representan procesos de formado primario. Los procesos del trabajo en frío involucran en su mayoría métodos para producir partes a su forma final, por lo anterior se les denomina como operaciones secundarias o de fabricación. Por el incremento de la ductilidad, inherente a la disminución de la temperatura, estos procesos no sólo se podrán efectuar por cargas de compresión, como en las operaciones de trabajo en caliente, sino también por compresión indirecta, tracción biaxial, corte y dobléz. Todo lo anterior se realiza fácilmente cuando no se requieran grandes porcentajes de deformación, ya que esto obliga a realizar recocidos intermedios, como es el caso del estirado de cobre para conductores eléctricos.

Los procesos de trabajo en frío se caracterizan por lo siguiente:

- a) Mejor acabado superficial.
- b) Tolerancias dimensionales más estrechas.
- c) Cambio en las propiedades físicas (se pueden ajustar las propiedades mecánicas de acuerdo con las necesidades del producto).
- d) Mayor capacidad para ser deformados por cargas de tracción.
- e) Mayor consumo de energía para la deformación.
- f) Presencia de anisotropía.
- g) Necesidad de recocidos intermedios, en el caso de grandes porcentajes de deformación.
- h) Mayor ductilidad, lo que permite el estirado del material por cargas de tracción.

De lo expuesto es fácil deducir las ventajas y las limitaciones de los procesos que se realizan en frío.

Una forma de agrupar los procesos en frío es de acuerdo con la operación realizada:

Estirado:

- Barras
- Tubos
- Alambre
- Rechazado

- Rechazado de potencia
- Embutido con planchado

Compresión:

- Acuñado
- Laminado
- Calibrado
- Forja en frío
- Formado en roscas
- Extrusión
- Remachado

Doblez:

- Doblado
- Rolado
- Doblado de placa
- Rebordeado
- Engargolado
- Formado con rodillos

Corte o desprendimiento:

- Troquelado
- Punzonado
- Corte de cinta o hendido
- Recorte
- Perforado

- Escopleado
- Ranurado
- Lancetado
- Rasurado
- Corte con cizalla

Procesos de aplicación particular:

- Formados por alta energía
- Formado superplástico

Los procesos de estirado están comprendidos dentro de los de compresión indirecta, ya que aunque la carga aplicada para la deformación es de tracción, ésta provoca esfuerzos de compresión, que son en sí los responsables de la deformación.

3.2 Principios Básicos del Estirado.

En alguna época entre los siglos VI y X los venecianos produjeron alambre de materiales suaves al obligar a la materia prima a pasar por orificios de diámetro menor al inicial del material; dicha operación se efectuaba a mano, por lo que su aplicación fue limitada. Se continuó la producción del "alambre" por el método tradicional

en la época, que era mediante el corte de cintas angostas a partir de hojas previamente martilladas.

En la actualidad la secuencia de procesos para realizar el estirado se muestra a continuación (Fig. 3.1).



Figura 3.1 Procesos anteriores al estirado en frío.

En este método la sección del material es reducida al hacerlo pasar a través de un dado (Fig. 3.2), producido generalmente de diamante natural, diamante sintético o carburo de tungsteno. El material es ahusado en un extremo, por ejemplo con una marteladora, de tal manera que pueda pasar a través del orificio del dado, para así ser sujetado (Fig. 3.2 (a)) por una mordaza y proceder a la operación.

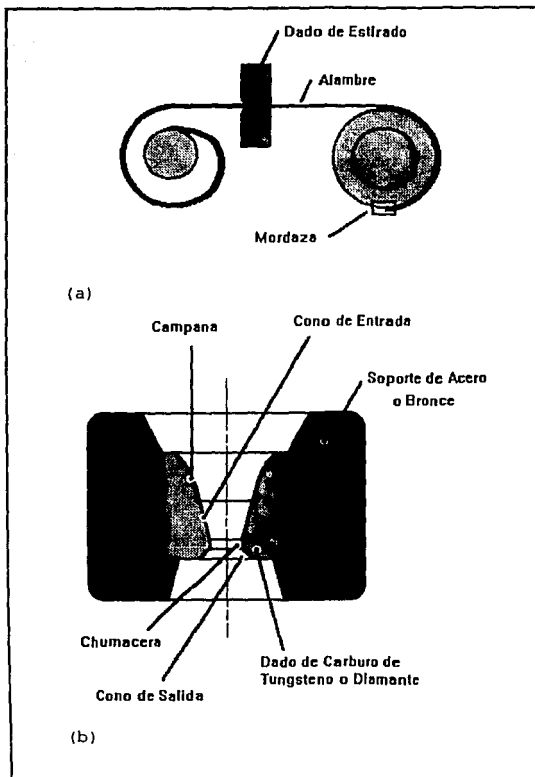


Figura 3.2 (a) Diagrama de la operación de estirado,
 (b) Corte transversal de un dado de estirado.

Al equipo utilizado se le conoce como banco de estirado. La operación puede ser intermitente, esto es, que cuando se termina la reducción de todo el rollo de material, se pasa éste a la siguiente etapa; lo más usual es trabajar en serie o cascada que es cuando el material pasa a través de varios dados secuencialmente (Fig. 3.3).

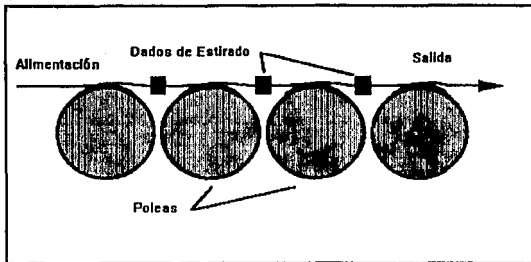


Figura 3.3 Estirado en serie o cascada.

Para lograr lo anterior, la velocidad de los tambores se deberá incrementar de acuerdo con la reducción sufrida por el material, lo cual se logra de dos maneras:

a) Cada tambor de enrollado está accionado por un motor de CC, con un control de velocidad que permitirá ajustarla de acuerdo con la sincronía que se requiera. Dicho procedimiento es costoso, tanto en el caso de que se utilice en motores de CC o de CA con variador de frecuencia, por tal motivo y con la finalidad de superar esta desventaja se emplean máquinas accionadas por un solo motor, en éstas se cuenta con un tambor con una serie de escalonamientos, cuyos diámetros están determinados por la velocidad periférica necesaria, la que a su vez es determinada por la reducción efectuada (Fig. 3.4).

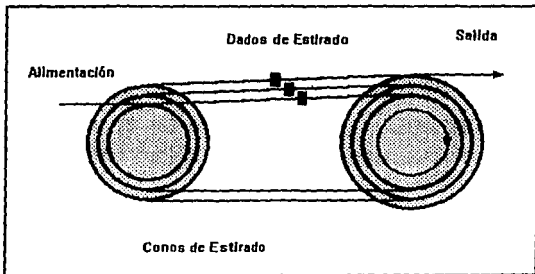


Figura 3.4 Accionamiento con un solo motor, tambores escalonados.

En la práctica es casi imposible lograr la relación precisa del diámetro del escalonamiento con la reducción. Esto provocará entonces deslizamiento del material sobre el tambor y por lo tanto fricción, dando como resultado el calentamiento del material. Independientemente de dicho fenómeno, se genera una gran cantidad de calor al fluir el material a través del dado, y al ser (como se determinará más adelante) la carga de estirado función del coeficiente de fricción, es conveniente entonces emplear recubrimientos para disminuir el rozamiento, lo que a la vez mejorará el acabado superficial del producto. En este caso se denomina al proceso como trefilado en seco. En otros casos el dado se encontrará inmerso en el lubricante, y el proceso se conoce como estirado en húmedo.

Para producir barras (diámetro mayor de 6 mm), no enrolladas, se utilizan mesas o camas de estirar, que pueden tener hasta más de 30 m de carrera; en este caso son posibles velocidades comprendidas entre los 10 y 30 m/min. Dichos equipos llegan a tener una capacidad aún mayor a las 130 toneladas de carga.

Las máquinas de dados múltiples trabajan a velocidades mayores que las indicadas en el caso de estirado de barras, pueden ser de hasta 600 m/min en el caso de estirado de alambre de acero y de 2,000 m/min para no ferrosos.

3.3 Características de la Herramienta.

El elemento fundamental en el proceso de estirado es el dado. Consiste de dos partes: el dado o boquilla de estirado, que se produce de carburo de tungsteno para dados grandes o de diamante para pequeños diámetros; y la cubierta o soporte, que se produce de acero y, en el caso de dados pequeños, también se puede fabricar de bronce. La sección transversal del dado se mostró ya con anterioridad en la figura 3.2.

Las partes en que se puede dividir la sección del dado son:

a) Campana del dado. Se diseña de tal forma que el material arrastre lubricante con él. Su forma propicia que la presión hidrostática se incremente, permitiendo así el flujo del lubricante.

b) Cono de entrada o zona de aproximación. Su ángulo es determinante en la carga requerida para el proceso y será definido de acuerdo con las características del material. En esta zona el metal choca contra su superficie y al ser arrastrado hacia la salida reduce su sección transversal.

c) Chumacera o zona de deslizamiento y ajuste de las dimensiones. En esta zona el diámetro permanece constante y en realidad no hay reducción, pero sí produce una carga apreciable debida a la fricción. Su principal función es la de permitir reajustes del dado, ya que éste sufre un apreciable desgaste. En la práctica su longitud es de aproximadamente $2/3$ del diámetro del dado.

d) Cono de Salida. Su conicidad permite la recuperación elástica del material, asimismo reduce la posibilidad de desgaste cuando el dado está mal alineado.

El ángulo del dado, de acuerdo con lo indicado en b) es determinante en la carga requerida. El óptimo será aquél que minimice la energía requerida para la deformación. Para cualquier proceso de deformación plástica el trabajo y por tanto la carga demandada están dados por tres componentes que son:

a) Trabajo de deformación. Está determinado por la reducción inherente al proceso.

b) Carga de fricción. Depende del área de contacto y por tanto de la conicidad del dado (figuras 3.5 y 3.6). Un ángulo de entrada más pequeño significa un área de contacto mayor, considerando una reducción de referencia.

c) Trabajo redundante. Es la energía extra necesaria para doblar primero en una dirección determinada las fibras del material y después regresarlas a la dirección del flujo. Es evidente que este término será mayor cuando el ángulo del dado se incremente.

El ángulo óptimo puede ser determinado a través de un análisis del límite superior expuesto más adelante. En general se considera que a mayor resistencia del material, más pequeño es el ángulo óptimo.

Metal	Angulo Optimo
Aluminio	24
Cobre	12
Acero	6

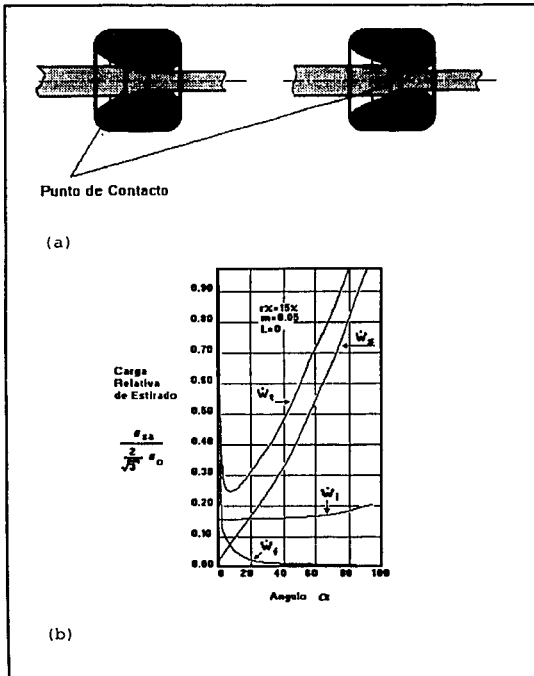


Figura 3.5. (a) Diferencia en el área de contacto al variar el ángulo de conicidad del dado, (b) Carga Relativa de estirado en función del ángulo de entrada, tomada del Nonferrous Wire Handbook, The Wire Association International, Inc.

3.4 Análisis Teórico de los Esfuerzos.

El estirado de alambre, desde el punto de vista de su análisis es uno de los procesos de conformado mecánico más simples. El método de análisis se puede ir variando de acuerdo con la complejidad y exactitud que se pretenda.

El esfuerzo de estirado (σ_{xa}) considerando únicamente el trabajo de deformación se define como:

$$\sigma_{xa} = \sigma_0 \ln \frac{A_b}{A_a} \quad (3.1)$$

donde A es el área en los puntos a y b de la figura 3.6.

Este término no toma en cuenta ni la fricción ni tampoco el trabajo redundante.

Considerando el equilibrio de fuerzas de acuerdo con la misma figura 3.6, se observa que éste es análogo al efectuado para la evaluación de la presión sobre el dado en el caso de extrusión, esto

puede estudiarse en el libro Mechanical Metallurgy de George E. Dieter.

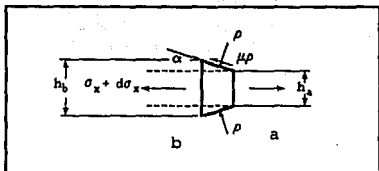


Figura 3.6 Análisis de fuerzas.

De dicho análisis el autor llega a la siguiente ecuación:

$$\sigma_{xa} = \sigma_o \frac{1+B}{B} \left[1 - \left(\frac{h_b}{h_a} \right)^B \right] \quad (3.2)$$

donde $B = \mu \cot \alpha$ y para lo cual μ es el coeficiente de fricción y α es el ángulo indicado en la figura 3.6.

Considerando un material de sección circular (alambre o barra),

$$\sigma_{xa} = \sigma_o \frac{1+B}{B} \left[1 - \left(\frac{D_b}{D_a} \right)^{2B} \right] \quad (3.3)$$

A partir de un análisis similar J.G. Wistreich propuso la siguiente expresión:

$$\sigma_{\text{ka}} = \bar{\sigma}_0 \ln \frac{A_b}{A_a} (1 + B) \quad (3.4)$$

En las ecuaciones anteriores no se consideró para su deducción el trabajo redundante definido en la sección 3.3, éste puede ser considerado a través de un factor f , de acuerdo con:

$$\phi = f(\alpha, r) = \frac{\epsilon^*}{\epsilon}$$

Donde: ϕ - factor de trabajo redundante

ϵ^* - deformación redundante o excedente que corresponde al esfuerzo de cedencia, del metal que ha sido homogéneamente deformado.

Este factor se obtiene de la gráfica esfuerzo-deformación. Para esto se sobrepone la gráfica del material que ha sido estirado, con respecto a la del material recocido, sobre ésta se determina la deformación homogénea que produce el esfuerzo de cedencia que presenta el material estirado (figura 3.7).

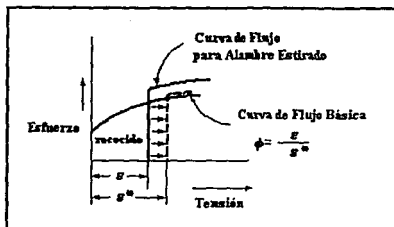


Figura 3.7. Gráfica sobre el análisis de la deformación redundante, tomada de Mechanical Metallurgy, G. Dieter.

Un método alternativo para lo anterior se logra a través de un análisis de límite superior propuesto por G. Dieter:

$$\sigma_{\text{XB}} = \sigma_0 \frac{\left[2 \ln \frac{R_b}{R_a} + \frac{2}{\sqrt{3}} \left[\frac{\alpha}{\sin^2 \alpha} - \cot \alpha \right] + 2\mu \left\{ \cot \alpha \left[1 - \ln \frac{R_b}{R_a} \right] \ln \frac{R_b}{R_a} + \frac{L}{R_a} \right\} \right]}{1 + 2\mu \left(\frac{L}{R_a} \right)}$$

(3.5)

Donde:

- $f(\alpha)$ - función del ángulo de entrada
- L - Longitud de contacto del lado
- R_b - Radio del material de partida
- R_a - Radio del alambre

otra expresión menos complicada pero no menos válida, desarrollada por el mismo autor es la siguiente:

$$\sigma_{xa} = \sigma_0 \left[\left[1 + \frac{m}{\sin 2\alpha} \right] \ln \frac{R_b}{R_a} + \frac{2}{3} \tan \alpha \right] \quad (3.6)$$

Donde:

- m - factor de fricción
- $2/3 \tan \alpha$ - representa el trabajo redundante

A partir del concepto de geometría de la zona de deformación se puede también inferir acerca del trabajo redundante, ya que está ligado con el coeficiente delta, (delta: cociente del espesor medio a la longitud de la zona de deformación).

Para el estirado de alambre se tiene:

$$\Delta = \frac{\alpha}{r} [1 + (1-r)^{\frac{1}{2}}]^2 \quad (3.7)$$

Donde:

α - semiángulo de entrada

r - reducción en el estirado

Para la mayoría de las operaciones de estirado se emplean ángulos de 6 a 10 grados y reducciones dentro del rango del 20%, bajo estas condiciones delta toma valores de 2 a 3. Mayores valores de dicho parámetro corresponderán a reducciones más pequeñas y ángulos mayores. El ángulo óptimo según el mismo autor G. Dieter se puede expresar a partir del valor de delta:

$$\Delta_{op} = 4.9 \left[\frac{\mu}{\ln \frac{1}{1-r}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3.9)$$

3.5 Causas Típicas de Falla.

Las fallas del producto pueden atribuirse básicamente a lo siguiente:

- a) Defectos del material de partida, como podrían ser grietas o fracturas.
- b) Limpieza inadecuada. El material está todavía recubierto con escamas de óxido que producen desgaste excesivo del dado y ralladuras sobre la pieza.
- c) Mal acabado del dado. Produce rayas longitudinales en el producto.

La fractura del material es un caso extremo, en el que la carga de estirado supera la resistencia a la tracción del material. Para una reducción y conicidad fijas, esta posibilidad se incrementa con la fricción.

Hasta aquí se termina una síntesis del análisis teórico del proceso de estirado con lo cual entraremos después de comentar aspectos sobre el recocido, al siguiente capítulo de este trabajo, donde se describe en un forma práctica un análisis del mismo.

Capítulo 4.

Proceso de Recocido en Línea.

En el capítulo anterior se estudiaron las características que adquieren los metales con el trabajo en frío y en específico el proceso de estirado. Los conductores de cobre reciben normalmente grandes reducciones de área durante su manufactura. Como antecedentes comenzaremos este capítulo profundizando en los efectos que tiene el proceso de deformación en frío en la estructura del metal y cómo se recuperan las características para ser utilizado como conductor eléctrico.

4.1 Efectos del Trabajo en Frío en Alambres Estirados.

El trabajo en frío en los metales es aquél donde se deforma el metal a temperatura ambiente, como se estudió anteriormente el metal es plásticamente deformado, se aplica una fuerza que lo deforma y éste no regresa a su forma original lo cual marca la diferencia con la deformación elástica, donde la fuerza aplicada a lo largo del rango lineal de la curva de esfuerzo deformación, permite que el material regrese a su forma original un vez que ésta se deja de aplicar.

Como resultado del trabajo en frío, aumenta la dureza, la resistencia a la tensión y la resistencia

eléctrica, en tanto que disminuye la ductilidad. Hay también un aumento en las dislocaciones, y ciertos planos en la estructura cristalina se distorsionan severamente. Mientras que la mayor parte de la energía utilizada para trabajar en frío el metal, se disipa en forma de calor, una cantidad finita se almacena en la estructura cristalina como energía interna asociada con los defectos de la red, creados por la deformación. La energía almacenada del trabajo en frío es del 1 al 10 por ciento de la energía introducida al metal durante la deformación. La figura 4.1 muestra la relación entre la energía almacenada y la cantidad de deformación en cobre de alta pureza.

El trabajo en frío ocasiona cambios palpables en conductores eléctricos de cobre, por ejemplo un conductor de 0.65 mm de diámetro al salir de una estiradora donde se trabajó en frío puede presentar un alargamiento a ruptura de 4% y una resistencia de 0.0540 ohms/m, por norma las típicas propiedades de este conductor deben ser 25% mínimo de alargamiento a ruptura y 0.0531 ± 0.0009 ohms/m de resistencia eléctrica.

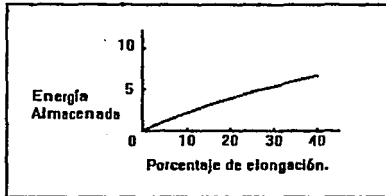


Figura 4.1 Energía almacenada de trabajo en frío para cobre de alta pureza graficado como función de la elongación tensil, tomada de libro Introducción a la Metalurgia Física, S. Avner.

4.2 Recocido.

El proceso de recocido provee un método para obtener las propiedades finales requeridas para un conductor trabajado en frío, con esto los esfuerzos retenidos y las imperfecciones de la red cristalina son eliminados o reestructurados a un estado de menor energía más favorable. Este proceso consiste en tratar térmicamente el metal elevando su temperatura por un tiempo determinado. El recocido se compone de tres etapas: recuperación, recristalización y

crecimiento de grano. Estas etapas se caracterizan por lo siguiente:

a) Recuperación: Los esfuerzos internos de la red distorsionada son liberados.

b) Recristalización: Nuevos granos libres de esfuerzos se unen formando núcleos.

c) Crecimiento de grano: El estado ideal para un metal es aquél de menor energía, ésta se almacena en las fronteras de grano por lo que existe una tendencia del metal con la cual los núcleos libres de esfuerzos aumentan de tamaño llevando la estructura a un estado de mínima energía. Es importante comentar que el tamaño de grano crece después de periodos largos de tiempo a temperaturas elevadas. El tiempo de permanencia de un conductor en el recocido en línea es tan corto que esta etapa prácticamente no se presenta.

Una vez que el material es recocido debe sumergirse en agua, aceite o en un baño de sal para prevenir la formación de óxidos y fijar un cierto grado de dureza. En la manufactura de alambres de cobre para comunicaciones el recocido es el método por el cual

se controla el alargamiento y se influye en la resistencia.

Para concluir este punto, vale la pena comentar que la capacidad para recocer el cobre depende de la cantidad de trabajo en frío dada a éste durante el estirado y del tipo, cantidad y estado (en solución sólida o como precipitación) de las impurezas, sin embargo como se estudió en el segundo capítulo cuando éstas se mantienen en niveles inferiores a las especificadas, el efecto se considera despreciable. Ocasionalmente ciertos lotes de cobre pueden presentar cantidades anormales de impurezas derivadas del proceso de fabricación de alambón lo cual puede afectar el proceso de recocido, sin embargo no se considera como normal y por lo tanto su impacto no se ha dado a conocer en la literatura consultada.

4.3 Definición y Ventajas del Recocido en Línea.

Existen en lo general dos formas de recocer el alambre estirado de cobre para uso en conductores eléctricos, el recocido por lotes y el recocido en línea a otros procesos como el estirado, extruido o

esmaltado. El recocido por lotes implica recocer un paquete de alambres de la misma o de diferentes dimensiones (incluyendo las bobinas que lo contienen) en un horno grande, para después dejarse enfriar lentamente en una atmósfera que no permita la oxidación. Esto implica un manejo de materiales adicional, tiempos muy largos de calentamiento y enfriamiento y poca consistencia en las características del material, ya que las partes externas de las bobinas sufren un proceso diferente al material más cercano al núcleo de la misma. En calibres delgados es difícil controlar el grado de recocido, un sobrecocido provoca que se adhieran unos alambres con otros, un bajo recocido ocasiona problemas en el desenrollado por la dureza misma del material además de que mantiene alta la resistencia eléctrica.

Las ventajas del recocido en línea son las siguientes:

- Alta velocidad de producción y control preciso del recocido.

- Más económico que el recocido por lotes.

- Produce un alambre limpio y brillante. Todos los residuos de grasa de estirado y de finos del metal se liberan de la superficie.

- El recocido actúa como un inspector en línea, las inclusiones y otros defectos internos del alambre provocan que éste se rompa en el interior del recocedor, ahorrando con esto costos excesivos por fallas en los productos finales.

Existen tres métodos para el recocido en línea, dos de ellos -recocido electro resistivo continuo y recocido por inducción- han sido ampliamente adoptados por la industria. El tercero -por descarga de radiación- es un método más reciente y aún no es comercial. Independientemente de qué método se utilice existen cuatro puntos que deben cuidarse en estos métodos:

1. En caso de aplicar un voltaje en un alambre en movimiento la corriente que pase por éste debe ser suficiente para recocerlo, sin provocar un arco eléctrico entre los puntos con diferente potencial.

2. Alcanzar la temperatura de recristalización en el alambre sin oxidarlo.

3. Enfriar y secar el alambre después de recocerlo.

4. Prevenir cortos circuitos con el paso de corrientes eléctricas grandes a través de partes mecánicas rotativas.

El más común de estos métodos es el recocido electro resistivo continuo (figura 4.2) y es el que estudiaremos en el siguiente punto.

4.4 El Recocedor Electro Resistivo.

Este tipo de recocedor de alambre se basa en el principio de aplicar un voltaje a lo largo de un conductor de cobre montado sobre dos poleas; una gran corriente circula en el alambre a voltaje bajo generando calor. Este principio se utiliza en sus dos zonas: precalentado y recocido (ver Zona I, II y III de la figura 4.2). La mejor manera de entender el funcionamiento de este mecanismo hecho para calentar, enfriar y secar el alambre es siguiendo la trayectoria del mismo.

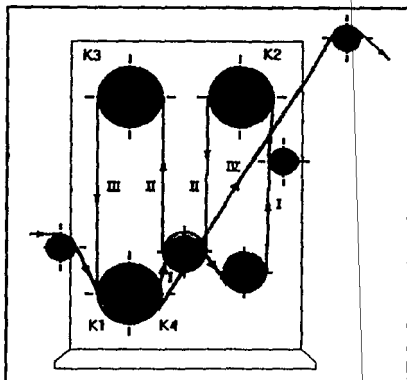


Figura 4.2 Recocedor Electro Resistivo Niehoff R 500.

El alambre duro que viene de la estiradora tiene una temperatura aproximada de 20°C y pasa a una serie de poleas para alinearse con la polea aterrizada (Polea K1) de la zona de precalentamiento. Entre esta polea y la polea "caliente" de la zona de recocido (Polea K3) el alambre es precalentado a una temperatura aproximada de 177°C (zona I y II). El

propósito de esta zona es el evitar un choque térmico excesivo en el alambre y disminuir la probabilidad de ruptura en la zona de recocido (zona III), donde el alambre alcanza una temperatura de 566°C en un tramo muy corto del recocedor. La zona de precalentado es larga para lograr que el alambre se mantenga por debajo de una temperatura de oxidación. La potencia aplicada desde la polea "caliente" configura un circuito paralelo en la zona de precalentamiento y de recocido. Esto es que el voltaje entre las dos zonas es igual pero la corriente se ajusta por sí sola de acuerdo con el alambre en cuestión; i.e. la longitud del alambre, el total de resistencia, las pérdidas de voltaje por $V=IR$ y la diferencia de temperatura en cada zona por las potencia disipada I^2R .

Una vez que el alambre es precalentado entra a la zona de recocido, el voltaje aplicado, que es igual al de la zona anterior, provoca un corto circuito de menor resistencia dado que la distancia entre poleas es mucho menor, por lo que la temperatura alcanzada está alrededor de los 566°C con lo que se logra recocer el alambre. Esta operación se realiza en un tubo con vapor para obtener un alambre brillante y limpio en un ambiente protegido contra la oxidación. En alambres de cobre, la oxidación se realiza en

atmósferas normales a una temperatura mayor a los 200°C (la oxidación de cobre representa por sí misma un incremento en la resistividad). El alambre permanece un tiempo muy corto en esta zona, por ejemplo trabajando a 24 m/seg (5,000 fpm) es recocido en tan solo 0.07 seg, un tiempo extremadamente corto.

Al salir de esta zona el alambre da un giro de casi 180° hacia arriba y hace contacto con una emulsión de agua fría con un porcentaje de grasa de 0.5 a 1%. Esta emulsión contenida en un tubo, a lo largo del cual pasa el alambre, lo enfría a temperatura ambiente asegurando la no oxidación una vez que el alambre pierde la protección de la atmósfera de vapor. Esta etapa se combina con dos operaciones de limpieza. La primera es un dado ligeramente más grande al alambre (20% del área) localizado a la salida del tubo que elimina una gran cantidad de emulsión adherida al alambre y la segunda un secado con aire a presión que limpia perfectamente el alambre de cualquier residuo de agua o grasa que pudiera quedar en la superficie. Esta operación es muy simple pero de no realizarse puede afectar fuertemente una siguiente etapa de esmaltado o extruido.

El voltaje aplicado durante el recocido depende del alambre procesado, la velocidad de la línea y la conductividad del alambre de cobre. La tabla 4.1 presenta valores típicos de estas variables.

Calibre (mm)	Velocidad (m/s)	Voltaje (V)	Corriente (Amp)
.92	13.2	37	480
.64	25.4	38	250
.50	20.3	31	230
.40	20.3	30	200

Tabla 4.1 Valores típicos de Recocido Electro Resistivo.

4.5 Efectos en el recocido del alambre.

En general la rama de recocido afecta las propiedades de los conductores de cobre. Como se comentó anteriormente el alargamiento del conductor y la resistencia eléctrica son controlados o

influenciados por el recocido. El efecto de la recuperación y recristalización durante el recocido actúan como un suavizado del alambre, que incrementa la habilidad de éste para ser alargado. Como se ve en las figuras 4.3 (a) y (b) el alargamiento se incrementa con el aumento de voltaje y temperatura, llegando a un valor pico alrededor de los 39 volts y los 593°C (1,100 °F) que son valores típicos presentados anteriormente en la tabla 4.1. Estas curvas son de configuración sigmoideal, que son indicativos clásicos del proceso de recristalización.

Como un resultado de lo mencionado, la interrelación entre el alargamiento y la resistencia es normalmente de la siguiente forma:

Quando el voltaje de recocido se incrementa, el alargamiento también se incrementa pero la resistencia se disminuye.

Disminuyendo la tensión se disminuye el alargamiento y se incrementa la resistencia.

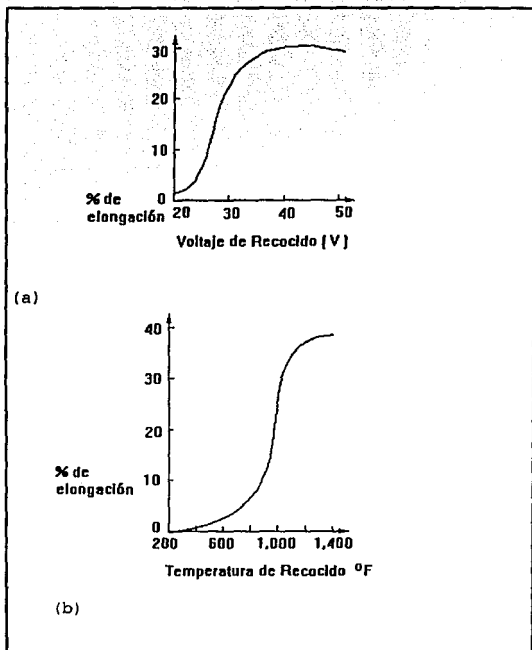


Figura 4.3 (a) Elongación vs voltaje de recocido y, (b) Elongación vs Temperatura de Recocido en 10 mseg, calibre 24 AWG. Ambas gráficas tomadas del Nonferrous Wire Handbook, The Wire Association International, Inc.

Este efecto es más significativo en alambres delgados. Una excepción a la primera conclusión se muestra de hecho en la figura 4.3 (a). El fenómeno se denomina "punta de saturación de corriente" y es el resultado de elevar el voltaje de recocido a un punto tal que al incrementarlo no aumenta la corriente. Si continuamos la aplicación de más voltaje la corriente decrece, el conductor se estira a una extensión tal decreciendo en sus dimensiones y no permite el aumento del paso de corriente. Esto se manifiesta en una caída de alargamiento con un aumento de voltaje así como la elasticidad se manifiesta en suavidad del metal.

Por otro lado sí existen casos donde se requiere aumentar el voltaje en forma extraordinaria, estos son:

- Grandes cantidades de impurezas que incrementan la temperatura de recocido.

- Excesiva cantidad de trabajo en frío en el alambre, defectos en los dados o problemas en el proceso de estirado anterior.

- Resistencia excesiva a la corriente debido a una reducción mayor en el último dado de estirado.

Básicamente con esta recopilación se explica el funcionamiento en general de los Recocedores Electro Resistivos, objetivo de este capítulo. Conjuntando la información de los capítulos anteriores se cuenta con las bases suficientes para entrar a estudiar el comportamiento real del proceso de estirado de alambre de cobre utilizado en conductores eléctricos.

Capítulo 5.

Análisis Práctico del Proceso de Estirado.

En este capítulo presentaremos un análisis realizado en una Planta Industrial donde se fabrica alambre de cobre para conductores eléctricos. La operación inicia con el estirado de alambón de 8 mm de diámetro, realizando un proceso con una reducción por estirado en frío de hasta un 96.65% del área inicial, recociendo posteriormente en línea el producto obtenido, éste se utiliza más adelante en otros procesos de estirado. El alambón recibido cumple con todas las especificaciones planteadas en el capítulo 2 y se estira a velocidades bajas según diseño de máquina, termina el primer proceso de estirado y recocido entre 8 y 14 m/seg dependiendo del producto que se maneje.

5.1 Características de las Máquinas.

Las máquinas en estudio son dos de origen alemán marca NIEHOFF, modelo M-85b 13-A, tipo serie o cascada, fabricadas en 1971 y 1980. Una de ellas, tiene un motor principal original marca RELIANCE de 250 kW (335 HP), a 440 V, corriente alterna y

velocidad de 1800 RPM, la otra máquina tiene un motor original marca Siemens de corriente directa de 245 kW a 440 V, 1,800 RPM alimentado por una Fuente Siemens de 1,200 Amps. y 480 V.

La base de las máquinas consiste de tanques unitarios de hierro fundido los cuales están sellados. El número de esas unidades es de 6, correspondiendo cada uno a dos flechas y dos poleas de estirado. La base de la máquina sirve también como recipiente independiente para el lubricante de estirado. El movimiento es proporcionado por un tren de engranes principal, consistente de cajas de engranes teniendo dos flechas de estirado cada una. Los cambios de velocidad de estirado están dados por una caja de engranes extra, en la cual pueden seleccionarse seis diferentes velocidades con sólo mover las palancas ahí dispuestas. La tabla 5.1 muestra las velocidades máximas recomendadas según el diámetro final del alambre a estirar.

Las poleas de estirado consisten de una base de hierro y un anillo de estirado de acero, con dureza Rc = 65, el diámetro de éstas, incluyendo el capstan, es de 450 mm (18"). Las poleas son simétricas por lo que pueden voltearse para utilizarse por ambos lados.

El anillo del capstan tiene una conicidad de $1^{\circ} 30'$, con el diámetro mayor del lado de la máquina, razón por la cual no puede ser utilizado por ambos lados.

Velocidad	Diámetro
m/seg	mm
11.8	5.1 - 3.6
15.0	3.25
18.7	2.89
24.0	2.6 - 2.3
30.4	2.0 - 1.8
38.0	1.6 - 1.3

Tabla 5.1 Velocidades máximas de estirado en función del diámetro final del alambre a estirar en máquina Niehoff M-85.

Las poleas de estirado, al igual que los portadados, trabajan sumergidos en lubricante durante la operación.

La capacidad de reducción de área por paso, definida por el fabricante, es de 20.6 % con un máximo de 13 reducciones.

5.2 Geometría de la Herramienta.

Los productos fabricados son estirados con dados de diamante sintético con el perfil indicado en la Fig. 5.1, sólo en algunos casos se utilizan dados de carburo de tungsteno, estos últimos tienen un ángulo diferente en el cono de entrada y éste es de 14° .

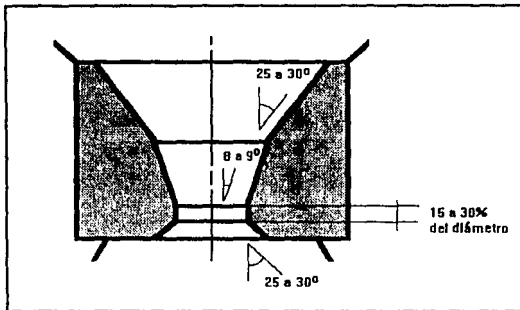


Figura 5.1. Geometría de los dados utilizados en la práctica.

Como podemos observar en el proceso que se realiza en esta Planta específicamente se han utilizado, de manera tradicional, dados con un ángulo α de 18° , la figura muestra los ángulos respecto a un eje, para este caso se define α entre dos; la teoría

presentada en el Cap. 3 nos indica que para el cobre el ángulo óptimo es de 12° . Más adelante en el siguiente capítulo se profundizará en esto.

5.3 Cálculo de Líneas de Estirado.

En el proceso realizado en las máquinas consideradas para este análisis se utilizan diferentes combinaciones de dados para los productos a estirar en función de sus dimensiones finales. Para el cálculo de las líneas se considera la relación de velocidades que se tiene entre poleas y un cierto deslizamiento del alambre sobre las mismas, de esta manera se procede a los cálculos de reducción de área en cada paso definiendo las dimensiones requeridas para cada dado de la línea.

La relación de velocidades entre una polea y otra nos definen el valor de una constante K_s utilizada para el cálculo de las líneas, de tal forma tenemos:

$$K_s = \frac{V_{i+1}}{V_i}$$

Por otro lado considerando que en cualquier punto de la línea del alambre, en el mismo tiempo, pasa una idéntica cantidad en peso de alambre podemos relacionar los diámetros de los dados por medio de otra constante:

$$K_f = \frac{d_{i+1}^2}{d_i^2}$$

El deslizamiento absoluto es la diferencia entre la velocidad del alambre y la velocidad de la polea. La K_f total siempre es mayor que la K_s total. El porcentaje de deslizamiento aumenta siempre partiendo del último dado hacia el dado inicial. El deslizamiento consume potencia debido al rozamiento. El rayado de las poleas es debido al deslizamiento, si éste es excesivo se gastan prematuramente y se amontonan las vueltas ocasionando rupturas por estricción.

Considerando que el primer dado recibe metal recocido, éste ofrece una menor resistencia a la deformación, por lo que es posible dar una mayor reducción. Mientras que los dados normales de la

línea pueden trabajar con una K_r de 1.26, el primer dado puede trabajar con valores de 1.40 a 1.52 aproximadamente. Un primer paso con una reducción excesiva no permite el paso de soldaduras por lo que en la práctica no se recomienda una K_r mayor a 1.45.

La tabla 5.2 nos muestra las dimensiones calculadas de las líneas de dados utilizadas para estirar el cobre a partir de el alambroón de 8 mm antes de ser recocido.

En función de las reducciones que sufre el material en la máquina, se realizó un estudio considerando el estirado con mayor reducción de la tabla 5.2.

Para el análisis se tomaron muestras de cada una de las 13 reducciones dadas al alambroón en el proceso de conformarlo como alambre de 1.46 mm de diámetro. Los resultados obtenidos de la pruebas mecánicas en cada paso de estirado se presentan en la Tabla 5.3, posteriormente, en la siguiente sección se muestra una metalografía del mismo material.

Paso	1.46 mm	1.63 mm	1.83 mm	2.06 mm	2.31 mm
1	6.40	6.55	7.34	7.34	7.34
2	5.51	5.79	6.55	6.55	6.55
3	4.80	5.18	5.79	5.79	5.79
4	4.22	4.62	5.18	5.18	5.18
5	3.71	4.11	4.62	4.62	4.62
6	3.25	3.66	4.11	4.11	4.11
7	2.90	3.25	3.66	3.66	3.66
8	2.59	2.90	3.25	3.25	3.25
9	2.31	2.59	2.90	2.90	2.90
10	2.06	2.31	2.59	2.59	2.59
11	1.83	2.06	2.31	2.31	2.31
12	1.63	1.83	2.06	2.06	
13	1.46	1.63	1.83		

Tabla 5.2 Líneas de Datos Utilizadas en el estirado de Alambón de 8 mm de diámetro.

5.4 Efectos de la deformación.

El estirado es el trabajo mecánico que transforma plásticamente al metal, modificando sus dimensiones,

aspecto, propiedades físicas, mecánicas y conductividad eléctrica.

Paso	Diámetro	Area	Reducción	σ_0	σ max.	$\sigma_{rup.}$
	mm	mm ²	Acumulada.	MPa	MPa	MPa
Alim.	7.98	49.96		213.26	233.2	218.6
1	6.34	31.54	-36.86%	326.11	356.6	282.3
2	5.52	23.97	-52.02%	348.59	381.2	238.1
3	4.81	18.18	-63.62%	363.58	397.6	309.5
4	4.20	13.86	-72.25%	381.94	417.7	310.2
5	3.70	10.77	-78.44%	394.11	431.0	321.8
6	3.24	8.24	-83.51%	397.52	434.7	313.0
7	2.92	6.70	-86.59%	380.09	431.0	318.1
8	2.60	5.29	-89.41%	375.92	437.2	306.5
9	2.34	4.32	-91.36%	360.42	438.6	323.9
10	2.07	3.37	-93.25%	372.28	429.3	311.8
11	1.84	2.67	-94.65%	309.66	433.4	328.6
12	1.63	2.09	-95.81%	348.75	427.0	331.4
13	1.46	1.66	-96.65%	335.91	419.9	345.1

Tabla 5.3 Resultados obtenidos en pruebas mecánicas realizadas a cobre estirado en frío (99.95% Cobre).

Gráficamente estos resultados se muestran en la fig. 5.2, vale la pena observar que una vez alcanzada la dureza máxima a partir de un 78.44 % de reducción los esfuerzos encontrados presentan tendencias constantes.

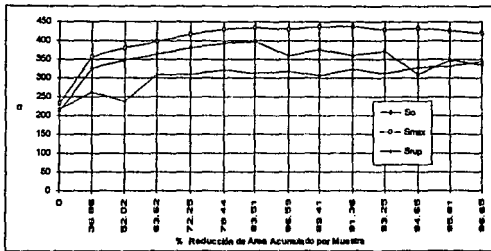


Fig. 5.2 Valores de esfuerzo de cedencia; máximo y ruptura en MPa para muestras de cobre estirado en frío con diferente porcentaje de reducción de área acumulada.

5.5 Estudio Metalográfico del Proceso.

Otra manera de observar los cambios que sufre el material es a partir de un estudio metalográfico. Para lograr esto se prepararon muestras de cortes transversales y longitudinales para cada paso de estirado. La secuencia de éstas se presenta en esta sección.

El alambre estirado sufrió 13 procesos de deformación como se describió anteriormente. A lo largo del proceso, el tamaño de grano se transformó en forma muy significativa al ser reducido en un 96.6 % en su sección transversal. Para la preparación de las muestras se elaboraron encapsulados del material en resina acrílica, posteriormente se realizó un pulido muy fino con alúmina. Una vez obtenido el acabado "espejo" se atacaron con un reactivo a base de Hidróxido de Amonio y agua oxigenada. Las fotografías obtenidas se realizaron con 320 aumentos en un microscopio de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Es muy interesante observar que los cambios longitudinales en la estructura del metal son mucho más sensibles que los encontrados en los cortes transversales por la naturaleza del proceso de deformación. Según se incrementa la deformación los granos modifican su geometría alargándose en forma de fibras.

A continuación se presenta en la figura 5.3 la serie de fotografías de los cortes longitudinales.



Figura 5.3 (a) y (b). Corte longitudinal cobre de alimentación 8 mm suave y 1er Paso con 36.8% de reducción.

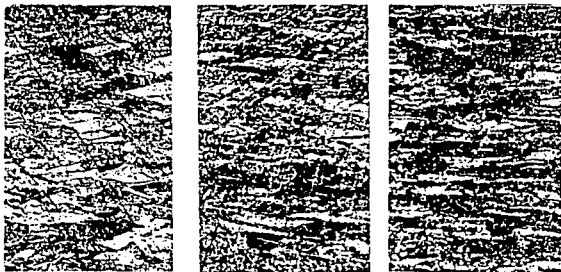


Figura 5.3 (c), (d) y (e). Corte longitudinal 2o, 3o y 4o Paso, reducciones acumuladas de 52.0, 63.6 y 72.3 % respectivamente.

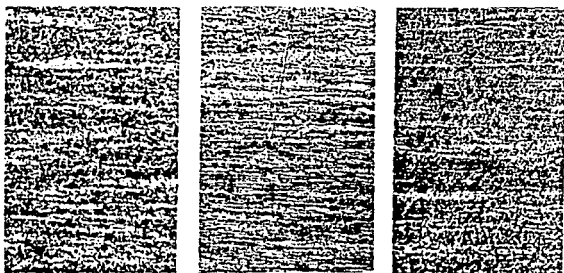


Figura 5.3 (f), (g) y (h). Corte longitudinal 50, 60 y 70 Paso, reducciones acumuladas de 78.4, 83.5 y 86.6 % respectivamente.

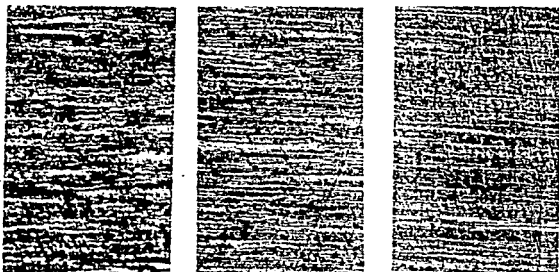


Figura 5.3 (i), (j) y (k). Corte longitudinal 80, 90 y 100 Paso, reducciones acumuladas de 89.4, 91.4 y 93.3 % respectivamente.

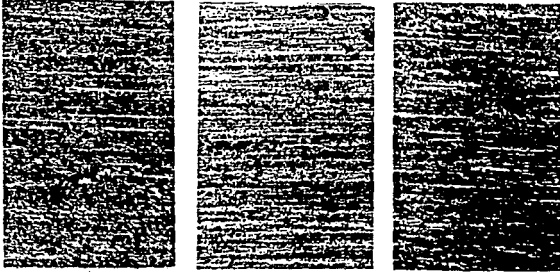


Figura 5.3 (l), (m) y (n). Corte longitudinal 11o, 12o y 13o Paso, reducciones acumuladas de 94.7, 95.8 y 96.7 % respectivamente.

Como se puede apreciar los granos del material tienen un alargamiento muy grande en los primeros pasos.

Nuevamente al igual que en las pruebas mecánicas, en la medida que el metal es trabajado cambia su estructura, hasta alcanzar una cierta dureza o grado de deformación, a partir del cual los cambios no se aprecian con la misma magnitud y, sin embargo, se puede continuar la deformación del metal.

En la siguiente figura (5.4) se muestran las fotografías de los cortes transversales realizados en

cada paso de deformación. El tamaño de grano sufre una gran reducción en los primeros pasos y posteriormente no se aprecian grandes cambios, de igual manera que los resultados anteriores.



Figura 5.4 (a) y (b). Corte transversal cobre de alimentación 8 mm Suave, 1er Paso con 36.8% de reducción.

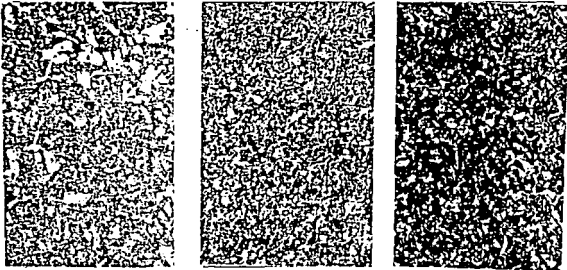


Figura 5.4 (c), (d) y (e). Corte transversal 2o, 3o y 4o Paso, reducciones acumuladas de 52.0, 63.6 y 72.3 % respectivamente.

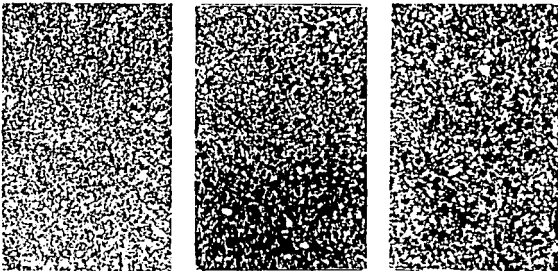


Figura 5.4 (f), (g) y (h). Corte transversal 5o, 6o y 7o Paso, reducciones acumuladas de 78.4, 83.5 y 86.6 % respectivamente.

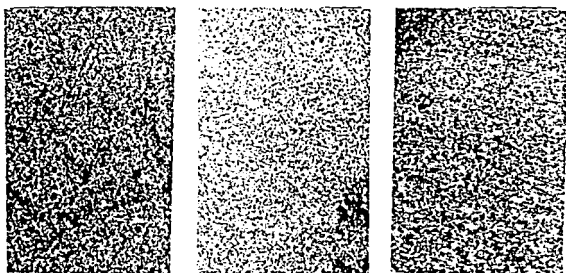


Figura 5.4 (i), (j) y (k). Corte transversal 80, 90 y 100 Paso, reducciones acumuladas de 89.4, 91.4 y 93.3 % respectivamente.

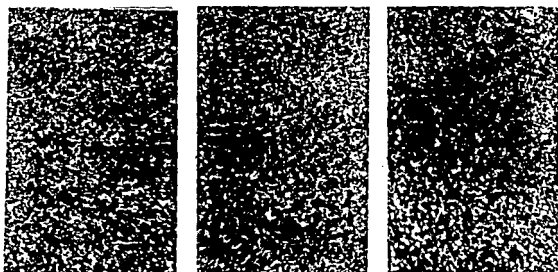


Figura 5.4 (l), (m) y (n). Corte transversal 110, 120 y 130 Paso, reducciones acumuladas de 94.7, 95.8 y 96.7 % respectivamente.

5.6 Cálculo de la Potencia Requerida en el Proceso.

Considerando un coeficiente de fricción fijo, variando los ángulos de estirado se pueden elaborar las tablas 5.4 y 5.5 para calcular la potencia total consumida en la deformación del proceso, la Potencia Total esta en kW y considera una reducción acumulada de área de 96.65%.

Faso	Diámetro mm	Reducción	Vel. de Estirado m/s	Ángulo α								
				5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°		
Alim.	7.98		0.67									
1	6.34	36.88 %	1.06	3.01	2.93	2.91	2.91	2.93	2.96	3.01		
2	5.52	24.01 %	1.40	3.00	2.99	3.01	3.07	3.14	3.22	3.32		
3	4.81	24.17 %	1.84	3.23	3.21	3.24	3.30	3.37	3.46	3.56		
4	4.20	23.74 %	2.42	3.31	3.30	3.33	3.39	3.47	3.57	3.67		
5	3.70	22.30 %	3.11	3.29	3.29	3.33	3.40	3.49	3.59	3.70		
6	3.24	23.50 %	4.07	3.56	3.55	3.58	3.65	3.74	3.84	3.96		
7	2.92	18.65 %	5.00	2.94	2.97	3.03	3.12	3.23	3.34	3.47		
8	2.60	21.02 %	6.33	2.95	2.95	3.00	3.07	3.16	3.26	3.37		
9	2.34	18.44 %	7.76	2.76	2.78	2.84	2.93	3.03	3.14	3.26		
10	2.07	21.84 %	9.93	3.05	3.05	3.09	3.16	3.24	3.34	3.45		
11	1.84	20.84 %	12.55	3.02	3.03	3.08	3.16	3.25	3.35	3.46		
12	1.63	21.58 %	15.99	2.59	2.59	2.63	2.69	2.76	2.85	2.94		
13	1.46	20.03 %	20.00	2.74	2.75	2.80	2.87	2.96	3.06	3.17		
		Potencia	Total	39.45	39.40	39.89	40.71	41.77	42.99	44.33		
			Ahorro	5.5%	5.7%	4.5%	2.5%	0.0%	-2.9%	-6.1%		

Tabla 5.4 Cálculo de Potencia Requerida para estirado considerando un coeficiente de fricción $\mu=0.10$.

De estas tablas se puede observar que la fricción es una variable muy importante para la definición de los ángulos de estirado. Para un coeficiente de fricción de $\mu = 0.1$ el menor consumo de potencia lo encontramos para un ángulo de 6° ; por otro lado si la fricción aumentara a $\mu = 0.18$ el ángulo óptimo sería de 7° .

Paso	Diámetro mm	Reducción	Vel. de Estirado m/s	Ángulo								
				5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°		
Alim.	7.98		0.67									
1	6.34	36.86 %	1.06	3.76	3.57	3.45	3.39	3.35	3.35	3.36		
2	5.52	24.01 %	1.40	3.69	3.56	3.51	3.50	3.53	3.57	3.64		
3	4.81	24.17 %	1.84	3.97	3.83	3.77	3.77	3.79	3.84	3.91		
4	4.20	23.74 %	2.42	4.07	3.93	3.86	3.87	3.90	3.95	4.02		
5	3.70	22.30 %	3.11	4.03	3.91	3.86	3.87	3.91	3.97	4.05		
6	3.24	23.50 %	4.07	4.38	4.23	4.17	4.16	4.20	4.26	4.33		
7	2.92	18.65 %	5.00	3.58	3.50	3.49	3.52	3.58	3.66	3.76		
8	2.60	21.02 %	6.33	3.60	3.50	3.47	3.48	3.53	3.59	3.67		
9	2.34	18.44 %	7.76	3.35	3.26	3.27	3.30	3.36	3.44	3.53		
10	2.07	21.84 %	9.93	3.73	3.62	3.58	3.59	3.63	3.69	3.77		
11	1.84	20.84 %	12.55	3.70	3.59	3.56	3.58	3.62	3.69	3.77		
12	1.63	21.56 %	15.99	3.17	3.08	3.05	3.05	3.09	3.14	3.21		
13	1.46	20.03 %	20.00	3.34	3.26	3.23	3.25	3.30	3.37	3.45		
		Potencia	Total:	48.38	46.86	46.30	46.34	46.79	47.52	48.47		
			Ahorro:	-3.4%	-0.2%	1.0%	1.0%	0.0%	-1.6%	-3.6%		

Tabla 5.5 Cálculo de Potencia Requerida de estirado considerando un coeficiente de fricción $\mu=0.18$.

De estos cálculos reservaremos también los comentarios para el siguiente capítulo, con esto habremos terminado un análisis descriptivo del proceso de estirado, cumpliendo con el objetivo de documentar todo el ambiente y los conocimientos generales para buscar y desarrollar mejoras al mismo.

Capitulo 6.

Desarrollo de Mejoras.

6.1 Incremento de Velocidades.

El desarrollo de este trabajo mostró diferentes oportunidades de mejora que se comentarán en este capítulo. Al momento de iniciar el estudio la velocidad máxima de operación era de 14 m/seg para los calibres más delgados del rango de trabajo mencionado en el capítulo 5 (1.46 mm). Estas velocidades permitieron generar una producción en 1991 como se muestra en la tabla 6.1 (a) y (b) para las dos máquinas donde se trabajó con el proyecto.

Después de revisar la información técnica a principios de 1992, se realizaron algunas acciones para incrementar la productividad. Los resultados pueden observarse en la misma tabla.

Año	Producción (Tons)	Horas Programadas	Calibre Promedio (mm)	Eficiencia (%)	Rendimiento (%)
1991	5,419.3	3,718.2	2.06	65.7	58.5
1992	3,952.1	6,218.0	1.74	85.5	53.9
1993	2859.2	4,080.8	1.81	82.4	53.7

Tabla 6.1 (a) Resultados de la Máquina 1 (motor principal de CC) con el incremento de velocidades.

Año	Producción (Tons)	Horas Programadas	Calibre Promedio (mm)	Eficiencia (%)	Rendimiento (%)
1991	3,522.5	5,499.4	1.88	58.6	52.4
1992	4,834.5	6,355.5	1.70	81.8	68.9
1993	4,577.5	6,078.8	1.61	89.4	73.5

Tabla 6.1 (b) Resultados obtenidos por la Máquina 2 (motor principal de CD) con el incremento de velocidades.

Las velocidades de operación se incrementaron a 16 m/seg para los calibres gruesos y a 20 m/seg para los delgados en ambas máquinas. El índice de eficiencia presentado se obtiene al evaluar la producción obtenida contra el tiempo real que el operador trabaja con la máquina, el rendimiento se evalúa considerando el tiempo que la máquina estuvo programada, incluyendo las horas de operación y las horas en que el equipo estuvo averiado. Ambas se miden conforme a una cuota o referencia calculada por el área de Ingeniería Industrial de la Planta.

Analizando las eficiencias trimestrales observamos resultados muy positivos (Fig. 6.1 (a) y (b)) sin embargo vale la pena observar que el rendimiento real de la máquina 1 disminuyó, ya que las condiciones de

la máquina no permitieron trabajar consistentemente con una velocidad mas alta y las horas paro por avería se incrementaron. La máquina 2 tuvo resultados positivos de rendimiento y esto se mejoró aún en 1993. Para lograr el incremento de velocidades se realizó una revisión completa del equipo, se capacitó a los operadores y a los supervisores con información operativa del fabricante. Los resultados obtenidos aún se pueden mejorar y éste es un objetivo que no debe perderse de vista. La situación de la máquina 1 se comentará en la sección 6.3 en donde se desarrollaron otras acciones para mejorar los resultados.

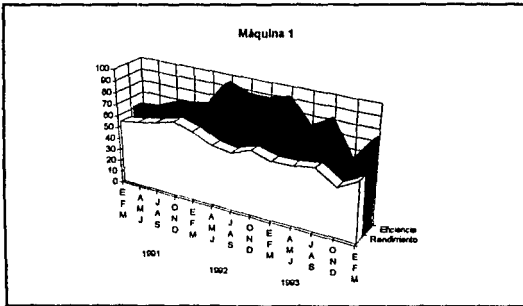


Figura 6.1 (a) Eficiencias y Rendimientos obtenidos trimestralmente con el incremento de velocidades en la máquina 1.

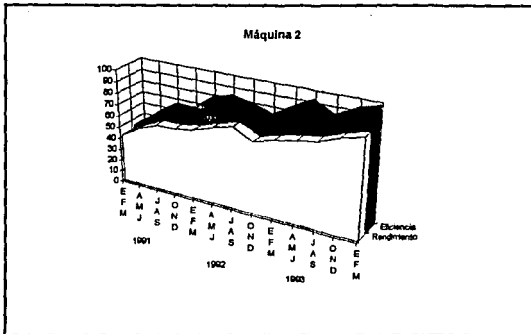


Figura 6.1 (b) Eficiencias y Rendimientos obtenidos trimestralmente con el incremento de velocidades en la máquina 2.

6.2 Los Angulos de Estirado.

El ángulo óptimo para estirar el cobre con un mínimo de energía depende directamente del coeficiente de fricción. En valores típicos según las tablas 5.4 y 5.5 podríamos obtener un ahorro de 1 a 5% en el consumo de la energía utilizada en el proceso de estirado modificando el ángulo de estirado de 1 a 2 grados.

Con el fin de soportar esto se realizó un prueba en una máquina con capacidad de realizar sólo tres reducciones. El alambre que se estiró pasó de 6.85 mm de diámetro a 5.18 mm, se prepararon tres líneas de estirado con diferentes ángulos en el cono de entrada, los resultados se muestran en la tabla 6.2, las líneas de estirado fueron preparadas con dados de carburo de tungsteno.

Angulo de Entrada	Potencia Consumida (kW)
12°	44.87
14°	34.75
18°	29.89

Tabla 6.2 Potencia consumida para estirar alambre de cobre de 6.85 mm a 5.18 mm de diámetro con diferentes ángulos de estirado.

Como se puede observar en este caso el ángulo óptimo para lograr el menor consumo de energía fue de 18° sin embargo es necesario realizar estudios más

profundos sobre la fricción de estirado y con esto definir el mejor ángulo de operación.

6.3 Modificaciones al Equipo.

La máquina 1 en la cual se realizó el estudio tenía algunos problemas que podían solucionarse con inversiones menores en comparación al costo de reposición del equipo. Los efectos de estos problemas pueden observarse claramente en los resultados posteriores al incremento de velocidades. En esta máquina surgió un problema fuerte en la operación de arranque. Dado que la máquina estaba equipada con un motor de corriente alterna resultaba muy difícil coordinar el arranque del recocedor y el embobinador del material con el estirado del producto a las nuevas velocidades. La propuesta realizada fue el modificar la máquina con un motor de corriente directa que tuviera una rampa de aceleración determinada similar a la otra máquina y sincronizada con el arranque del recocedor electro resistivo, esto junto con un elemento controlador de la tensión del alambre facilitaría el arranque del equipo en gran medida. Esta modificación ayudaría también a

disminuir el desperdicio generado en el proceso. Vale la pena mencionar que aún cuando el rendimiento de la máquina disminuyó, los mayores problemas de avería se localizaron en el motor principal, razón por la cual se justificaba aún más la inversión.

Aún cuando la propuesta fue realizada en 1992, la situación económica del país y de la empresa no favorecieron la autorización del proyecto, fue hasta 1993 cuando se pudo trabajar en él. Gráficamente podemos observar los cambios realizados en la máquina en la figura 6.2.

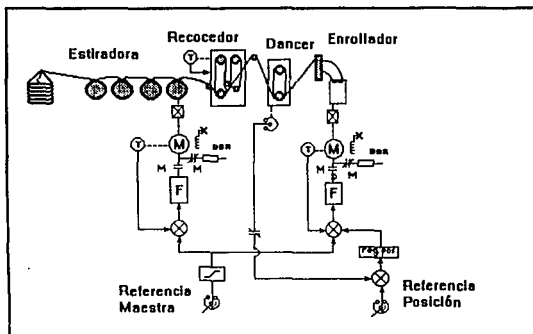


Figura 6.2 Diagrama Elemental para los cambios realizados en la Máquina 1.

El equipo trabajaba anteriormente arrancando simultáneamente el motor principal y el enrollador. El recocedor trabajaba mecánicamente sincronizado al motor principal, sin embargo no se suministraba voltaje para suavizar el cobre hasta que la tensión del alambre se estabilizaba. La falta de control en la tensión no permite trabajar este tipo de recocedores desde el inicio del proceso ya que el contacto sobre la polea con voltaje no es continuo, por esta razón el recocido se accionaba manualmente aproximadamente 30 segundos después del arranque de la estiradora.

La modificación consistió según la figura 6.2 en lo siguiente:

1. Instalar un motor principal de C.D. con su fuente para acelerar o desacelerar la estiradora de acuerdo a una rampa definida.

2. Controlar el voltaje de recocido mediante un tacogenerador que en función de la velocidad de la estiradora permitiera suministrar un cierto voltaje de acuerdo al diseño del equipo durante el inicio o los paros del proceso.

3. Instalar un elemento denominado "Dancer" para mantener la tensión del alambre enviando una señal de ajuste a la fuente del motor del enrollador para corregir las desviaciones.

4. Instalar un motor de C.D. en el enrollador con su fuente para controlar la velocidad de acuerdo a la rampa de aceleración o desaceleración de la estiradora y la posición del "Dancer".

El motor principal instalado a raíz de este proyecto tiene un capacidad de 500 HP y se tenía sin uso desde años atrás, esto permitió un cierto ahorro en la inversión. Para el enrollador se instaló un motor de 30 HP, las fuentes instaladas fueron con capacidad de 380 Amps y 460 Volts para el motor principal y una fuente pequeña para el motor del enrollador. La fuente del motor principal es limitada para la capacidad del motor pero suficiente para la operación de la máquina.

El recocedor fue sustituido por uno de fabricación más reciente el cual cuenta con un sistema que controla el voltaje suministrado al alambre en función de la velocidad que se tiene en las poleas

que hacen contacto con el mismo, esto permite tener siempre un alambre suave que facilita el embobinado y evita problemas posteriores por cambios de dureza del material al momento de utilizar el alambre en el siguiente proceso.

Los resultados de la modificación completa pueden ser evaluados actualmente con un cambio positivo en el rendimiento de la máquina durante el primer trimestre de 1994 (figura 6.1 (a)), el rendimiento acumulado de la máquina de enero a mayo del presente año está cercano al 60%, seis puntos por encima del resultado de 1993 mostrado en la tabla 6.1.

Conclusiones.

Dada la gran cantidad de aplicaciones del cobre en México y su bajo consumo comparado con otros países industrializados, es importante conocer y mejorar el proceso de estirado en las Plantas Industriales del país para utilizar en forma eficiente y eficaz nuestros recursos y poder competir internacionalmente ya que se espera un incremento de uso de este metal.

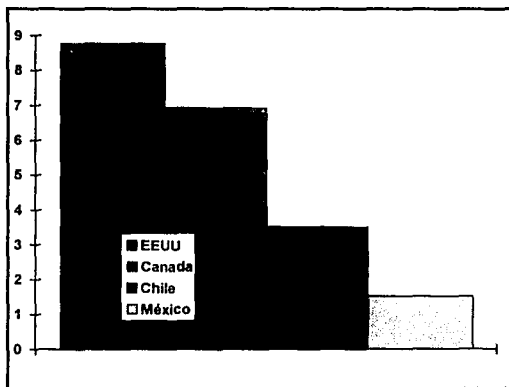


Fig. 7.1 Consumo per cápita de cobre refinado en 1990 para diferentes países (consumo en Kg. anuales por habitante).

La figura 7.1 nos muestra una relación del consumo por habitante y se explica por sí sola. Según información presentada por AMECOBRE en 1992 se espera un crecimiento en el consumo total en México del orden de 41.0% de 1991 a 1995.

Actualmente en la industria mexicana se manufacturan productos de Cobre para Conductores Eléctricos con mucho éxito, sin embargo la tecnología traída hace algunos años no ha evolucionado en el país como en otros lugares. Las investigaciones y desarrollos se han realizado más en los aislamientos y menos en el proceso de deformación en sí. Es muy difícil conseguir bibliografía actualizada sobre el tema en el país. Todo esto representa una excelente área de oportunidad para conocer las mejoras desarrolladas internacionalmente.

En la medida que el material es deformado mediante el estirado en frío, sus características cambian sensiblemente hasta alcanzar una cierta cantidad de energía almacenada (65% de reducción), a partir de la cual el cobre aún puede deformarse sin modificar sus propiedades mecánicas y su estructura granular

logrando reducciones del orden de 97% de su área original. La energía requerida para recocer el material puede tener una gran dependencia con la cantidad de deformación sufrida por el estirado, esto también representa un área de oportunidad para futuros estudios de mejoras y ahorros en el proceso.

Otra área de oportunidad para un proyecto futuro es el conocer y estudiar el coeficiente de fricción en función de las grasas utilizadas en el estirado y, el ángulo óptimo para consumir una menor cantidad de energía o bien obtener un conductor de mejores características.

El contenido de este trabajo es aplicable para el proceso en general de alambres estirados de cobre y representa un punto de partida para la elaboración de material didáctico.

El factor humano es clave para el logro de resultados, la capacitación y motivación del personal son elementos fundamentales para lograr y mantener buenos resultados.

Finalmente, como en todos los procesos de nuestra industria, es muy importante dominar los principios

básicos de los mismos y buscar siempre su continua mejora, para lograr mantener un nivel competitivo en los mercados internacionales y de esta manera, evitar que venga alguien a realizar aquello que no pudimos hacer.

Bibliografía.

- Dieter, George Mechanical Metallurgy, SI
Edition. Mc Graw Hill.
E.U.A., 1988.
- Tassi, Otto J. The Wire Association Internacional
Nonferrous Wire Handbook.Vol. I,II.
E.U.A., 1981.
- XUL, S.C. Resumen Para Presentación AMECOBRE.
México, 1992.
- Avner, Sydney Introduucción a la Metalúrgia Física.
2a Edición. Mc Graw Hill.
México, 1974.
- Wilkins, R.A. Copper and Copper-Bases Alloys.
1a Edición. Mc Graw Hill.
U.S.A. 1943.

Metals Handbook Metallography, Structures and Phase
Diagrams, American Society for
Metals. U.S.A. 1973.

Avitzur, B. Metal Forming:
Processes and Analysis,
Mc Graw Hill.
U.S.A. 1968.

Bowlby, Reid Copper '94 Does It Get Much Better?
Noranda Sales Co., American Metal
Market, U.S.A. 1994.