INTRODUCCIÓN

Desde hace muchos años y hasta hoy los cables de cobre son utilizados para un sin número de aplicaciones necesarias en la vida diaria. Desde los cables submarinos que unen continentes hasta los cables más finos que mantienen al mundo comunicado; como los teléfonos fijos, tienen aplicaciones gigantescas y los hay en todo tipo de dimensiones, es por ello la importancia del conocimiento de los procesos de manufactura que están involucrados en la elaboración del alambre de cobre, es más, el país es exportador de este producto y por ende la calidad del mismo es de vital importancia para tener sustentabilidad en el mercado externo.

En los procesos de trefilación intervienen muchas variables tales como la calidad del alambrón, el sistema de enfriamiento y las emulsiones de lubricación, en adición a estas condiciones se consideran los parámetros de la máquina de trefilación: velocidad de trefilación, recocido del cobre, vapor y agua de proceso, lo que hace complejo su estudio siendo necesario recurrir al uso de técnicas de laboratorio para simular las condiciones de trabajo que se tienen en fabrica; ya que la línea de producción de la empresa, cuya producción es continua, no está disponible para realizar pruebas. La simulación mediante laminación fue de gran ayuda para reproducir la no

conformidad del producto, manteniendo las mismas condiciones de entrada y salida del sistema de planta se paso al simulado y se encontró los parámetros desviados que provocaban las irregularidades. Utilizando éste mismo método experimental se variaron los parámetros para encontrar las condiciones óptimas de trabajo en las que se obtuvo un producto final de buena calidad libre de manchas a tempori.

Se planteo un objetivo general de mejoramiento de la calidad del alambre y para cumplir el mismo se establecieron los siguientes objetivos específicos:

- Definición de los parámetros del sistema de trefilación.
- Establecimiento de condiciones de laboratorio para simular por laminación el proceso de trefilación.
- Encontrar los parámetros de trabajo en condiciones que reprodujeran los defectos y luego encontrar las condiciones que las eliminaran.
- Definir las condiciones que deben implantarse en el sistema de producción usado en fábrica, en la máquina principal y en componentes auxiliares.
- Calcular los costos que surgen con los cambios propuestos.

CAPÍTULO 1

1. EVALUACIÓN ACTUAL DEL PROBLEMA

1.1 Proceso de trefilación de alambrón de cobre

Materia prima

La materia prima que adquiere la empresa es alambrón de cobre de ocho milímetros de diámetro, la misma que es obtenida a partir de un proceso de colada continua que están conformados por dos hornos, uno de fundición y otro de mantenimiento, tal como se observa en la figura 1.1 donde se presenta un esquema general generado por computadora de una línea de colada (2). Este proceso consta de una máquina de alimentación automática de cátodos de cobre hacia el horno de fundición que cada cierto tiempo carga mediante el canal de inducción de transferencia a un horno de mantenimiento, también de inducción del tipo canal. La máquina de colada continua se encuentra en la parte superior del horno de mantenimiento que

proyecta la unidad de solidificación por inmersión en el metal líquido unos diez centímetros, lo que genera una presión metalostática que fuerza al cobre a subir al interior de la matriz de grafito y con un movimiento continuo, tipo “para y sigue”, el alambrón es alado hacia arriba mediante ejes de tracción accionados por servomotores para ser llevado a los bobinadores.

Figura 1.1. Esquema de una línea de producción continua de cobre (2)

Trefilación del alambrón

La trefilación es un proceso de deformación volumétrica comúnmente utilizada para el acero, cobre, aluminio y aleaciones dúctiles en donde la sección transversal de un alambre o barra se reduce al tirar

a través de uno o varios dados y puesto que se mantiene el volumen se produce un alargamiento en el material trefilado, este proceso se lo muestra en la figura 1.2 que empieza con la bobina de cobre (materia prima) que proporciona el alambrón inicial. Los tambores de acumulación o cabrestante proporcionan el movimiento con la fuerza adecuada para estirar el alambre a través del dado o dados, además proveen una tensión regular en el alambre en la trefilación en serie. La velocidad del alambre se ve aumentada a medida que pasa por cada dado de trefilación. Algunas veces es necesario pasos de recocido intercalados en la trefilación continua dependiendo de la reducción total y el material que se procesa.

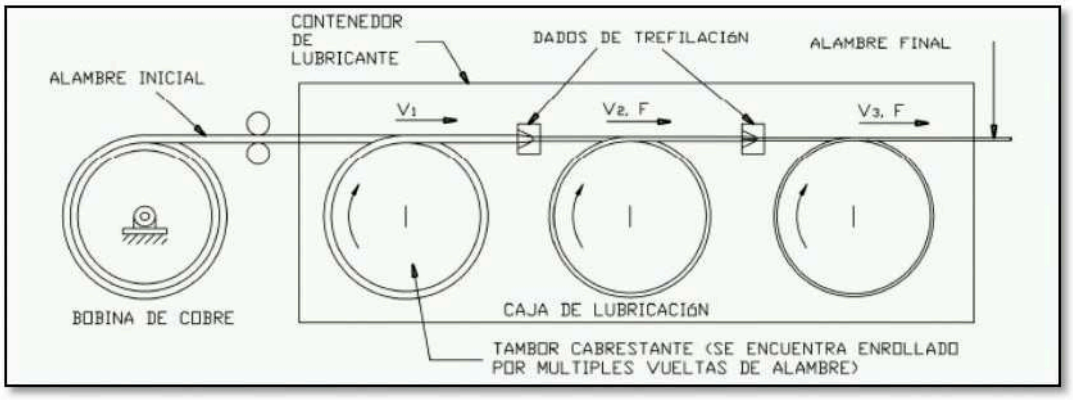


Figura 1.2. Esquema de la trefilación de alambres

En el proceso de trefilación, el material de trabajo se jala a través del dado siendo obvia la presencia de esfuerzos de tensión, valor máximo que está limitado por la fractura del hilo, pero al mismo

tiempo existe una compresión indirecta ya que el metal se comprime a medida que pasa por la abertura del dado. En éste proceso se pueden alcanzar diámetros hasta de 0,03 mm y una reducción máxima por pase del 63,2% bajo condiciones de metal plástico, sin fricción y sin trabajo redundante (7).

La trefilación en frío implica un endurecimiento por deformación, que incluyen estas ventajas: estricto control dimensional, buen acabado superficial, propiedades mejoradas como la resistencia y la dureza, y su capacidad de producción en masa. La lubricación y características de los dados desempeñan un papel importante en el aspecto superficial del hilo o cable, mismos que se tratarán a continuación.

Dados

La trefilación es usada generalmente para obtener secciones redondas, pero pueden generarse secciones cuadradas y de otras formas. Los dados para trefilación son fabricados en acero para herramientas y también en carburo de tungsteno; en alambres finos se utilizan dados de diamante ya que soportan altas velocidades del orden de 15 a 20m/s.

Los ángulos del dado usualmente son entre 6 y 15 grados, y cada dado tiene tanto un ángulo de aproximación y un ángulo de entrada a la sección menor (1). En la figura 1.3 se puede ver la estructura de un dado: área de entrada (Entrada), seguida de un área de reducción (Aproximación), formando el ángulo de aproximación, luego viene la superficie de cojinete, donde se da el tamaño requerido al alambre; a continuación, el Relevo posterior, que tiene un perfil suave para permitir que el alambre salga suavemente.

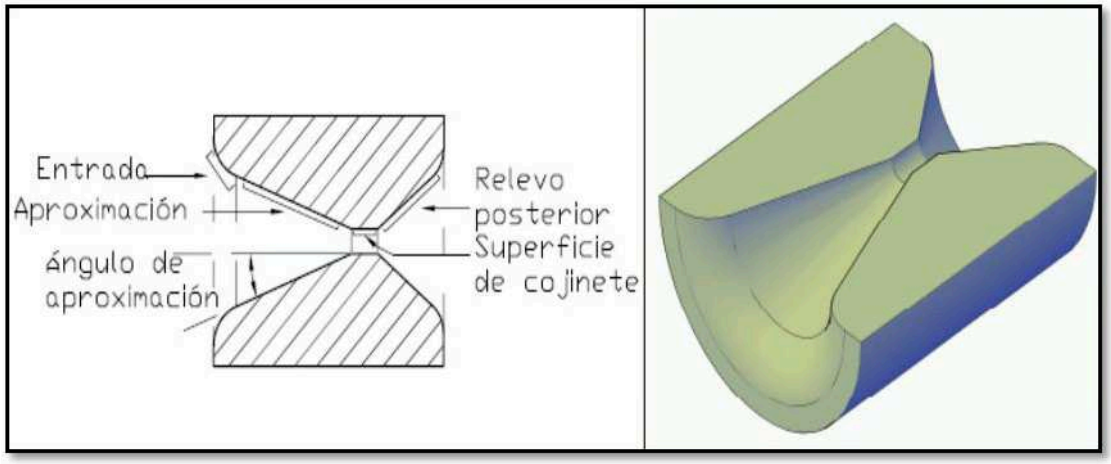


Figura 1.3. Dado de trefilación

Existe un ángulo de aproximación óptimo que proporciona la tensión de estirado menor, mismo que dependerá del trabajo de rozamiento que disminuye con el ángulo, y el trabajo adicional que aumenta con un ángulo pequeño de aproximación. El trabajo adicional se da por la deformación interna y es acumulativo aunque es pequeño el

endurecimiento por deformación. El ángulo resultante queda en unos seis u ocho grados. Si el ángulo de aproximación es muy pequeño se podría producir un ensanchamiento del hilo de cobre en la entrada para reducciones de sección de un 10% o aún menores, además es perjudicial para la lubricación y el hilo al producirse superficies rugosas debido a la adherencia del metal en el dado. Cuando la aproximación (longitud del canal) es demasiado larga se producen esfuerzos de tensión que superan la fluencia, ocasionando posibles fracturas del núcleo que no se ven en el exterior, tal como ocurre en el inicio de una fractura de un metal dúctil.

El rozamiento causa también una heterogeneidad macroscópica en el trefilado debido a que las capas externas del hilo quedan retardadas con respecto a las internas durante la trefilación aunque exista lubricante. Por otra parte, la tensión de rozamiento produce una rotación de la dirección de las tensiones principales, que a su vez determinan cuales de los planos cristalográficos de los granos son orientados más favorablemente para que tenga lugar el deslizamiento entre ellos. La orientación cristalográfica de las capas superficiales del material trabajado estará influenciada, en consecuencia, por el rozamiento (8).

En la figura 1.4 se ilustra el dado de trefilación (núcleo) dentro de la cajonera o encajadura. El material de la cajonera puede ser de un acero normal al carbono con revestimiento duro para protegerlo de la corrosión. La función básica de la cajonera es proteger el núcleo y transferir el calor.

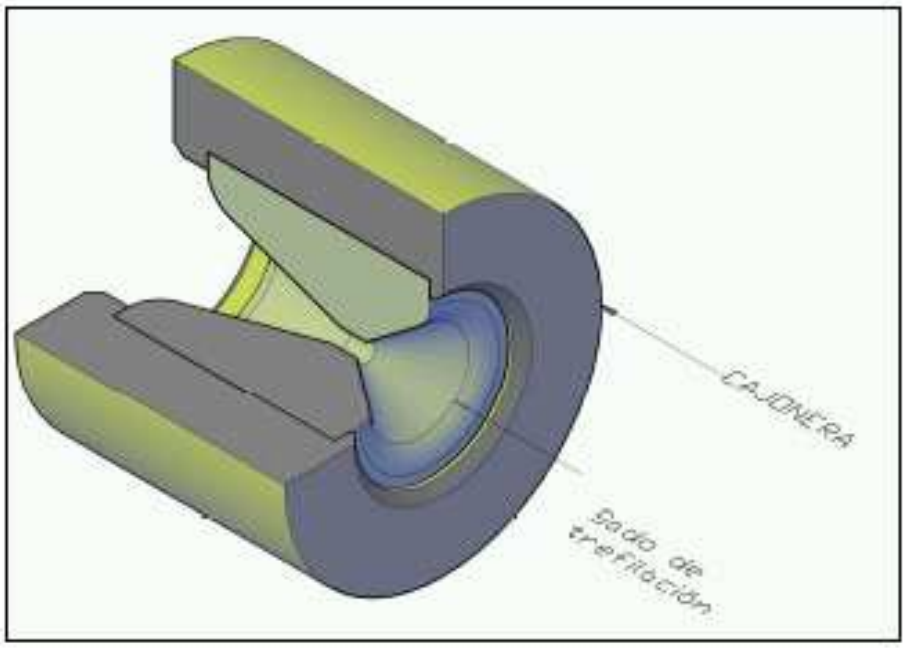


Figura 1.4. Dado de trefilación y cajonera

La deformación en frío provoca un endurecimiento del metal y está limitada por la rotura (8). Entre dos recocidos se puede reducir un 90% en varias pasadas, siendo las últimas pasadas las adecuadas para que el hilo adquiera el diámetro y dureza deseada, lo que estropea todo el trabajo del proceso.

Lubricación

La entrada en la matriz de trefilado está hecha de tal forma que el hilo que entra en ella lleve consigo el lubricante. La lubricación es el factor que más afectará al estado de la superficie de los hilos. La misión principal del lubricante es:

I. Reducir la tensión de tracción
II. Impedir el desgarro de material por adherencia del hilo a la matriz
III. Proteger la nueva superficie formada de la oxidación
IV. Permitir la transferencia de calor.

Una pobre lubricación produce la adherencia entre el dado de trefilación y el material, problema que se desarrolla cuando hay contacto entre matriz e hilo en ausencia del lubricante en esta zona de interfase, entonces si el lubricante es suficiente para rellenar todas las depresiones y elevaciones de la superficie, la lubricación es buena, pero si el espesor de la capa de lubricante, no cubre estos límites, habría contacto metálico y adherencia con posterior desgarre por cizalladura. Cuando el espesor de la película es muy gruesa, toda la presión es adsorbida por la capa de lubricante formando una superficie rugosa.

1.2 Parámetros de entrada y salida del sistema de producción

Para proceder a evaluar el proceso de trefilación, es necesario conocer los parámetros de entrada y salida del sistema, para ello se establece un diagrama de proceso (ver apéndice), cuyos datos tomados de planta se los muestra en la figura 1.5 de la página 13.

Materia Prima.- El cobre que sirve como materia prima para el proceso de trefilación es suministrado por una empresa que pertenece al mismo grupo corporativo. El alambrón de cobre es entregado en forma de bobinas de 5 toneladas, con las siguientes dimensiones: diámetro exterior 1785 mm, diámetro interior 1150 mm y altura 900 mm. El alambrón producido por la empresa proveedora tiene las siguientes características:

- Cu: 99,9 % mínimo
- Diámetro y tolerancia: 8mm +/- 0.4 mm
- Oxígeno: 200 ppm.
- Test de elongación espiral: > 450 m (200 °C)
- Conductividad eléctrica: > 100%

En la figura 1.6 se puede apreciar la bobina de cobre de alambrón de 8 mm de diámetro.

Figura 1.6. Bobina de cobre de alambrón de 8 mm

Trefilado- En la etapa de trefilado, el alambre entra a la máquina de trefilación, llamada MM85, con capacidad de dos líneas de producción y 13 dados de reducción. En esta etapa, la trefilación se encuentra lubricada por una emulsión al 12% de aceite Lubricool 2G en agua y que se encuentra recirculando de manera continua desde un reservorio. La emulsión es enfriada mediante un intercambiador de calor a través de una torre de enfriamiento.

Cámara de recocido.- La cámara de recocido forma parte de la MM85 y está conformada por una polea con bobina de inducción, una cápsula de vapor y un reservorio para baño del alambre con una emulsión al 2% de lubricante Q.A. 4 G. La emulsión es enfriada con el mismo sistema de enfriamiento del trefilado.

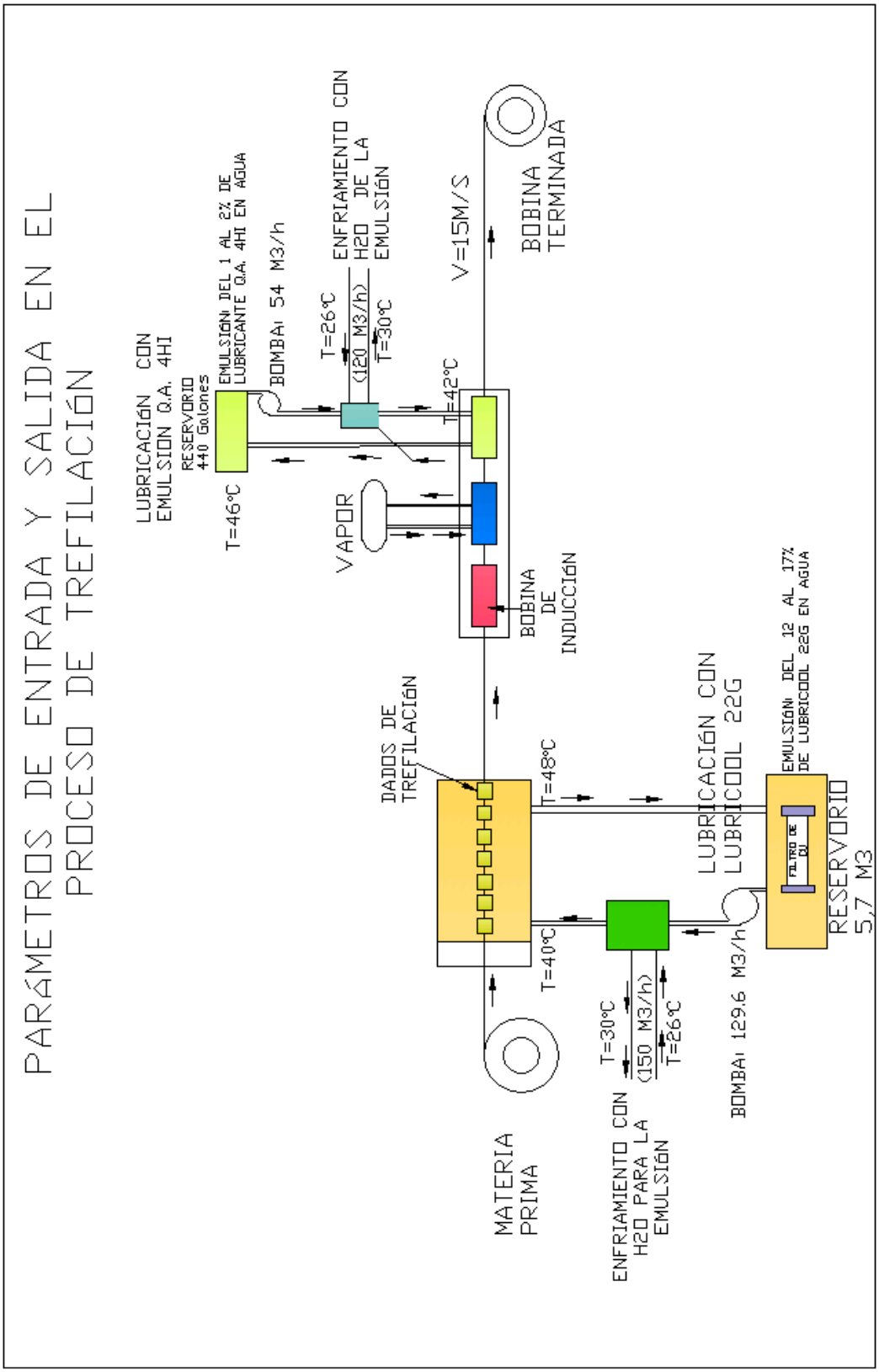


Figura 1.5. Parámetros del sistema de producción

Enrollado.- Luego que el alambre trefilado sale de la cámara de recocido, es enrollado en bobinas con dimensiones similares al del alambrón de 8 mm. En esta etapa, el producto final es etiquetado acotando su peso, diámetro final y su condición de dureza que puede ser duro (agrio) o suave (recocido). El estado agrio quiere decir que el alambre tiene deformación plástica en frío y que sus propiedades mecánicas como la resistencia mecánica y la dureza son elevadas, en cambio cuando han recibido el proceso de recocido, las propiedades cambian hacia el lado de alta ductilidad del alambre.

Almacenamiento.- El almacenamiento es la etapa final de la línea de producción, donde las bobinas están dispuestas de acuerdo a sus dimensiones y estado, para luego proceder a procesos de barnizado o trefilado fino según sea el requerimiento.

1.3 Calidad superficial del producto trefilado

El aspecto superficial del producto final juega un papel importante al momento de elegir entre varios proveedores de cables trefilados, un producto no conforme en el aspecto superficial tiene como respuesta devoluciones del producto y pérdidas económicas por reprocesamiento.

En la producción de la empresa donde se desarrollo el presente trabajo se presentaron históricamente manchas en el producto y son las que se presentan a continuación y que tienen un aspecto de gotas de color tornasol.

Se solicitó a la empresa fotografías de aspectos superficiales de los alambres procesados y muestras del producto terminado de la línea de producción en la máquina MM85 para realizar los análisis en el laboratorio.

En las figuras, desde la 1.7 a la 1.10, proporcionadas por la empresa, se pueden apreciar problemas con el aspecto superficial del alambre trefilado.

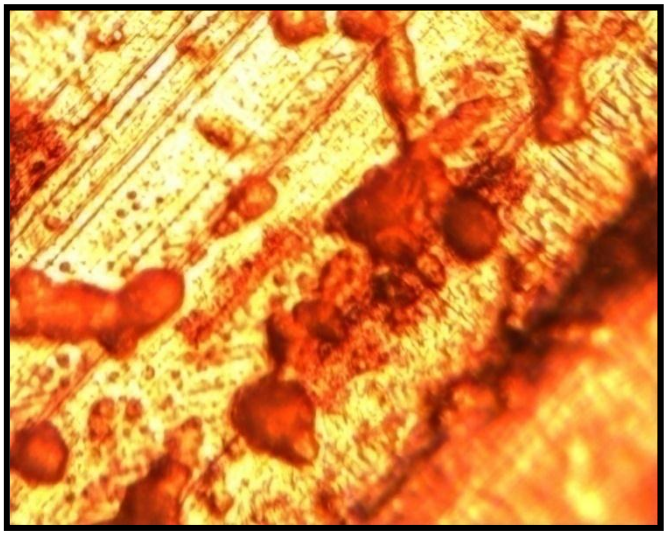


Figura 1.7. Micrografía correspondiente a la fusta 1.1

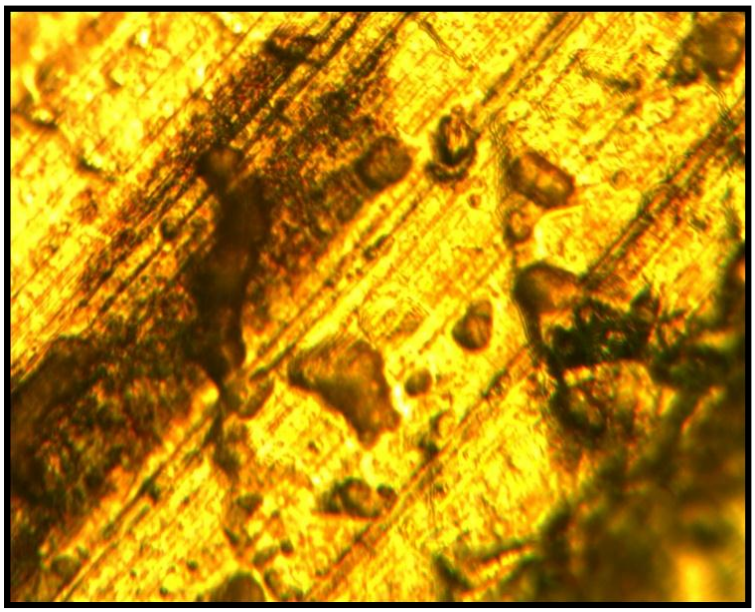


Figura 1.8. Micrografía correspondiente a la fusta 1.2

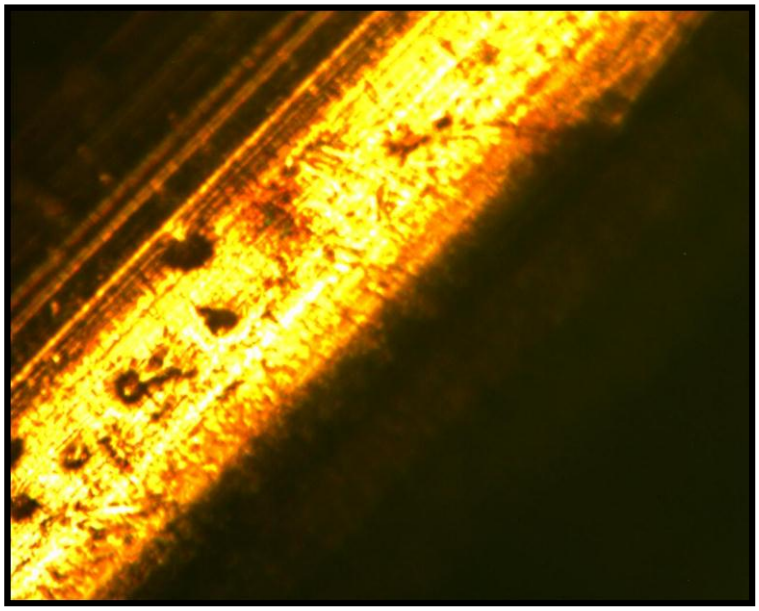


Figura 1.9 Micrografía correspondiente a la fusta 1.23

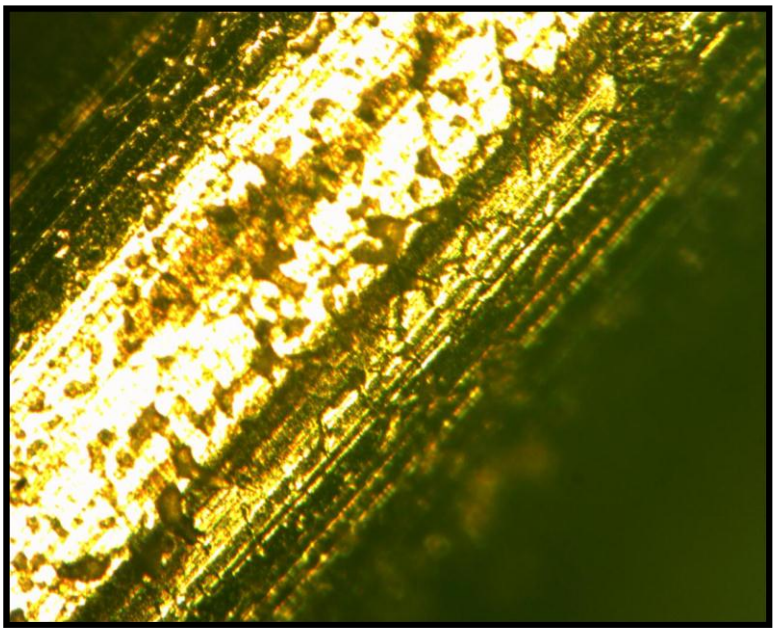


Figura 1.10. Micrografía correspondiente a la fusta 1.3

A fin de tener documentación propia se procedió a recoger muestras en planta. Las figuras 1.11, 1.12 y 1.13 que se presentan a continuación identifican plenamente las manchas en todas las fustas con su respectiva micrografía. La característica más destacable, es que tienen un aspecto tornasol con varios colores, y predominan el verde y el azul, que no son de fácil remoción y se presentan inmediatamente después del paso de la línea o varias horas, o varios días después. En la planta reportan que después de salir de la línea de producción, el alambre desarrolla las manchas, condición que aunque no representa deterioro en relación a sus propiedades

eléctricas, sin embargo su mal aspecto se ve reflejado en la presentación del alambre.

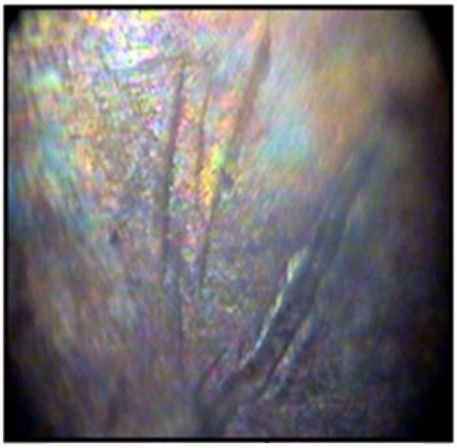
Muestra del proceso	Micrografía superficial	Detalle
Bobina Dulce fusta Ø 1.23		Muestra de alambre recocido sacado de la trefiladora MM85.

Figura 1.11. Alambre y Micrografía de muestra recocida

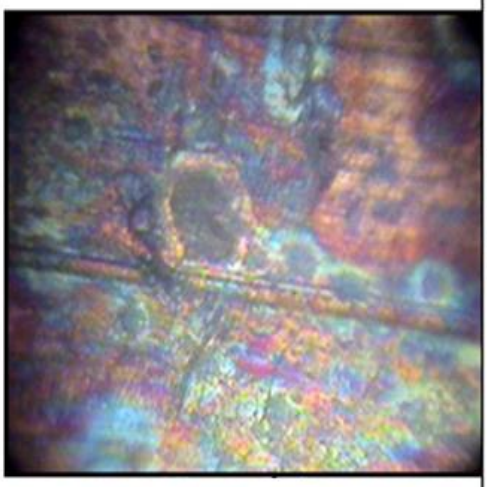
Agrio Ø 1.23 Fusta		Muestra de alambre sin recocido correspondiente a la trefiladora MM85

Figura 1.12. Alambre y Micrografía de muestra agria

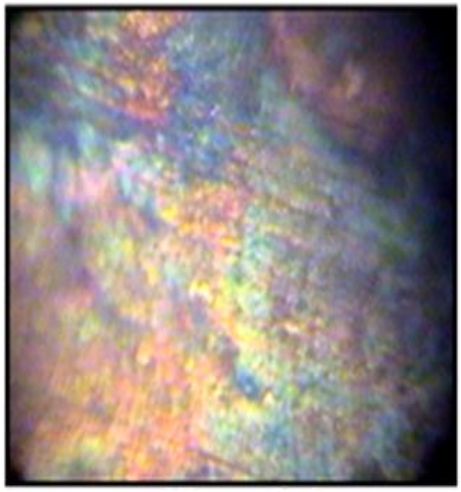
Muestra del proceso	Micrografía superficial	Detalle
Trefilación Dulce- Bobina Ø 1.23		Muestra de alambre recocido, extraído de una bobina en bodega de productos terminados.

Figura 1.13. Alambre y Micrografía de muestra almacenada

Análisis metalográficos.- Se hicieron ensayos de laboratorio de las muestras obtenidas para determinar la calidad del producto terminado mediante el análisis metalográfico.

A fin de establecer la metalografía en los alambres trefilados de cobre, en las figuras 1.14, 1.15 y 1.16 se ilustran las muestras embebidas en resina epóxica de la fusta 1.25, 1.23 y una muestra de una bobina de 1.23 respectivamente.

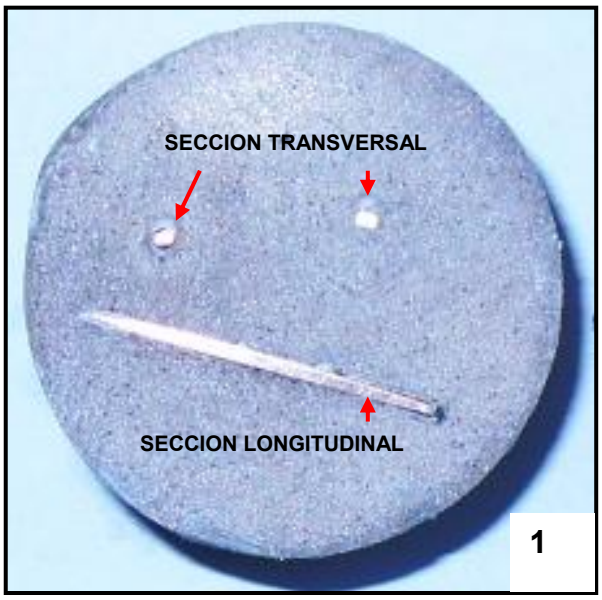


Figura 1.14. Probeta 1 de cobre trefilada hasta la fusta 1.23 mm de diámetro

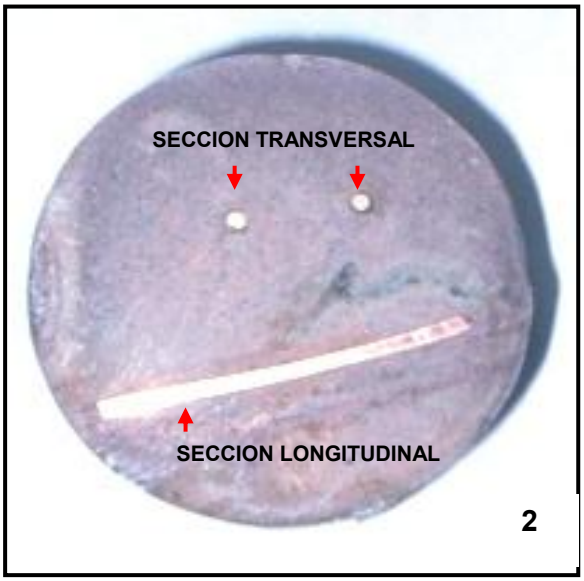


Figura 1.15. Probeta 2 de cobre trefilada hasta la fusta 1.25 en estado agrio

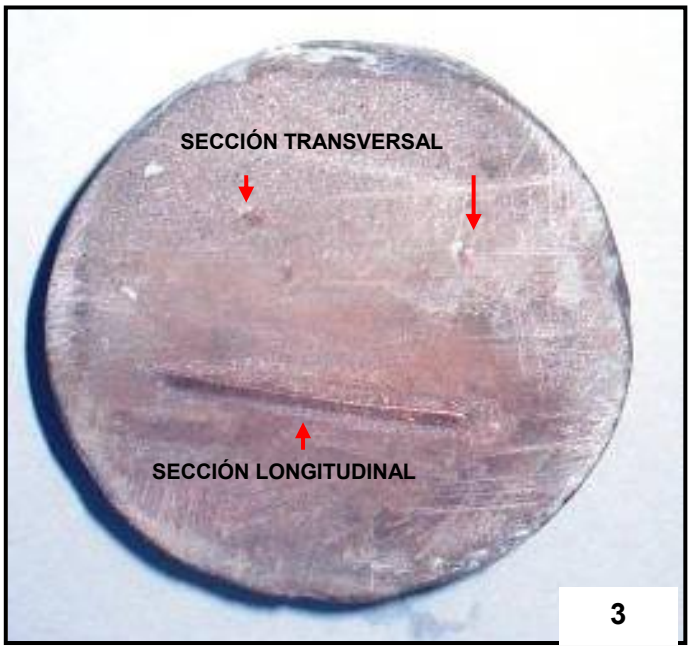
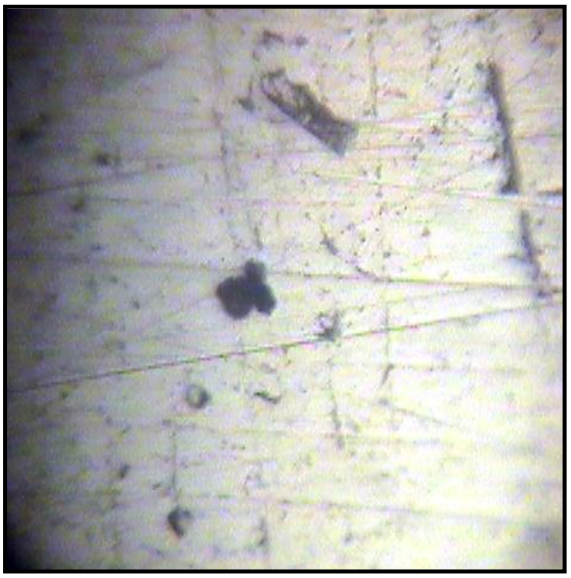


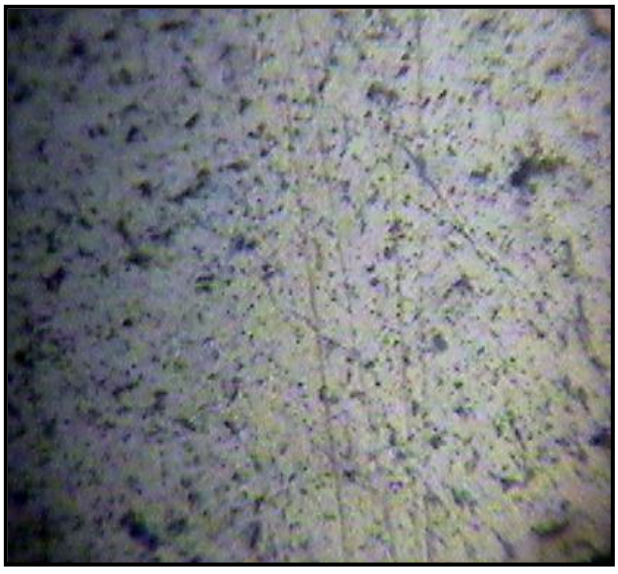
Figura 1.16. Probeta 3 correspondiente a la bobina 1.23 al final de la línea de producción

Las siguientes figuras muestran las micrografías que se obtuvieron después de haber realizado el procedimiento de rigor a las probetas 1, 2 y 3 al conseguir superficies especulares de los metales mediante el proceso de pulido abrasivo con carburo de silicio y alúmina levigada de 0.5 μ.



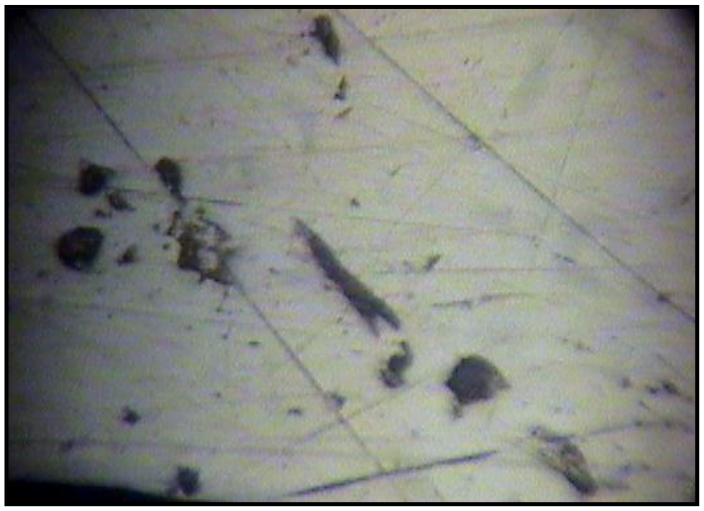
250X **Micrografía** **Sin ataque**

Figura 1.17 Micrografía correspondiente a la probeta 1 donde se observa la fase de grafito en la matriz del cobre.



250X **Micrografía** **Sin ataque**

Figura 1.18 Micrografía correspondiente a la probeta 2 donde se aprecia la cantidad de grafito.



250X **Micrografía** **Sin ataque**

Figura 1.19 Micrografía correspondiente a la probeta 3 donde se aprecian las partículas de grafito en la microestructura.

La observación microscópica en las micrografías de las figuras 1.17, 1.18 y 1.19 sin ataque químico denota la presencia de impurezas que se identifican con grafito, material que cubre la superficie expuesta del horno de inducción donde se hace la fusión del cobre o que sirve para inhibir el cobre en estado líquido de la atmósfera y así impedir su oxidación.

1. 4 Evaluación de la calidad de la materia prima y materiales

Para la evaluación de la calidad de la materia prima se procedió a realizar análisis en el proceso de trefilado, mismos que se enlistan a continuación:

- Análisis químicos y metalográficos de la materia prima.
- Análisis de la calidad del agua
- Análisis de la calidad de la emulsión y del aceite de la emulsión

Análisis químicos

En primer lugar se hicieron análisis químicos del alambrón, tomando muestras de algunas coladas en espera de entrar a trefilación y los datos que se presentan son promédiales. Se procedió a preparar las muestras haciendo probetas laminadas, tal como se muestra en la figura 1.20, en las que se realizaron varios disparos de la máquina de análisis químicos por chispa.

Figura 1.20. Fotografía de las

Probetas ensayadas en máquina de rayos X

A continuación se ubica la tabla 1 con los resultados promedios del contenido del alambrón de cobre por Rayos X:

TABLA 1.

Análisis Químico Vía Rayos X

Muestra	Pb%	Sn%	P%	Mn%	Ni%	Mg%	Cr%
1	<0.001	<0.0005	<0.0005	<0.0005	<0.0003	<0.0005	<0.0003

Muestra	As%	Ag%	Co%	S%	Be%	Au%	B%
1	<0.0004	<0.001	<0.0015	<0.0003	<0.0001	<0.0005	<0.0005

Muestra	Zn%	Fe%	Si%	Sb%	Cd%	Bi%	Al%
1	<0.045	<0.0034	<0.029	<0.0019	<0.0003	<0.0042	<0.010

Muestra	C%	Ti%
1	<0.043	<0.0004

Corrosión del cobre.- Se realizaron dos pruebas de corrosión, la primera de una muestra de planta y la segunda de una muestra comercial. La norma empleada para el análisis fue la INEN927 cuyos resultados se presentan en la tabla 2. Las muestras no presentaron diferencias entre ellas.

TABLA 2.

Corrosión del cobre

Parámetro	Unidad	Muestra #1	Muestra #2	Método de análisis.
Corrosión	Nº	*2b	*2b	INEN927

Muestra #1: Lámina de cobre en estudio.

Muestra #2: Lámina de cobre COMERCIAL

*2b: corrosión de cobre moderada.

Análisis metalográficos de la materia prima

Para este ensayo se prepararon algunas probetas para observación microscópica, se embutieron en resina epóxica las secciónes transversales y longitudinales del alambrón de la forma como se expone en la figura 1.21.

La observación microscópica sin ataque químico denota la presencia de impurezas que se identifican con grafito, material que cubre la superficie expuesta al horno de inducción para inhibir el cobre en estado líquido de la atmósfera y así impedir su oxidación. Se presentan posteriormente las micrografías que identifican claramente la microestructura con la fase de cobre puro y grafito, siendo este último insoluble en el cobre.

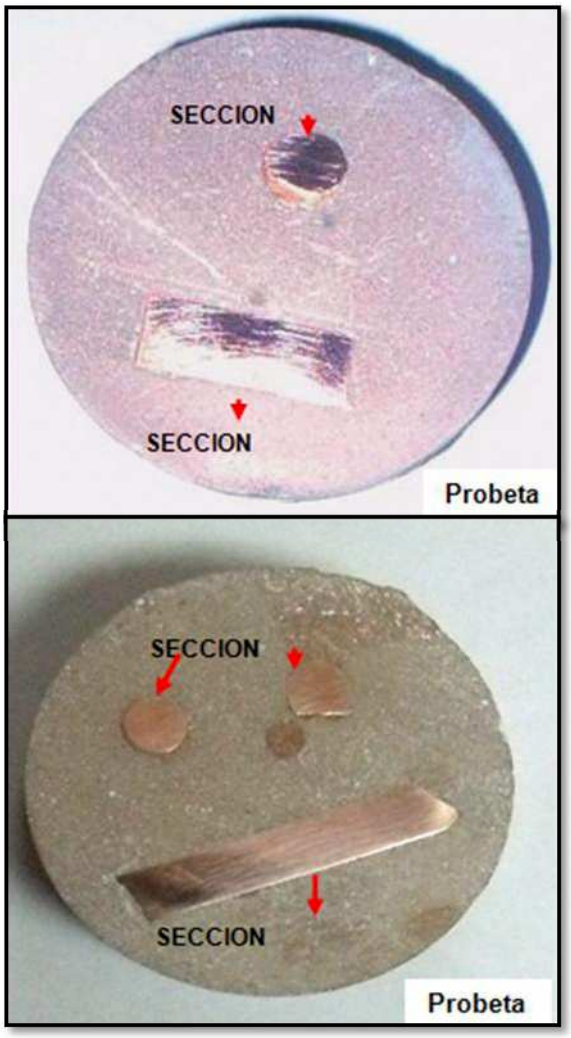
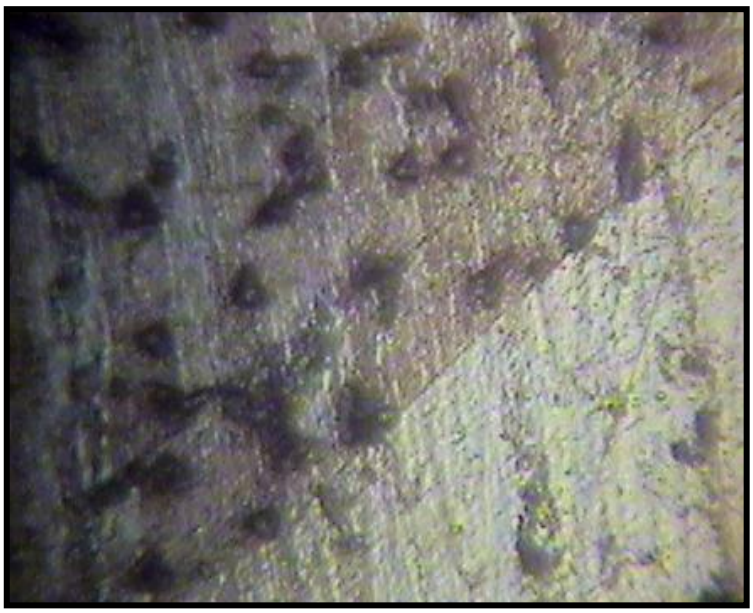


Figura 1.21. Probetas sin pulir.

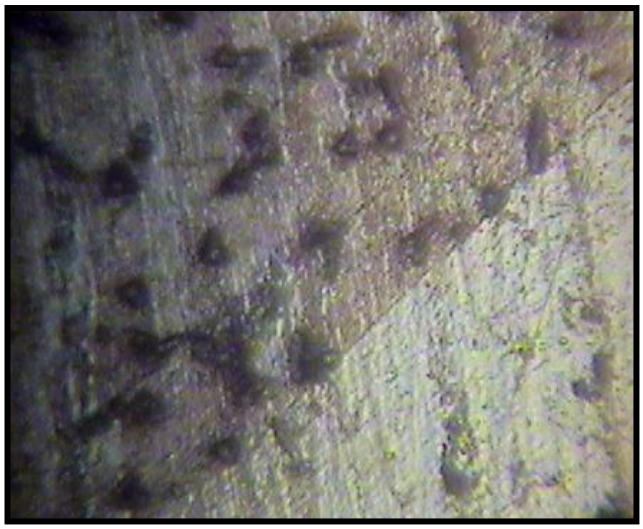
Probetas de alambrón para pulir. Arriba corresponde al alambrón Ø 8mm procedente de la colada continua y el de abajo al alambrón trefilado a Ø 4.211mm

Las figuras 1.22 y 1.23 identifican claramente una microestructura que presenta la fase de cobre puro y grafito, este último es insoluble en el cobre y queda como una inclusión no metálica.



250X **Dicromato de Potasio**

Figura 1.22. Micrografía correspondiente al alambrón de Ø 8mm de cobre en la que se aprecia la fase de cobre y la fase de grafito



250X **Dicromato de Potasio**

Figura 1.23. Micrografía correspondiente al alambrón Ø 4.21mm de cobre en donde se aprecia las variaciones de distribución de grafito en la matriz.

Calidad de agua

Conductividad eléctrica y sólidos totales del agua.- La conductividad de una sustancia se define como "*la habilidad o poder de conducir o transmitir calor, electricidad o sonido*" (6). Siemens por metro [S/m] corresponden a las unidades en el sistema de medición internacional, SI y micromhos por centímetro [mmho/cm] en unidades estándar de EE.UU. La **conductividad eléctrica** (CE) es uno de los parámetros usados para medir la cantidad de iones presentes en el agua. La corriente eléctrica se transporta por medio de iones en una solución, así la conductividad aumenta cuando aumenta la concentración de iones. Los **sólidos totales disueltos** STD, se calculan de la siguiente manera:

STD (mg/l) = 0.5 x CE ($\mu S/cm$ ó mmho/cm)

La relación expresada arriba puede ser usada también para determinar la aceptabilidad de un análisis químico del agua. No se aplica en aguas residuales crudas o con amplia contaminación.

En la tabla 3 se presentan los valores para la conductividad eléctrica y los sólidos totales disueltos según el tipo de agua.

TABLA 3.

Conductividad eléctrica y STD

Tipos de agua	Conductividad Eléctrica	STD (Sólidos totales disueltos)
Agua ultra pura	0,055 $\mu S / cm$	0,0275 mg/l
Agua destilada	0,5 $\mu S / cm$	0,25mg/l
Agua potable	50 – 500 $\mu S / cm$	25-250 mg/l
Agua del mar	53000 $\mu S / cm$	2650 mg/l

Dureza del agua.- La dureza es una característica química del agua que está determinada por el contenido de carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos y ocasionalmente nitratos de calcio y magnesio. La dureza es indeseable en algunos procesos, tales como el lavado doméstico e industrial, provocando que se consuma más jabón al producirse sales insolubles. La tabla 4 muestra los valores de dureza para los distintos tipos de agua.

En agua potable el límite máximo permisible es de 300 mg/l para la dureza.

TABLA 4.

Dureza del agua

Dureza en mg/l como CaCO3	Interpretación
0-75	agua suave
75-150	agua poco dura
150-300	agua dura
> 300	agua muy dura

Cloruros presentes en el agua.- En la Resolución del 23 de Abril de 1984 del Ministerio de Sanidad y Consumo del Estado Español, se fija la concentración máxima de cloro residual combinado que deben tener las aguas potables.

Esta concentración está en función del pH. Para un pH entre 6.5 y 7.4 la concentración de cloro residual combinado, no debe superar 1 mg/l. Para un pH entre 7 y 8, no debe superar 1.5 mg/l. Finalmente si el pH está entre 8 y 9, el cloro combinado no puede superar 1.8 mg/l. En general, un valor de referencia para la concentración de cloro residual en agua potable es de 1,5 mg/l.

Sulfatos presentes en el agua. Los estándares para agua potable del servicio de salud pública tienen un límite máximo de 250 ppm de sulfatos, ya que a valores superiores tiene una acción "purgante". Los límites de concentración, arriba de los cuales se percibe un sabor amargo en el agua son:

Para el sulfato de magnesio 400 a 600 ppm y para el sulfato de calcio son de 250 a 400 ppm.

Análisis de muestras.- Se tomaron muestras del pozo, reservorio y del sistema centralizado a la salida de osmosis para verificar las características de dureza, contenido de cloruros y sulfatos, los resultados se presentan en las tablas 5 y 6.

TABLA 5.

ANÁLISIS #1 DE AGUAS DE POZO Y ÓSMOSIS

Parámetro	Unidad	Muestra #1	Muestra #2	Valores para agua potable	Valores agua de ablandador	Valores para Osmosis inversa
pH	pH	5.33	9.31	6,5 - 8,5	6,5 – 7,5	6,5

Dureza total (CaCO3)	mg/l	1.29	541.8	150 – 300	0-5	0
Cloruros (Cl^-)	mg/l	3.54	637.43	1,5 Max.	0	0
Sulfatos $(SO4^=)$	mg/l	Nd	640	250 Max.	0	0

Muestra #1: Agua del sistema centralizado de osmosis.

Muestra #2: Agua de pozo.

TABLA 6.

ANÁLISIS # 2 DE AGUAS DE RESERVORIO Y OSMOSIS

Parámetro	**Unidad**	**Muestra #1**	**Muestra #2**	**Valores para agua potable**	**Valores agua de ablandador**	**Valores para Osmosis inversa**
Conductividad	μS	40	1450	50 - 500	5 - 100	0 - 5
Dureza total (CaCO3)	mg/l	12	300	150 – 300	0 - 5	0
Cloruros (Cl^-)	mg/l	3	400	1,5 Max.	0	0
STD (sólidos totales disueltos)	mg/l	15	850	500 Max.	10-200	0-10

Muestra #1: Agua a la salida de Osmosis.

Muestra #2: Agua del reservorio.

Calidad de la emulsión y del aceite de la emulsión.- No existen laboratorios en el medio que estén analizando esporádicamente todos los parámetros que tienen relación con la calidad de las emulsiones usados en procesos metalúrgicos, los resultados que se presentan a continuación han sido hechos en la ESPOL, aunque no representan el universo de controles que se hace a menudo en laboratorios de fábricas que trabajan revisando las propiedades importantes de los aceites de emulsiones, los resultados encontrados están presentes en la siguiente tabla:

TABLA 7.

RESIDUO DE COBRE EN MUESTRAS DE EMULSIÓN

Muestras	pH (Unidad de pH)	Cobre (%)
E1	7.82	0.017
E2	7.79	0.040
E3	7.89	0.0002
E4	7.62	0.037
E5	8.30	0.19
E6	8.43	0.017

Método de Análisis para pH: Electromagnético.

Método de Análisis para muestras de cobre por Absorción Atómica.

E1: Emulsión de Lubricool de la máquina MM85 de trefilación.

E2: Emulsión de Lubricool del reservorio de la maquina MM85 de trefilación.

E3: Emulsión de Q.A. del horno de la máquina MM85 de trefilación.

E4: Emulsión de Lubricool de otra máquina de trefilación (línea 4).

E5: Emulsión de Lubricool de la maquina trefiladora de barnizado.

E6: Emulsión de Q.A. del horno de la maquina trefiladora de barnizado.

El cobre presente en las distintas muestras de emulsiones de la planta, en general fueron bajos a excepción de la muestra E5 procedente de la máquina de trefilado. Cabe recalcar que el cobre presente en la emulsión de Q. A. (muestra 3) fue bajo con apenas 0.0002 % de cobre.

El aspecto superficial de la muestra de la emulsión de Lubricool, obtenida de la cámara de trefilado de la máquina MM85, presentaba un aspecto de una película de varias tonalidades, predominando la de color verde cuando la emulsión se la mantenía en reposo.

El incremento de temperatura en las emulsiones disminuye la capacidad de lubricación entre el alambrón y el dado de trefilación

incrementándose la disipación de calor del dado, además provoca evaporación del agua lo que afecta la concentración de la emulsión. El exceso de aceite en la emulsión da problemas en la limpieza del alambre en la parte final del proceso. Además el incremento de la temperatura en la emulsión da lugar a una elevada presencia de iones de cobre en la trefila los cuales son un elemento contaminante que afectan la composición química del aceite. Esta presencia de iones puede provocar una pérdida significativa de la materia prima convirtiéndose en un factor de gran importancia económica.

Para el aceite lubricante se procedió a analizar el contenido de azufre mediante la norma ASTM D-4294, el resultado se lo presenta en la tabla 8.

TABLA 8

ANÁLISIS DEL LUBRICANTE: LUBRICOOL 22G

ANÁLISIS	UNIDAD	NORMA	RESULTADO
AZUFRE	% EN PESO	ASTM D-4294	0.435

1.5 Debilidades del sistema de producción.

A partir de los hallazgos encontrados en las secciones anteriores, se tienen debilidades en el sistema en los siguientes aspectos:

- Agua de proceso en malas condiciones
- Emulsiones sin control de concentraciones
- Temperatura de la emulsión de Lubricool fuera de rango
- Temperatura de la emulsión de Q.A. fuera de rango

Agua de proceso en malas condiciones.- De las tablas 5 y 6 se aprecia que el vapor del pH del agua que sale de osmosis inversa es ácida con 5.33; al emplearse esta agua en la emulsión, sin duda trae problemas de corrosión en el alambrón de cobre si la emulsión no es retirada posteriormente. El pH del agua de pozo de 9.31, que sirve de suministro para la planta ablandadora y de osmosis inversa, es responsable de la presencia de aguas alcalinas.

Para las muestras de agua del reservorio y del pozo, todos los valores de los parámetros analizados en las tablas 5 y 6 se encuentran fuera de rango. Los cloruros, sin duda, con valores por

encima de 400 ppm indican claramente que no existe un control al momento de dosificar el hipoclorito de sodio.

El abastecimiento de agua del sistema es un factor de consideración, debido a que debe estar dentro de los parámetros establecidos de pureza. En general, una elevada concentración de sales, baja el rendimiento de la emulsión. El sistema de ablandado, el osmosis y el mismo cobre se ven severamente afectados por el contenido de cloruros presente en el agua, especialmente si el sistema de trefilación mantiene temperaturas fuera de los límites permitidos.

Durante la toma de datos se pudo apreciar una capa fina de espuma en el reservorio de la emulsión. La espuma se genera debido a presencia de sales provenientes del agua de la emulsión. El agua utilizada para emulsiones debe ser de baja dureza y mejor aún desmineralizada (desionizada) para obtener baja formación de espuma. La dureza de 12 mg/l encontrada en agua de aportación en la emulsión esta fuera del límite en lo que a sistemas de osmosis se refiere.

La conductividad eléctrica del agua es una forma de evaluar el contenido de sales y el grado de incremento en la emulsión, debido a que existe una leve pérdida de agua por evaporación la conductividad se incrementa. La conductividad eléctrica del agua en la máquina MM85, corresponde a la muestra #1 de la tabla 6 con en 40 μS, valor que está dentro del parámetro de una agua desmineralizada, pero fuera de rango para un agua proveniente de osmosis.

Emulsiones sin control de concentraciones.- La empresa cuenta con un refractómetro para medir la concentración en las emulsiones, pero ésta práctica no se la está llevando bajo frecuencias preestablecidas, por lo que no se tiene la seguridad que las emulsiones operen en las condiciones de concentración recomendadas.

Temperatura de la emulsión de Lubricool fuera de rango.- La temperatura en la emulsión de Lubricool 22G. se encuentra fuera del rango recomendado, entre 35 y 45ºC, al estar por el orden de los

48ºC. El sistema de enfriamiento presentó buenos resultados con temperaturas de enfriamiento 1ºC menor al medio ambiente, pero el intercambiador de calor no alcanza a mantener la temperatura de la emulsión dentro de los rangos recomendados.

La elevada temperatura desencadena un progresivo aumento de los sólidos totales disueltos (STD) lo que implica un aumento de la carga electrolítica. Cuando la temperatura de la emulsión y la carga electrolítica es elevada, el aceite se separa de la emulsión y flota. Esta característica se pudo observar durante la operación de la MM85 mientras se tomaba las muestras.

Temperatura de la emulsión de Q.A. fuera de rango.- La temperatura en la emulsión de Q.A. se encuentra también fuera del rango al estar por el orden de los 48ºC cuando el rango recomendado por el fabricante es de 35 a 45ºC. La máquina MM85 comparte el mismo sistema de enfriamiento para las dos emulsiones y tiene iguales condiciones de temperatura para el agua de entrada y salida del intercambiador de la emulsión de Q.A.

CAPÍTULO 2

2. MODIFICACIÓN DEL SISTEMA PARA MEJORAMIENTO DEL PRODUCTO

En este capítulo se desarrollarán ensayos de laminación en el alambrón de cobre con el fin de simular el proceso de trefilación y reproducir el producto no conforme, utilizando los mismos parámetros de operación empleados en la fabricación del producto debido a que no se pueden realizar pruebas en la máquina de trefilación de la empresa por su proceso continuo de producción. Además se realizarán ensayos cambiando los parámetros para ver cómo afectan el aspecto superficial, que es uno de los objetivos principales de estudio de ésta tesis. Con el resultado de los ensayos se procede entonces a la evaluación pertinente, analizando las distintas situaciones.

2.1 Simulación del proceso de trefilación por laminación del alambrón

La simulación de procesos es una de las más grandes herramientas de la ingeniería, la cual se utiliza para representar un proceso mediante otro que lo hace mucho más simple y entendible (5). La mayoría de problemas prácticos de ingeniería se resuelven usando las ecuaciones y procedimientos analíticos pero existe un gran número de problemas cuya solución depende de una combinación de análisis y datos que se obtienen experimentalmente de sistemas sencillos que se puedan usar para describir el comportamiento de otros sistemas semejantes y complejos. A continuación se mencionan las características básicas que hacen posible la similitud entre estos dos procesos.

Para el proceso de laminado, el espesor del material de trabajo se reduce mediante fuerzas de compresión por deformación mediante dos rodillos que giran de manera opuesta, mientras que la trefilación el material de trabajo se hala a través del dado y aunque la tensión es obvia, la compresión juega un papel importante debido a que el metal se comprime al pasar a través de la abertura del dado.

Draft y reducción.- Para denotar la diferencia de tamaños del material de trabajo antes y después de procesarlo, la laminación y

trefilación emplean el término *draft,* que representa la cantidad de reducción del espesor y diámetro respectivamente. En el laminado plano el draft es:

$$d = t_o - t_f$$

donde d = draft (en milímetros); t_o = espesor inicial y t_f = espesor final en milímetros. La reducción se expresa como una fracción del espesor del material inicial:

$$r = \frac{d}{t_o}$$

donde r = reducción.

Para el trefilado el draft es la diferencia entre el diámetro inicial y el final:

$$d = d_o - d_f$$

donde d = draft (en milímetros); t_o = diámetro inicial y t_f = diámetro final de trabajo en milímetros. La reducción del área en la trefilación se define como:

$$r = \frac{A_o - A_f}{A_o}$$

donde r = reducción del área trefilada; A_o = área inicial de trabajo y A_f = área final en milímetros cuadrados.

Las reducciones máximas por pase.- En ambos casos está limitada por la resistencia a la fluencia del material que se procesa. Las reducciones (adimensionales) frecuentemente se las expresa como porcentajes y tanto en el laminado como en el trefilado pueden existir varios pasos para alcanzar la reducción deseada.

Preparación del trabajo.- Antes del laminado y trefilado, el material inicial debe ser preparado adecuadamente, existen tres condiciones aplicadas normalmente: el recocido, limpieza y afilado, ésta última condición no es aplicada en la laminación, pero para el proceso de trefilado el diámetro del extremo inicial es reducido de manera que pueda insertarse a través del dado para iniciar el proceso.

2.2 Ensayos de laminación para reproducir defecto superficial cambiando los parámetros

El objetivo de esta experimentación fue tratar de reproducir la falla en una lámina comercial y en una platina hecha del alambrón

proveniente de la empresa, cambiando parámetros con la finalidad de descartar posibles problemas con la materia prima.

Condiciones de parámetros

Materiales.- En cuanto a materiales, la empresa utiliza alambrón de cobre procedente de una compañía que pertenece al mismo grupo empresarial, a pesar de que los resultados de los análisis efectuados en la misma fueron satisfactorios, se empleó una segunda muestra de cobre comercial para compararla, debido a que se debe descartar que la presencia de grafito en la muestra del alambrón no sea la causa del problema.

Reducción.- Para constatar el comportamiento de los materiales a condiciones similares, a los de la planta de trefilación se procedió a realizarles operaciones de laminación con porcentajes de reducción equivalentes a los de trefilación, para ello se tomó los resultados de la tabla 9, del producto con mayor producción que tiene ocho pases y 1.98 mm de diámetro finales, siendo el 29% el promedio de los resultados para la reducción, parámetro que será fijo, debido a que éste se mantiene constante en la máquina MM85 de trefilación.

TABLA 9.

Reducción de área por pase

# PASES	DIÁMETRO	ÁREA mm2	% REDUCCIÓN
INICIO	8	50,26	
1	6,85	36,85	26,68
2	5,758	26,04	29,34
3	4,841	18,41	29,32
4	4,069	13,00	29,35
5	3,464	9,42	27,53
6	2,981	6,98	25,94
7	2,585	5,25	24,80
8	2,241	3,94	24,84
	1,98	3,08	21,94

Emulsión.- La emulsión empleada es la misma que se utiliza en la máquina MM85, en iguales condiciones de temperatura registradas durante la operación. La temperatura es uno de los parámetros que varía en el proceso, desde la temperatura ambiente, cuando arranca hasta alcanzar los 48 grados centígrados.

Recocido. - El recocido en la máquina de trefilación se lo realiza a través de una bobina de inducción cuya temperatura no puede ser medida y el tiempo de contacto es pequeño (0,08 segundos), es por

ello que se optó por someter las probetas a 200 grados centígrados por un espacio de 30 minutos, tiempo y temperatura suficientes para evaporar y fijar cualquier residuo existente de la emulsión en el cobre.

Preparación de probetas previo a la laminación

Las probetas de las muestras de cobre a ser laminadas, se las preparó de acuerdo a su procedencia. El procedimiento adoptado se lo enuncia por separado a continuación:

- **Probeta comercial.-** Se tomó una muestra de la platina comercial de cobre de 1cm x 0.5cm x 5cm. Con estas dimensiones la muestra no requiere alteraciones físicas, sin embargo debe ser colocada en la estufa a 200ºC por 30 minutos para homogenizar los granos de la microestructura.

- **Probeta de planta.-** A partir de la materia prima (alambrón de cobre de 8 mm), se procedió a tomar una muestra de 5 cm de largo, calentarla con el soplete para luego forjarla a golpe de martillo, de tal manera que la barrilla forme una platina de 1cm x 0.5cm x 5cm. Luego se procedió a darle un acabado superficial hasta eliminar los defectos dejados por los golpes, y finalmente se la colocó en la estufa a 200ºC por 30 minutos para homogenizar los granos de la microestructura.

Condiciones para reproducir defecto

Las condiciones para realizar los ensayos de laminación que permitan reproducir el defecto superficial del cobre trefilado, están basadas en las “condiciones de los parámetros” vistas anteriormente, con esto se constató el comportamiento de los materiales en condiciones similares a los de la planta de trefilación, al realizar operaciones de laminación con porcentajes de reducción equivalentes, uso de la emulsión aceite-agua de planta en diferentes condiciones de temperatura, laminaciones recocidas y agrias, y distintas probetas de cobre, tal como se ha registrado de manera más específica en la Tabla 10, desarrollándose seis ensayos para determinar la causa del problema.

Tabla 10.

Condiciones para reproducir defecto superficial por laminación

Pr #	% de reducción por pase	# de pases	Material	T de recocido	Tiempo de recocido (min.)	Lubricante	T. E.
1.1	29	8	Cobre de planta	200 ºC	30	Emulsión de planta	27ºC

1.2	29	8	Cobre comercial	200 ºC	30	Emulsión de planta	27ºC
2.1	29	8	Cobre de planta	200 ºC	30	Emulsión de planta	48ºC
2.2	29	8	Cobre comercial	200 ºC	30	Emulsión de planta	48ºC
3.1	29	8	Cobre de planta	Ambiente	--	Emulsión de planta	27ºC
3.2	29	8	Cobre de planta	Ambiente	--	Emulsión de planta	48ºC

Pr #: Prueba número.
T: Temperatura.
T. E.: Temperatura de la emulsión.
--: No requiere recocido.

A partir de este punto, todas las pruebas que se realizaron tendrán como parámetro fijo, el % de reducción y el # de pases, debido a que éstos se mantienen durante la elaboración de los alambres de cobre en la máquina trefiladora MM85.

Resultados del ensayo para reproducción del defecto

En las tablas 11, 12 y 13 se presentan los resultados para las pruebas 1, 2 y 3 en donde se pueden apreciar imágenes de las

probetas laminadas con las diferentes condiciones de trabajo, aplicadas en cada uno de los ensayos.

En la prueba 1 se uso dos tipos de probetas, una procedente de la planta y la otra de una platina de cobre comercial, como lubricante se utilizó la emulsión de la máquina MM85 con temperatura de 27 ºC que se aplicó de forma continua durante los ocho pases de laminación; al finalizar el octavo pase las probetas laminadas fueron recocidas a 200 ºC en la estufa por un espacio de 30 minutos, los resultados para esta prueba se los muestra la tabla 11.

TABLA 11.

Prueba 1 de ensayos de laminación para reproducir falla

Prueba #	Material de ensayo	Lubricante	Temperatura de la emulsión	Temperatura de recocido
1.1	Alambrón de cobre de la planta	Emulsión de planta	27 ºC	200 ºC
1.2	Platina comercial de cobre	Emulsión de planta	27 ºC	200 ºC

Prueba #	Material de ensayo	Lubricante	Temperatura de la emulsión	Temperatura de recocido
Prueba 1.1. Lámina de cobre de la planta				
Prueba 1.2. Lámina de cobre comercial				

TABLA 12.

Prueba 2 de ensayos de laminación para reproducir falla

Prueba #	Material de ensayo	Lubricante	Temperatura de la emulsión	Temperatura de recocido
2.1	Alambrón de cobre de la planta	Emulsión de planta	48 ºC	200 ºC
2.2	Platina comercial de cobre	Emulsión de planta	48ºC	200 ºC

Prueba 2.1. Lámina de cobre de la planta

Prueba 2.2. Lámina de cobre comercial

Para la prueba 2 se empleo también dos tipos de probetas, una procedente de la planta y la otra de una platina de cobre comercial, como lubricante la emulsión de la máquina MM85 con temperatura de 48 ºC, aplicada de forma continua durante la laminación; al finalizar las probetas se recocieron a 200 ºC por 30 minutos; los resultados para esta prueba se los presenta en la tabla 12.

Para la prueba 3 se emplearon probetas de planta, la emulsión de la máquina MM85 con temperaturas de 27 y 48 ºC, aplicada de forma continua durante la laminación; al finalizar las probetas no fueron

recocidas, dejándolas agrias; los resultados para esta prueba se ilustran en la tabla 13.

TABLA 13.

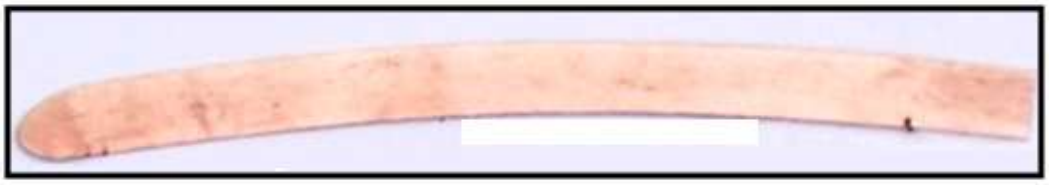
Prueba 3 de ensayos de laminación para reproducir falla

.

Prueba #	Material de ensayo	Lubricante	Temperatura de la emulsión	Temperatura de recocido
3.1	Alambrón de cobre de la planta	Emulsión de planta	27 ºC	--
3.2	Alambrón de cobre de la planta	Emulsión de planta	48ºC	--

Prueba 3.1. Lámina de cobre a 27 ºC

Prueba 3.2. Lámina de cobre a 48 ºC



En vista de los buenos resultados de la prueba 3, se realizó un seguimiento para ver el comportamiento de las probetas laminadas después de las 24 y 144 horas de haber realizado el ensayo de laminación, tal como se puede observar en la figura 2.1.

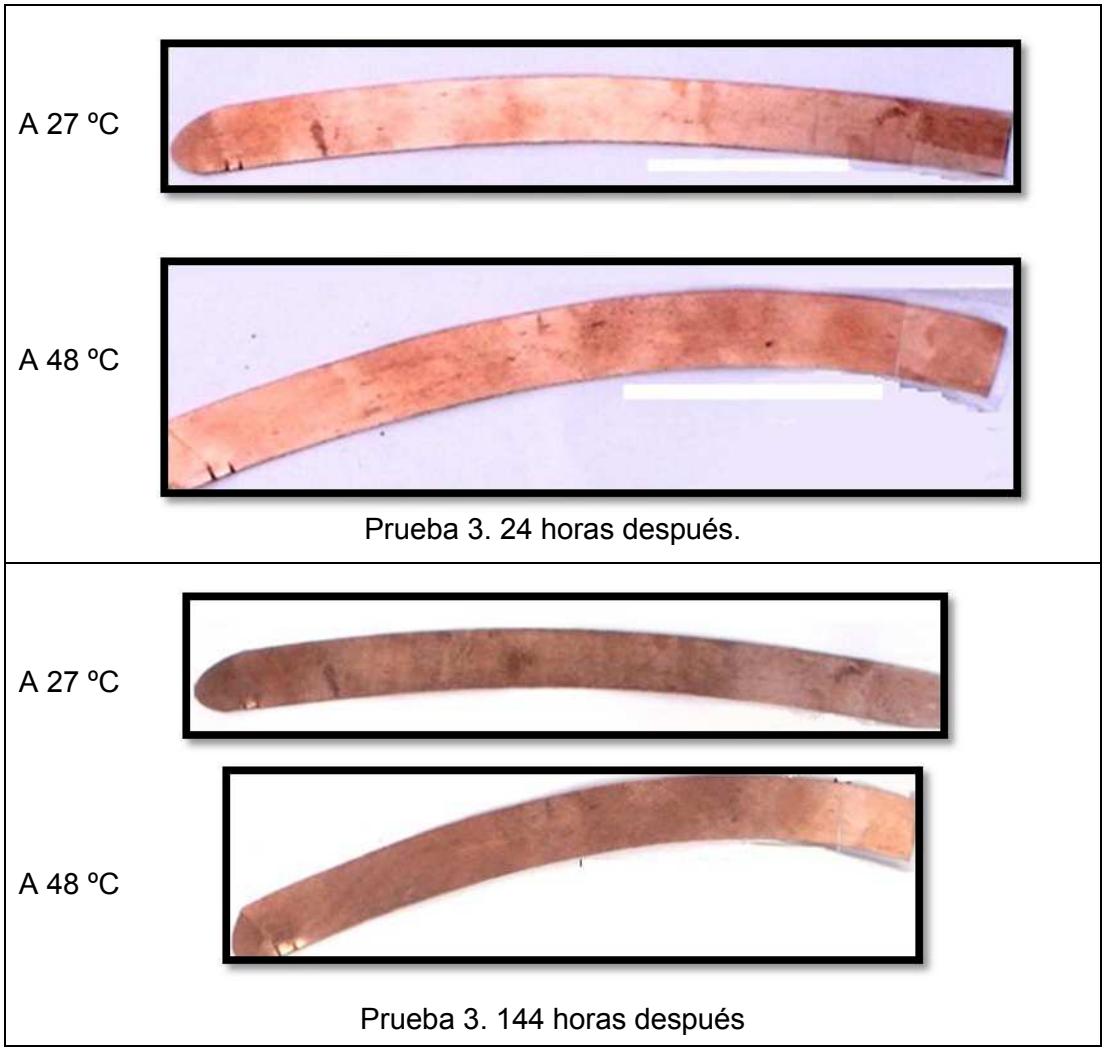


Figura 2.1. Aspecto superficial después de las 24 y 144 horas del ensayo de laminación de la Prueba 3.

2.3 Evaluación de los resultados

De los resultados obtenidos de la sección 2.2 se procedió a evaluar las pruebas 1, 2 y 3, mediante una puntuación en la que a los ensayos se los calificó en escala del 1 al 5, que representan ponderaciones desde pésimo, malo, regular, bueno y muy bueno respectivamente; considerando muy bueno cuando el resultado del ensayo presente un aspecto superficial libre de manchas. En la tabla 14 se presentan las puntuaciones para las pruebas en cuestión, en donde se acotan además sus respectivas observaciones:

TABLA 14.

Evaluación de resultados en ensayos de reproducción de defectos

Prueba #	Resultado	Puntuación	Observaciones
1.1		3	Existen pocas manchas, y presencia de oxidación.
1.2		2	Lámina manchada

2.1		1	Lámina completamente manchada
2.2		1	Lámina completamente manchada
3.1		4	Presencia leves de manchas
3.2		4	Presencia leve de manchas

Se debe recordar que las pruebas 1.1, 1.2, 2.1 y 2.2 tuvieron recocido, de las cuales la que mayor puntuación alcanzo entre ellas fue la 1.1; las pruebas restantes, 3.1 y 3.2, no tuvieron recocido, manteniendo su estado agrio, sin embargo presentaron los más altos puntajes: 4. De esto se deduce que el recocido fija la emulsión residual en la lámina de cobre, además se aprecia que a mayor temperatura de la emulsión el aspecto superficial se afecta en mayor proporción.

Para laminados con emulsiones a altas temperaturas (48ºC), que están fuera del rango recomendado por el fabricante (temperatura

máxima de la emulsión de 45 ºC) del Lubricool, se determina que los resultados son pésimos para los productos finales que son recocidos. La emulsión residual presente en el producto final es la causante del problema del manchado, es por ello que es necesario realizar pruebas, variando la temperatura de la misma con la finalidad de analizar el comportamiento del acabado superficial final, utilizando nuevas emulsiones con aguas apropiadas y finalmente buscar métodos de limpieza para retirar la emulsión del material de trabajo antes que pase por la etapa de recocido.

2.4 Cambios que deben realizarse al sistema para mejoramiento

Por las condiciones normales en que opera la máquina referente al trefilado, y en vista de que no hay problemas de rugosidad superficial y ruptura del alambre, se toman como fijos los parámetros de % de reducción de área por pase y velocidad de trefilación

En la sección 2.3 se estableció que la emulsión residual se fija a la placa laminada al pasar por la etapa de recocido; la variación de las condiciones de temperatura en la emulsión de la planta, que está

directamente relacionada con el enfriamiento, fue el primer indicio de cambio de parámetros en la simulación por laminación con fines de mejora; luego se procedió a utilizar emulsión nueva al 10 y 12% (de acuerdo con la recomendación del fabricante) y finalmente se implementó distintos tipos de limpieza para retirar la emulsión residual. En la tabla 15 se presenta el esquema de variación de parámetros realizado para los ensayos de laminación.

TABLA 15.

Variación de parámetros para ensayos de laminación

# de prueba	Emulsión	Temperatura de la emulsión	Tipo de limpieza
4	Emulsión de planta	Variable	--
5	Emulsión de planta	Variable	Agua, detergente y agua caliente
6	Emulsión nueva al 10%	Variable	Agua, detergente y agua caliente
7	Emulsión nueva al 12%	Variable	Agua
8	Emulsión nueva al 12%	Variable	Detergente
9	Emulsión nueva al 12%	27ºC	Vapor

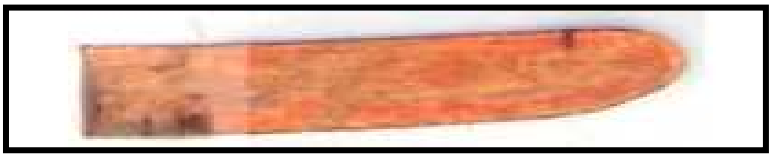
Ensayo variando las condiciones de enfriamiento de la emulsión de planta

Para variar las condiciones de enfriamiento de la emulsión se procedió a realizar distintas pruebas de laminación del cobre con incrementos de temperatura para obtener emulsiones a 30, 35, 40, y 45 grados centígrados, manteniendo el resto de condiciones iniciales. El resultado de éste ensayo se lo ilustra en la tabla 16 en la que se aprecia que todas las probetas resultaron manchadas, pero existe la tendencia que a mayor temperatura de la emulsión las manchas aparecen en mayor proporción.

TABLA 16.

Prueba 4 de ensayos de laminación con temperatura variable en la emulsión

Prueba #	*T.E. (ºC)	Resultados.
4.1	30	

4.2	35	
4.3	40	
4.4	45	

*T.E.: Temperatura de la emulsión.

Variación de las condiciones de enfriamiento, emulsión y tipos de lavado.- Al mejorar las condiciones de enfriamiento se obtuvieron buenos resultados aunque las manchas superficiales persistieron. El retiro de la emulsión previo al recocido se hace necesario, es por ello que se empleó distintos tipos de lavado, tales como:

- Lavado con agua
- Lavado con detergente
- Lavado con agua caliente
- Lavado con vapor

Los lavados para el retiro de la emulsión fueron efectuados inmediatamente después de realizar el último pase de reducción de la máquina de laminación. Se eligió una distribución de aplicación de los lavados de acuerdo con las observaciones obtenidas, que a mayor temperatura de la emulsión se da una mayor fijación, por lo que las cuatro pruebas a realizarse tendrán la siguiente distribución:

- Lavado con agua y la emulsión a 30º C
- Lavado con detergente y la emulsión a 35ºC
- Lavado con agua caliente y la emulsión a 40 y 45ºC
- Lavado con vapor y la emulsión a 27ºC

Ensayo variando las condiciones de enfriamiento en la emulsión y lavado previo con agua, detergente y agua caliente.

Manteniendo la misma secuencia anterior, en la tabla 17 se muestran los resultados de las pruebas de laminación utilizando las mismas condiciones de porcentaje de reducción de área por pase, emulsión de planta, velocidad de laminación, recocido, distintas temperaturas de enfriamiento y los distintos lavados previos al recocido.

TABLA 17.

Prueba 5 de ensayos de laminación con temperatura variable en la emulsión de la planta y lavado previo al recocido

Prueba #	*T.E. (ºC)	Tipo de lavado	Resultados.
5.1	30	Agua	
5.2	35	Detergente	
5.3	40	Agua caliente	
5.4	45	Agua caliente	

*T.E.: Temperatura de la emulsión.

De la tabla 17 se aprecia que las pruebas 5.1 y 5.2, resultaron levemente manchadas y que las pruebas 5.3 y 5.4 presentaron aspectos superficiales oxidadas y levemente manchadas.

Ensayo con variación de las condiciones de enfriamiento de la emulsión, emulsión nueva al 10%, y lavado previo (con agua, detergente y agua caliente)

De los parámetros analizados en la sección 1.4, el agua con la que se prepara la emulsión se encuentra fuera de parámetros, teniendo como resultado el uso de una emulsión de planta de mala calidad. La recomendación de los fabricantes de aceite para emulsiones es emplear agua con bajos contenidos de sales, cuya concentración de aceite varía de acuerdo al tipo de trefilado, del 10 al 12% cuando se reduce el alambrón hasta 1.8mm y del 6 al 8% para diámetros finales de 0.2 a 0.8 mm.

La preparación de una nueva emulsión de agua destilada y aceite Lubricool 22G al 10% y 12% permitió evaluar las características finales en el aspecto superficial de las probetas laminadas. El fabricante de Lubricool recomienda preparar la emulsión al 12%, de

acuerdo con las condiciones de trabajo de la máquina trefiladora, pero se realizaron pruebas al 10% para ver cómo afecta el aspecto superficial final en las probetas de cobre laminadas, sin antes recordar que una capa muy fina de lubricante ocasiona contacto metálico por adherencia con posterior desgarro por cizalladura. En la tabla 18 se presentan los resultados de laminación con condiciones iguales que en la prueba anterior pero con emulsión nueva al 10% de concentración de aceite Lubricool 22G.

TABLA 18.

Prueba 6 de ensayos de laminación con temperatura variable en la emulsión, lavado previo y emulsión nueva al 10%

Prueba #	*T.E. (ºC)	Tipo de lavado	Resultados.
6.1	30	Agua	
6.2	35	Detergente	

6.3	40	Agua caliente	
6.4	45	Agua caliente	

*T.E.: Temperatura de la emulsión.

De la tabla 18, las probetas presentaron las siguientes características: en la prueba 6.1 se dio una leve oxidación con pocas manchas, en la prueba 6.2 se tuvo poco óxido con muy pocas manchas, la prueba 6.3 presento óxido con leves manchas al igual que en la prueba 6.4.

Ensayo variando las condiciones de enfriamiento de la emulsión, lavado previo con agua y emulsión nueva al 12%

En la tabla 19 se presentan los resultados de la prueba 7 en la que se procedieron a realizar laminaciones con temperaturas de 30, 35, 40 y 45ºC de la emulsión nueva al 12%, con posterior lavado con agua y recocido.

TABLA 19.

Prueba 7 de ensayos de laminación con temperatura variable en la emulsión, lavado previo con agua y emulsión nueva al 12%

Prueba #	*T.E. (ºC)	Tipo de lavado	Resultados.
7.1	30	Agua	
7.2	35	Agua	
7.3	40	Agua	
7.4	45	Agua	

*T.E.: Temperatura de la emulsión.

De los resultados de la prueba 7, se tiene que la limpieza con agua no fue efectiva para retirar totalmente los residuos de aceite de la emulsión.

Ensayo variando las condiciones de enfriamiento de la emulsión, lavado previo con detergente y emulsión nueva al 12%

En vista que la prueba 7 no fue efectiva al emplear agua como agente de limpieza, en la prueba ocho se realizaron laminaciones con las mismas condiciones anteriores pero utilizando detergente como agente limpiador, los resultados se los muestra en la tabla 20.

El detergente actuó de mejor manera en ésta prueba, sin embargo aún persisten las manchas.

TABLA 20.

Prueba 8 de ensayos de laminación con temperatura variable en la emulsión, lavado previo con detergente y emulsión nueva al 12%

Prueba #	*T.E. (ºC)	Tipo de lavado	Resultados.
8.1	30	Detergente	

8.2	35	Detergente	
8.3	40	Detergente	
8.4	45	Detergente	

*T.E.: Temperatura de la emulsión.

Ensayo variando las condiciones de enfriamiento de la emulsión, lavado previo con vapor y emulsión nueva al 12%

Como último método de limpieza en las probetas laminadas se procedió a realizar pruebas de laminación a temperatura ambiente de la emulsión (27ºC), 8 pases de reducción al 29% e igual velocidad de laminación, variando el número de pases de vapor sobre la superficie laminada como implementación de limpieza superficial.

La condición del vapor utilizada es vapor saturado, aplicado directamente sobre la placa laminada que con ayuda de una pistola

se simuló el rociado mediante aplicación manual a una velocidad constante de 15 cm/s, valor obtenido al medir la oscilación del brazo humano de izquierda a derecha sobre la probeta laminada.

Elementos necesarios para la prueba:

- Elemento generador de vapor saturado
- Rociador de vapor
- Probeta laminada con emulsión nueva.

Elemento generador de vapor saturado.- Se adaptó un recipiente a presión, para obtener vapor, y un rociador de tal manera que la mayor parte de vapor obtenido se concentre en un chorro que cubra el área de la sección transversal de las probetas laminadas. En la figura 2.2 se puede apreciar el conjunto del recipiente de presión, manguera, manómetro y pistola para la respectiva aplicación de vapor.

Figura 2.2. Conjunto: recipiente de presión, manguera, manómetro y pistola.

Rociador de vapor.- Con la ayuda de una pistola de aire, que se la alimentó con vapor para convertirla en el rociador, se aplica de forma continua el vapor a lo largo de la superficie de la probeta como se aprecia en la figura 2.3. El número de pases de vapor elegidos para el ensayo se lo aplicó a cada lado de la probeta.

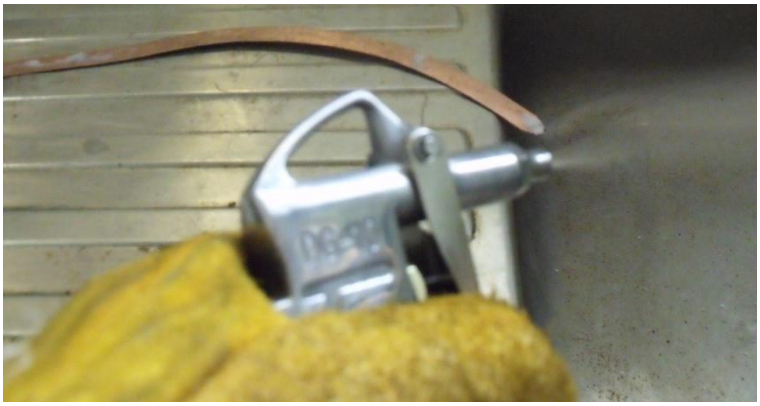


Figura 2.3. Aplicación del vapor mediante rociador.

Probeta laminada con emulsión nueva.- Para este último ensayo se realizaron laminaciones con emulsión nueva preparada al 12% de aceite Lubricool y agua destilada, ocho pases al 29% de reducción y una vez aplicado el vapor al finalizar la laminación se procedió a colocarlas en la estufa a 200 ºC por 20 minutos para el respectivo recocido. Los resultados de los ensayos se los presentan en la tabla 21.

TABLA 21.

Prueba 9 de ensayos de laminación con emulsión nueva al 12%, temperatura de emulsión a 27 ºC y lavados con vapor

Prueba #	# pases de vapor	Tipo de lavado	Resultados.
9.1	2	Vapor	
9.2	4	Vapor	

9.3	6	Vapor	
9.4	8	Vapor	

De los resultados obtenidos en la tabla 21, se aprecia que a mayor numero de pases de vapor en la limpieza, la apariencia superficial mejora. A continuación se muestran de forma más detallada los resultados de la prueba 7.

Para la prueba 9.1, la figura 2.4 muestra las condiciones finales de la superficie en la cual se puede apreciar claramente el aspecto tornasol dejado por el aceite de la emulsión a falta de su remoción.

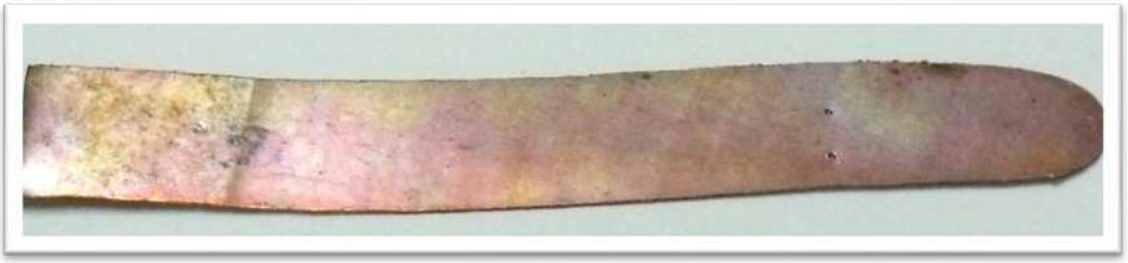


Figura 2.4. Prueba 9.1, limpieza de la lámina de cobre con dos pases de vapor.

En la prueba 9.2 el aspecto tornasol de la superficie de la probeta laminada desapareció, sin embargo se aprecia franjas de color amarillas, por lo que cuatro pases de vapor no fueron suficientes, tal como se observa en la figura 2.5.

Figura 2.5. Prueba 9.2, limpieza de la lámina de cobre con cuatro pases de vapor.

La figura 2.6 muestra el resultado de la prueba 9.3 a la que se le aplicaron seis pases de vapor al término de la laminación, pero todavía se observa pequeños puntos de color amarillo por la presencia de la emulsión.

Figura 2.6. Prueba 9.3, limpieza de la lámina de cobre con seis pases de vapor.

En la prueba 9.4 con ocho pases de vapor se tiene buenos resultados con respecto al aspecto superficial de la probeta de cobre laminada luego del recocido, con lo que se asegura que el uso de vapor como método de limpieza es efectivo para la remoción de la emulsión. En figura 2.7 se puede apreciar de forma más clara estos resultados.

Figura 2.7. Prueba 9.4, limpieza de la lámina de cobre con ocho pases de vapor.

Cambios para mejoramiento

A partir de los resultados obtenidos en la prueba 9, se requiere cinco aspectos a mejorarse en el sistema:

1. **Controlar los parámetros de la emulsión de Lubricool para mantener la calidad.** Esto se logra al emplear aguas blandas

previamente tratadas y con parámetros antes estudiados dentro de rango, para ello es necesario reponer las resinas de los ablandadores que se dañaron por la elevada concentración de cloro en el agua, además de controlar la dosificación de éste último elemento en pozo fuente. La concentración de la emulsión debe mantenerse en 12% de Lubricool de manera que el monitoreo de la concentración mediante el refractómetro es necesario por lo menos 2 veces al día. La temperatura en la emulsión según el fabricante recomienda mantenerla entre 35 y 45 ºC, sin embargo según las pruebas experimentales se tienen buenos resultados con temperaturas menores a los 40ºC.

2. **Mejorar el sistema de enfriamiento para la emulsión de Lubricool.** El estudio de la eficiencia del intercambiador de calor proporcionará los datos para evaluar la posibilidad de adquirir un nuevo intercambiador con mayor capacidad ó es posible que el intercambiador sí esté en capacidad de mantener la emulsión de Lubricool entre 35 y 45ºC y que por falta de limpieza el equipo no éste operando normalmente. Este estudio es evaluado más adelante en el capítulo 3.

3. **Implementación de una cámara de limpieza.** El o los rociadores de vapor pueden ser montados en la cámara de ventilación que posee la máquina previo al recocido en donde el alambre pasa por la periferia de dos tambores de 30 cm de diámetro, separados 0,5 metros, de manera que el cable se tarda aproximadamente 1 segundo en salir de la cámara cuando la velocidad es de 15 metros por segundo.

4. **Controlar los parámetros de la emulsión de Q. A. 4H para mantener la calidad.** Se deben tomar las mismas consideraciones que en el primer aspecto en lo referente al agua de proceso y monitorear las concentraciones de aceite, que en este caso el fabricante recomienda al 2%. La temperatura de la emulsión debe mantenerse entre 35 y 45ºC.

5. **Mejorar el sistema de enfriamiento para la emulsión de Lubricool.** Al igual que el aspecto # 2, es necesario realizar un estudio de eficiencia del intercambiador, el mismo que se realiza en el capítulo 3.

A continuación se identifican estos aspectos en el diagrama de proceso de la figura 2.8.

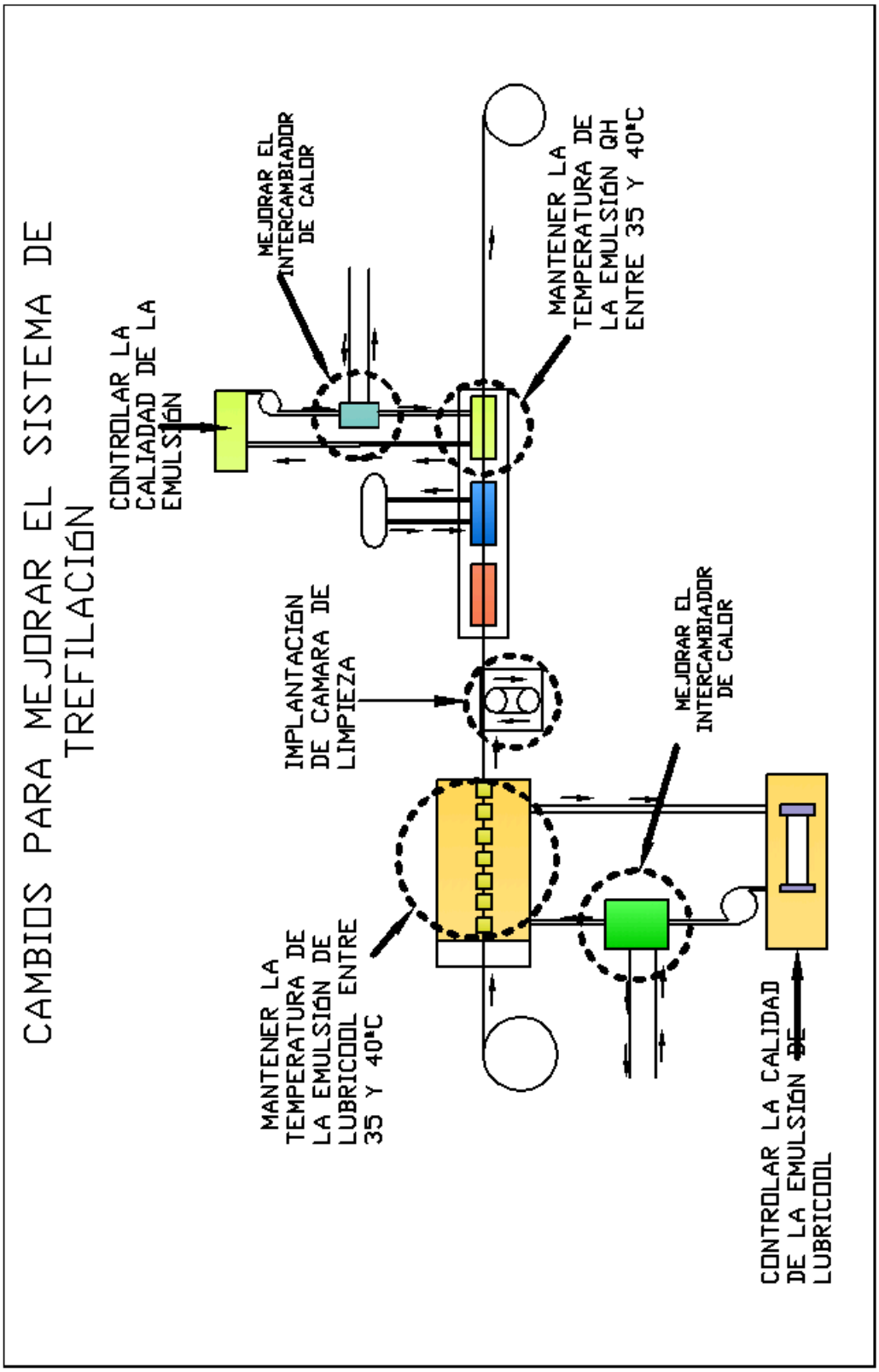


Figura 2.8. Cambios para mejorar el sistema.

CAPÍTULO 3

3. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA MEJORA DEL SISTEMA

3.1 Costos por readecuación de intercambiadores de calor.

Para evaluar los costos, es necesario evaluar y certificar que los intercambiadores de calor de las emulsiones posean el diseño adecuado, de lo contrario se diseñará y calculará uno que garantice el funcionamiento del sistema de enfriamiento dentro de rangos de temperatura recomendados. Los intercambiadores de calor son dispositivos en los cuales se da un intercambio de calor entre dos fluidos que están a diferentes temperaturas, para este caso el fluido caliente lo proporciona el sistema de trefilación a través de las emulsiones de Lubricool y Q.A., y el fluido frio lo da el sistema de enfriamiento mediante el agua. Muchas veces los intercambiadores de calor están diseñados de acuerdo a la temperatura ambiente en la que van a operar, éste puede ser uno de los motivos por el cual no

sea eficaz la máquina MM85, ya que las temperaturas ambientes en la ciudad oscilan entre 27 y 30ºC, y probablemente esta máquina está diseñada para operar en ambientes fríos, lo que ocasiona su deficiencia. Las incrustaciones en los tubos y coraza es otro de los principales factores que afectan la eficiencia de los intercambiadores de calor.

Evaluación del intercambiador de calor de la emulsión de Lubricool 22G.

De los datos obtenidos en la figura 1.5 se tiene que las temperaturas de entrada y salida del sistema de enfriamiento son 26 y 30 ºC respectivamente con un caudal de agua de 150 metros cúbicos por hora; las temperaturas de entrada y salida para la emulsión son de 48 y 40 ºC respectivamente con un flujo de 126,9 metros cúbicos por hora. El método de eficiencia NUT es recomendable para calcular la eficiencia en estas condiciones (6).

Antes de proceder a evaluar el intercambiador de calor se supondrá que la pérdida de calor a los alrededores, cambios de energía

cinética y potencial son insignificantes; además que las propiedades se mantienen constantes y que la emulsión tiene las mismas propiedades del agua.

Los datos para la evaluación del sistema de enfriamiento y de la emulsión de Lubricool 22G se encuentran en la tabla 22. En base a la referencia (6) se procedió a determinar las eficiencias como sigue:

TABLA 22.

Datos del sistema de enfriamiento y emulsión de Lubricool 22G

Sistema de enfriamiento			Emulsión de Lubricool 22G		
Tc,i (ºC)	Tc,o (ºC)	Caudal c(m3/h)	Th,i (ºC)	Th,o (ºC)	Caudal h(m3/h)
26	30	150	48	40	129,6

Temperatura media	ºC	ºK
Tmed, c=	28	301
Tmed, h=	44	317

$\dot{m}_c =$ 41,67Kg/s

$\dot{m}_h =$ 36,00Kg/s

Donde:

- $\dot{m}_c$ es el caudal de agua fría (del sistema de enfriamiento).
- $\dot{m}_h$ es el caudal de la emulsión de Lubricool 22G.

A partir de la temperaturas medias se determina la capacidad calorífica Cp,c del agua y la capacidad Cp,h de la emulsión:

Cp,c = 4179 J/(kg.ºK)
Cp,h = 4179,5 J/(kg.ºK)

A continuación se determina las capacitancias térmicas para la emulsión y el agua.

$$C_c = \dot{m}_c C_{p,c} =$$ 174125,0 W/ºK

$$C_h = \dot{m}_h C_{p,h} =$$ 150462,0 W/ºK

Entre Cc y Ch se selecciona el Ch como capacitancia mínima, Cmím. El siguiente paso es determinar la transferencia de calor máxima que se pueda dar aplicando la siguiente fórmula:

$$q_{máx} = C_{mín}(T_{h,i} - T_{c,i}) =$$ 3308976 W

Donde la transferencia real de calor es:

$$q = \dot{m}_c C_{p,c}(T_{c,o} - T_{c,i}) = \quad 696500 \text{ W}$$

Entonces la eficiencia del intercambiador de calor, ε, está dado por la diferencia entre la transferencia real de calor y la transferencia de calor máxima posible:

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{máx}} = \quad 0{,}210580205 = \quad 21{,}05 \ \%$$

Al tener una eficiencia baja de 21,05% abría la posibilidad que el intercambiador este sumamente incrustado. Se volverá nuevamente a calcular le eficiencia, pero con los valores de temperatura nominales tal como se presenta en la tabla 23; se escogieron rangos de temperatura entre 30 y 35ºC, como temperaturas de trabajo de la emulsión, por los buenos resultados presentados durante las pruebas de laminación de la sección 2.

TABLA 23.

Condiciones recomendadas para emulsión de Lubricool

Sistema de enfriamiento			Emulsión Lubricool 22 G		
Tc,i (ºC)	Tc,o (ºC)	Caudal c(m3/h)	Th,i (ºC)	Th,o (ºC)	Caudal h(m3/h)
26	30	150	34	30	129,6

Con las mismas condiciones planteadas en los cálculos anteriores se tiene que el caudal no varía y que las capacidades caloríficas son:

Cp,c = 4179 J/(kg.ºK)
cp,h = 4178 J/(kg.ºK)

$$C_c = \dot{m}_c C_{p,c} =$$ 174125,0 W/ºK

$$C_h = \dot{m}_h C_{p,h} =$$ 150408,0 W/ºK

Donde Cmín = Ch, entonces:

$$q_{máx} = C_{mín}(T_{h,i} - T_{c,i}) =$$ 1203264 W

La transferencia real de calor es:

$$q_c = \dot{m}_c C_{p,c}(T_{c,o} - T_{c,i}) = \quad 696500 \text{ W}$$

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{máx}} = \quad 0{,}578816 \quad 57{,}88\%$$

La eficiencia obtenida es del 57,88%. Al calcular la transferencia de calor del lado de la emulsión se tiene:

$$q_h = \dot{m}_h C_{p,h}(T_{h,i} - T_{h,o}) = \quad 601632\text{W}$$

Al comparar los resultados se tiene que q_c es mayor a q_h, con lo que se asegura que el intercambiador posee las condiciones necesarias para mantener la emulsión entre 30 y 35ºC. Las incrustaciones en el intercambiador de calor sin duda ocasionan pérdidas de la eficiencia.

Evaluación del intercambiador de calor de la emulsión de Q. A. 4HI

De manera similar como se evaluó la eficiencia en el intercambiador de la emulsión de Lubricool, se mencionarán los datos para la emulsión presentados en la tabla 24, seguido de los resultados.

TABLA 24.

Datos del sistema de enfriamiento y emulsión de Q. A. 4HI

Sistema de enfriamiento			Emulsión Q.A.		
Tc,i (ºC)	Tc,o (ºC)	Caudal c(m3/h)	Th,i (ºC)	Th,o (ºC)	Caudal h(m3/h)
26	30	120	46	42	54

La transferencia máxima de calor posible ($q_{máx}$) resultó de 1253850 W, con una eficiencia, ε, del 44,44%. Nuevamente se evaluará la eficiencia del intercambiador a condiciones de operaciones recomendadas para analizarlo.

En la tabla 25 se muestran los datos a condiciones de trabajo recomendadas para efectuar el análisis de la eficiencia. El fabricante

del aceite recomienda una temperatura máxima de trabajo de 45ºC, es por esto que para este análisis se debe seleccionar un rango entre 30 y 35ºC.

TABLA 25.

Condiciones recomendadas para emulsión de Q. A. 4HI

Sistema de enfriamiento			Emulsión Q.A. 4 HI		
Tc,i (ºC)	Tc,o (ºC)	Caudal c(m3/h)	Th,i (ºC)	Th,o (ºC)	Caudal h(m3/h)
26	30	120	35	30	54

Al realizar los cálculos pertinentes con las mismas condiciones de los casos anteriores, se obtuvo una eficiencia, ε, del 98,75 % con un $q_{máx}$ de 564232 W.

Al evaluar el q_c y q_h se tuvo 557200 W y 313462 W respectivamente, con lo que se constata que el intercambiador está en capacidad de mantener la emulsión entre 30 y 35ºC, y que las malas condiciones de operación se dan por las incrustaciones.

Costos por readecuación de intercambiadores de calor.

Los intercambiadores de calor y el sistema de enfriamiento en general, requieren de una limpieza interna para recobrar sus condiciones iniciales de funcionamiento. La limpieza mecánica no es aplicable debido a la hermeticidad de los intercambiadores de calor, por lo que la limpieza química es la más recomendada. Los intercambiadores de calor son de acero inoxidable debido a esto soportan ácidos como agentes de limpieza. A continuación se presenta en la tabla 26 los costos por las limpiezas en los intercambiadores.

TABLA 26.

Costos por limpieza química de los intercambiadores de calor

Equipo	Tipo de limpieza	Agente Limpiador	Costo (USD)
Intercambiador de calor de emulsión de Lubricool	Química	Ácido sulfámico	350
Intercambiador de calor de emulsión de Q. A.	Química	Ácido sulfámico	250
Limpieza de líneas y torre de enfriamiento.	Química	Limpoxi	890
TOTAL			1490

Es conveniente realizar las limpiezas de los intercambiadores de calor por separado, ya que al estar fabricados de acero inoxidable permiten el uso de químicos más agresivos que no soportan las líneas del sistema de enfriamiento de acero al carbón.

3.2 Costos por readecuación de sistemas de tratamientos de agua.

Las mejoras en el sistema de tratamiento de agua deben empezar con el agua de suministro, para luego mejorar los sistemas de ablandamiento, osmosis y de suministro a sistemas de enfriamiento.

Agua de Pozo.- El agua que utiliza la empresa es de pozo, por lo que es de esperarse aguas duras, conductividad eléctrica y sulfitos elevados, típico en este tipo de afluentes; la implantación de un filtro en el fondo del pozo mejoraría la calidad de agua, de lo contrario se debe obtener el suministro de agua potable. El costo por la colocación de un filtro en el pozo es de 450 USD, el mismo que puede ser removido cuando se sature.

Sistemas de Ablandamiento.- El sistema de Ablandamiento con el que cuenta la empresa fue adquirido hace cuatro años, estos equipos tienen una vida útil entre siete y diez años, las resinas que poseen

estos dispositivos se rompen ante la presencia de elevadas concentraciones de cloro en el agua. En la tabla 27 se muestran los costos por reposición de las resinas en los ablandadores.

TABLA 27.

Costos por reposición de resinas en ablandadores de agua de proceso

Equipo	Tipo de resina	Cantidad (pies cúbicos)	Costo (USD)
Ablandador # 1	Resina de intercambio iónico básica	6	1710
Ablandador # 2	Resina de intercambio iónico básica	6	1710
Total			3420

Normalmente se utilizan dos equipos de ablandamiento debido a que luego de cierto tiempo las resinas se saturan y es necesario regenerarlas, así cuando una de ellas entra a regenerarse, la otra está en funcionamiento, proporcionando un servicio continuo de agua ablandada.

Sistema de osmosis.- El sistema de osmosis de la empresa cuenta con cartuchos de reposición para el sistema, los cuales están

valorados en 650 USD. El exceso de sales y cloro en el agua degradan rápidamente los cartuchos; con el control de los parámetros del agua se espera alargar estos cambios en el equipo.

Suministro de agua a sistemas de enfriamiento.- El agua empleada para el suministro y reposición en la torre de enfriamiento no cuenta con un sistema de ablandamiento propio, utiliza agua de un reservorio que es recirculada por los ablandadores y que se encuentra mezclada con el agua de pozo. En la tabla 28 se encuentra el costo de un ablandador de capacidad de 6 metros cúbicos por hora.

TABLA 28.

Costo de ablandador para agua de enfriamiento

Equipo	Tipo de resina	Cantidad (pies cúbicos)	Costo (USD)
Ablandador con sistema automático de regeneración.	Resina de intercambio iónico básica	3	2650
Accesorios e Instalación	--	--	245
Total			2895

3.3 Costos por control de calidad de los fluidos empleados en el sistema.

Los fluidos que requieren control, para garantizar que el producto final quede libre de defectos, son:

- Aguas de proceso y de enfriamiento.
- Emulsión de Lubricool y Q.A.

Aguas de proceso.- El control de las aguas de proceso deben ser realizadas todos los días. Los parámetros básicos que deben efectuarse en el pozo, ablandadores y Osmosis son: el pH, la dureza, la conductividad eléctrica y los sólidos totales.

Con la implementación del filtro y el control en la dosificación del cloro en el pozo, los análisis establecidos deben efectuarse al menos una vez por semana, de igual manera para los ablandadores y osmosis. El registro de estos parámetros servirá para tener una estadística y poder tomar acciones ante cualquier desviación.

Los costos referenciales por los servicios de los distintos parámetros a efectuarse se los muestra en la tabla 29, en donde no todos los

parámetros son necesarios, puesto que por ejemplo al analizar el cloro en la fuente ya no es necesario volverlo analizar en las siguientes etapas.

TABLA 29.

Costos para control de aguas de proceso por semana

Análisis	Tipo Análisis	Pozo (USD)	Ablandador de proceso (USD)	Osmosis (USD)	Ablandador de torre (USD)
pH	Electroquímico	1,75	1,75	1,75	1.75
Dureza	Titulación	6	6	6	6
Conductividad Eléctrica	Electroquímico	2	2	2	2
Sólidos Totales	Gravimétrico	--	8	8	8
Cloruros	Titulación	6	--	--	--
Total		15,75	17,75	17,75	17,75

El costo por los análisis de agua semanales suman 69 USD, teniéndose entonces que el monto por un año es de 3588 USD. Otra vía para realizar el control de las aguas, es adquirir equipos propios y juegos de reactivos para que una persona con capacitación previa pueda realizar los análisis y de ésta manera poder aprovechar el recurso para incrementar las frecuencias de muestreo.

Emulsión de Lubricool y Q.A.- Las mediciones de la concentración de aceite en la emulsión son realizadas dentro de la empresa por lo que no generan gastos, pero deben efectuarse al menos dos veces por día debido a que la evaporación en el proceso cambia la concentración. La medición del pH debe efectuarse diariamente con tirillas indicadoras de pH debido a que es una parte crítica del proceso y cualquier alteración se vería afectada en el producto final. Con la finalidad de verificar la fiabilidad del refractómetro utilizado para medir las concentraciones de la emulsión, se deben realizar análisis externos de al menos una vez por mes. Los costos referenciales generados para el control de las emulsiones se los presenta en la tabla 30.

TABLA 30.

Costos para control de emulsiones por mes

TABLA 30. Costos para control de emulsiones por mes.			
Análisis	Tipo Análisis	# de determinaciones por mes	Costo (USD)
pH	Colorimétrico	120 (60 por emulsión)	23,84
Concentración de aceite	Extracción/ Infrarrojo	1	35
Total			58,84

El monto del costo por año para el control de las emulsiones asciende a 706,08 USD.

Monto total de adecuaciones.

En resumen los gastos considerados como una inversión para la readecuación de los equipos, se los muestra en la tabla 31, cuya vida útil para estas reposiciones es de 7 años, llegando a un monto total de 6315 USD.

TABLA 31.

Costos de inversión en equipos

Adecuación	Vida útil (años)	Costo (USD)
Costos por reposición de resinas en ablandadores de agua de proceso	7	3420
Costo de ablandador para agua de enfriamiento	7	2895
TOTAL		**6315**

El costo total anual para mejoras en el sistema de trefilación de alambre de cobre se lo presenta en la tabla 32, cuyas actividades

que representan estos gastos deberán ser efectuadas anualmente para garantizar un producto final de calidad.

TABLA 32.

Costos anuales para mejoras

Adecuación	Frecuencia de inversión	Costo (USD)
Costos por readecuación de intercambiadores de calor y sistema de enfriamiento	Anual	1490
Adecuación de pozo	Anual	450
Costos para control de aguas de proceso	Anual	3588
Costos para control de emulsiones	Anual	706.08
TOTAL		**6234.08**

La inversión inicial serán los costos anuales por mejoras, más los costos de inversión en equipos; lo que asciende a 12549.08 USD. Para los siguientes seis años el costo anual corresponde a 6234.08 USD.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

Del estudio experimental realizado, el mejoramiento de la calidad del sistema de producción de alambres de cobre es posible implantando un nuevo esquema de producción en planta, que se define con las siguientes conclusiones:

1. La eliminación del aceite residual del alambre antes de pasar por la etapa de recocido aseguran un producto final libre de manchas, por lo que la adecuación de una etapa de lavado es necesaria.

2. La aplicación de métodos experimentales de laboratorio como la laminación de cobre para simular el proceso de trefilación permitió

reproducir de manera exitosa la no conformidad en el aspecto superficial del alambre y determinar las condiciones adecuadas de trabajo.

3. De acuerdo a las pruebas realizadas al trabajar con temperaturas menores a 40ºC en la emulsión debe tener concentraciones entre el 10 y 12% de Lubricool y con agua ablandada, desarrolla las condiciones de óptimas de operación de trefilación y calidad final del alambre trefilado.

4. Para retomar las condiciones normales de operación del sistema de trefilación de alambre hay que restablecer la efectividad de los ablandadores, el monto de la inversión asciende aproximadamente al 50 % de la inversión inicial. Debe también considerarse otra inversión para mejorar el control de fluidos y el mantenimiento de equipos.

RECOMENDACIONES

En base a las conclusiones del presente trabajo y teniendo en cuenta los conceptos de “La mejora continua” que establecen las normas ISO 9001 se dan las siguientes recomendaciones.

1. Incorporar sistemas de monitoreo en cada etapa del proceso que permitan tener datos en tiempo real de las temperaturas de las emulsiones, del sistema de enfriamiento y las condiciones del vapor.

2. Definir indicadores para los parámetros del sistema y automatizar completamente el proceso de trefilación del alambre de cobre.

BIBLIOGRAFÍA.

1. Cuevas Streeter Alejandro; “Procesos de manufactura”, Control # 2; Universidad de Chile, 2008.

2. http://www.avestapolarit.com/files/Outokumpu_ES.pdf

3. http://www.monografias.com/trabajos6/sipro/sipro.shtml#intro

4. http://www.textoscientificos.com/quimica/dureza-ablandamiento-agua

5. http://www.lenntech.es/aplicaciones/ultrapura/conductividad/conductividad-agua.htm

6. Incropera Frank P., De Witt David P.; Fundamentos de Transferencia de calor, PRENTICE HALL HIPANOAMERICANA, S. A., 4ª edición, México 1999.

7. MIKELL P. GROOVER; “FUNDAMENTOS DE MANUFACTURA MODERNA”; PRENTICE-HALL HISPANOAMERICANA, S.A., 1997.

8. Philip Siegmann; “DESARROLLO DE UN PROTOTIPO INDUSTRIAL PARA LA DETECCIÓN EN LÍNEA DE PRODUCCIÓN DE DEFECTOS EN SUPERFICIE DE HILOS METÁLICOS FINOS”; MEMORIA PRESENTADA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR de la Universidad Complutense de Madrid, 2002.