

1.- Introducción.

Para la fabricación de cables conductores de electricidad normalmente se utilizan 2 materiales, el cobre y el aluminio, el cobre es muy buen conductor de electricidad ya que tiene aproximadamente 100 IACS (conductividad eléctrica). En la fabricación de alambres para cables eléctricos el aluminio es uno de los materiales que más se ha estado utilizando debido a que su densidad es casi 1/3 de la densidad de la del cobre, esta ventaja es muy marcada aún y que la conductividad eléctrica es de 61 IACS, se utiliza un aluminio con una pureza electrolítica del 99.5 %, la aleación de aluminio es denominada 1350. Los alambres se fabrican mediante el proceso de formado llamado trefilado en frío el cual consiste básicamente en pasar un alambrón por una serie de dados la cual hace decrecer el diámetro del alambrón en varios pasos hasta llegar al diámetro deseado. Al pasar el alambrón por la serie de dados el aluminio cambia sus propiedades mecánicas, llegando a tener al final del proceso un % de elongación y un esfuerzo de ruptura los cuales están especificados para cada diámetro de alambre.

El alambrón que se utiliza como materia prima para obtener los alambres es un alambrón redondo normalmente de 3/8" de diámetro y con un temple determinado. Últimamente se ha tenido el problema de que con un alambrón de aluminio que se llamará "Lote B" no se obtienen las propiedades mecánicas deseadas después del proceso de trefilado, siendo que con el alambrón de otro lote que se llamará "Lote A" se cumplen perfectamente. Esto aún y que los dos lotes parecen tener las mismas condiciones mecánicas a la entrada del trefilado. Por eso el objetivo de este trabajo es determinar las causas del porque los dos alambres de los diferentes lotes se comportan de diferente manera al ser sometidos a las mismas condiciones de trabajado en frío.

1.1 Hipótesis.

Al empezar el proceso de trefilado desde que el alambón entra en el primer dado el aluminio empieza a presentar cambios en su morfología y conforme pasa por más dados el esfuerzo del alambón convertido a alambre empieza a incrementarse y la elongación empieza a decrecer, teóricamente si el alambón de entrada tiene tamaño de grano más pequeño el alambre que se obtendrá será de un esfuerzo de ruptura mas elevado y elongación más baja.

La otra teoría es que si un alambón tiene mayor cantidad de obstáculos (impurezas) este tendrá mejores propiedades mecánicas que uno que tenga menos cantidad de impurezas.

1.2 Justificación.

Debido a que anualmente se procesan mas de 15,000 toneladas de alambón 1350 en una sola empresa fabricante de cables es necesario que esta cantidad de toneladas se suministren con la mejor calidad posible para evitar paros de producción por mala calidad de materia prima.

El determinar como se requiere el alambón de aluminio 1350 en cuanto a su composición química, morfología y propiedades mecánicas tendrá como resultado una nueva especificación de materia prima la cual no permitirá que el alambón de otros proveedores después de trefilado a alambres determinados no cumpla con el esfuerzo de ruptura provocando a la compañía paros de maquina, reprocesos, rechazos de calidad, etc.

2.- Trefilado.

2.1 Definición de trefilado de alambre.

El trefilado consiste básicamente en disminuir el diámetro del alambón ya sea con uno o una serie de dados los cuales van decreciendo en diámetro hasta lograr llegar al diámetro deseado.

El alambre se hace trefilando en frío alambón con uno o más dados similares al mostrado en la figura 1, para disminuir su tamaño e incrementar sus propiedades mecánicas.

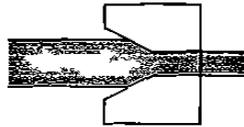


Figura 1 Dado de trefilado de alambre redondo.

Pueden usarse los procesos de estirado simple o el proceso de estirado continuo. En el proceso de estirado simple se coloca una espira sobre un carrete y se aguza el extremo del alambre para que entre en el dado. El extremo es agarrado con tenazas sobre un banco de estirado y arrastrado a través de tal longitud que puede enrollarse alrededor de un bloque de estirado. Inmediatamente después, la rotación del bloque de estirado arrastra el alambre a través del dado y lo convierte en una bobina, esta operación se repite con dados y bloques mas pequeños hasta que el alambre se estira a su tamaño final.

En el estirado continuo el alambre se alimenta a través de varios dados y bloques de estirado arreglados en serie.

Esto permite estirar la máxima cantidad en una operación. El número de dados en la serie puede variar según el diámetro final requerido, el tipo de máquina y el material a trefilar. Los dados generalmente son de carburo de tungsteno, aunque pueden usarse también dados de diamante (1).

2.2 Trabajo en frío.

La figura 2 (a) muestra una curva de esfuerzo deformación. Mientras el esfuerzo no excede el valor de fluencia σ_y no se presenta deformación plástica permanente y desaparece la deformación elástica. Esta es la condición que se pretende mantener después de que una pieza acabada sea puesta en operación. Sin embargo, cuando se desea producir una pieza mediante un proceso de deformación, el esfuerzo aplicado debe sobrepasar el esfuerzo de fluencia para que el metal se deforme permanentemente en una forma útil.

Si se aplica un esfuerzo σ_1 que sea mayor que el esfuerzo de fluencia Figura 2 (a) se provocara una deformación permanente ϵ_1 , que queda aun cuando se elimine el esfuerzo. Si se obtiene una muestra del metal al que se le ha aplicado el σ_1 y se vuelve a deformar el metal, obtendríamos una curva esfuerzo-deformación diferente Figura 2 (b). La nueva muestra o probeta tendrá un esfuerzo de fluencia y asimismo, una mayor resistencia a la tensión y una menor ductilidad. Si se continua aplicando un esfuerzo hasta alcanzar un esfuerzo σ_2 , eliminando luego el esfuerzo aplicado y volviendo a deformar el metal, el nuevo esfuerzo de fluencia sería σ_2 . cada vez que se aplica un esfuerzo mayor al metal se incrementa el esfuerzo de fluencia y la resistencia a la tensión, mientras que disminuye la ductilidad.

Se podría incrementar la resistencia del metal hasta que los esfuerzos de fluencia, de tensión máxima y de ruptura fueran iguales y no hubiera ductilidad figura 2 (c). En este caso el metal ya no podrá ser deformado plásticamente.

Aplicando un esfuerzo que sobrepase el esfuerzo de fluencia original del metal, es posible endurecerlo por deformación o trabajo en frío haciendo que adquiera una forma más útil.

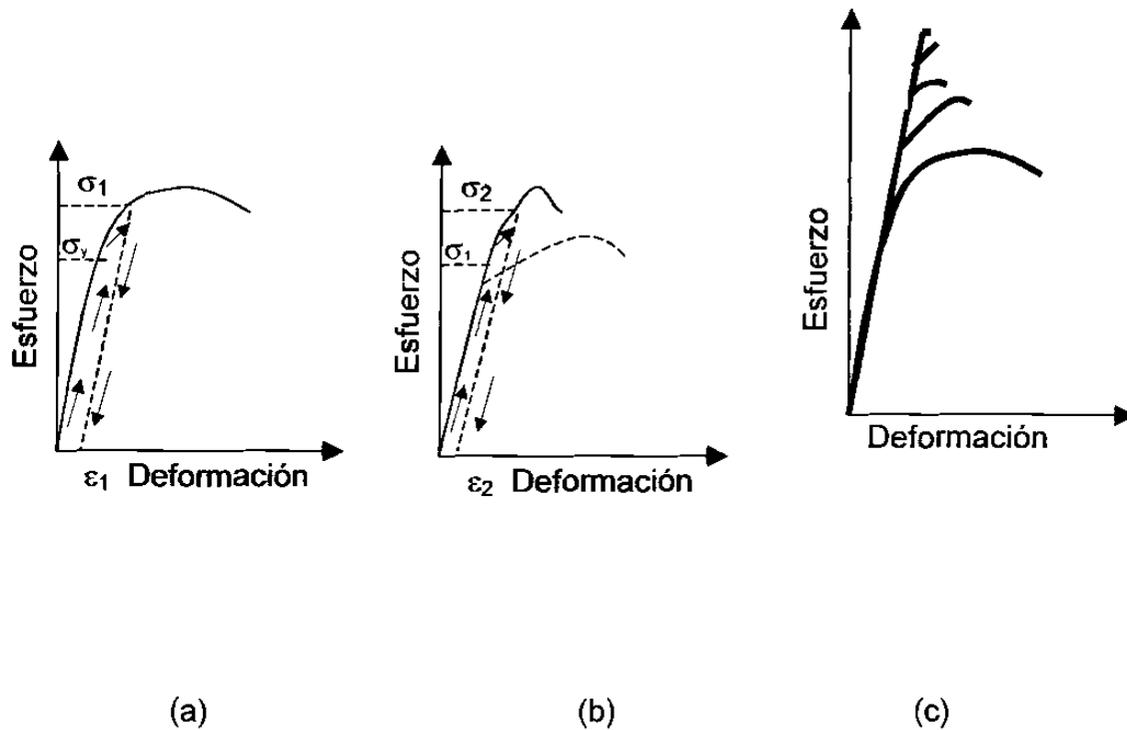


Figura 2 Endurecimiento por deformación a partir del diagrama esfuerzo deformación.

2.3 Coeficiente de endurecimiento por deformación.

La respuesta del metal al trabajo en frío está dada por el coeficiente de endurecimiento por deformación “ n ”, que es la pendiente de la porción plástica esfuerzo real-deformación real de la figura 3, cuando utiliza una escala logarítmica.

$$\sigma_t = K \varepsilon_t^n \quad [1]$$

Donde

σ_t es el esfuerzo real

K es igual al esfuerzo cuando $\varepsilon_t = 1$

ε_t es la deformación real

o bien,

$$\log \sigma_t = \log K + n \log \varepsilon_t \quad [2]$$

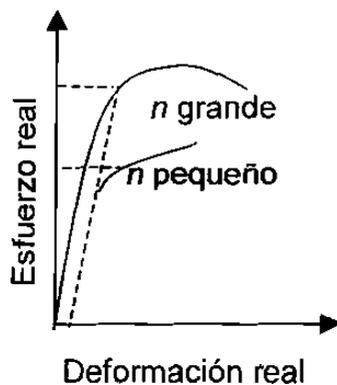


Figura 3 Gráficos reales esfuerzo-deformación para metales con coeficiente de endurecimiento por deformación altos y bajos.

El coeficiente de endurecimiento por deformación es relativamente bajo para los metales HC (hexagonal compacto), pero alto para los CC (centrado en el cuerpo), y a particularmente lo es para los CCC (cúbica centrada en las caras) como se muestra en la Tabla 1. (Los metales con un bajo coeficiente de endurecimiento por deformación tienen una respuesta pobre al trabajo en frío (3).)

Tabla 1 coeficiente de endurecimiento por deformación de metales y aleaciones típicas (2).

Metal	Estructura cristalina	n	K (psi)
Titanio	HC	0.05	175,000
Acero de aleación recocido.	CC	0.15	93,000
Acero de mediano carbono templado y revenido.	CC	0.10	228,000
Aluminio puro	CCC	0.105	24,000
Molibdeno.	CC	0.13	105,000
Cobre	CCC	0.54	46,000
Cu-30% Zn	CCC	0.54	130,000
Acero inoxidable austenítico	CCC	0.52	220,000

2.4 Multiplicación de las dislocaciones.

El incremento en la resistencia durante la deformación se obtiene incrementando el número de dislocaciones en el metal. Antes de la deformación un metal contiene aproximadamente 10^6 (en la mayoría de los metales) cm de líneas de dislocaciones por cada centímetro cúbico de metal, este es un número relativamente bajo de dislocaciones.

Cuando se aplica un esfuerzo superior al esfuerzo de fluencia, las dislocaciones empiezan a deslizarse. A veces una dislocación que se mueve en su plano de deslizamiento encuentra obstáculos que sujetan los extremos de la línea de dislocación. Cuando se continúa aplicando el esfuerzo, la dislocación trata de moverse arqueándose por el centro. La dislocación puede moverse hasta que se produce un rizo (figura 4). Cuando el rizo de dislocación se toca finalmente a sí mismo, se crea una nueva dislocación, la dislocación original aun está sujeta y puede originar otros rizos de dislocación, este mecanismo de generación de dislocaciones es conocido como fuente de Frank-Read.

El número de dislocaciones puede incrementarse a aproximadamente 10^{12} cm de líneas de dislocaciones por centímetro cúbico de metal. Se sabe que cuanto más dislocaciones existan, tanto más fácilmente interfieren unas con otras y el metal se hace más resistente.

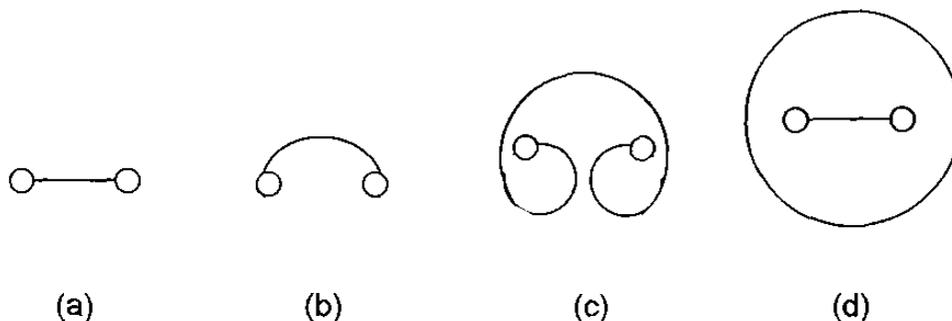


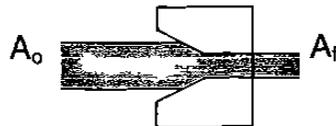
Figura 4 Generación de dislocaciones por la fuente de Frank-Read. (a) Una dislocación está sujeta en sus extremos por defectos de red. (b) Cuando la dislocación continúa moviéndose, se arquea y llega a doblarse sobre sí misma. (c), se forma un rizo de dislocación (d) y finalmente se crea una nueva dislocación (2).

2.5 Propiedades contra porcentaje de trabajo en frío.

Se usan muchas técnicas para conformar y endurecer simultáneamente un metal por trabajo en frío, en la figura 5 se muestra el trefilado. Controlando la cantidad de deformación aplicada mediante un proceso de formado, se regula la cantidad de endurecimiento por deformación. Normalmente, medimos la cantidad de deformación definiendo el Porcentaje de trabajo en frío.

$$\text{Porcentaje de trabajo en frío} = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100 \quad [3]$$

Donde A_0 es el área transversal de sección transversal y A_f es el área final de la sección transversal después de la deformación.



La figura 5 Reducción de área mediante trefilado.

El efecto del trabajo en frío en las propiedades mecánicas del cobre puro comercial se presenta en la figura 6. Cuando se incrementa el trabajo en frío, tanto el esfuerzo de fluencia como la resistencia a la tensión se incrementarán; sin embargo, la ductilidad disminuye y tiende a cero. El metal se romperá si se intenta proporcionar mayor trabajo en frío. Por esto, existe una cantidad máxima de trabajo en frío o deformación que se puede aplicar a un metal.

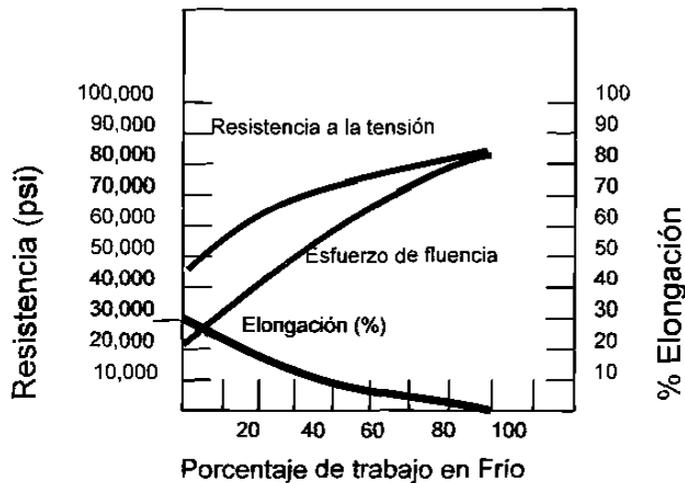


Figura 6 Efecto del trabajo en frío sobre las propiedades mecánicas del cobre.

Las relaciones entre el trabajo en frío y las propiedades mecánicas se utilizan de muchas maneras.

2.5.1 Determinación de las propiedades después de la deformación.

Es posible predecir las propiedades de un metal si conocemos la cantidad de trabajo en frío que se alcanzó. Entonces se decide si el componente tiene las propiedades adecuadas en los sitios críticos.

2.5.2 Determinación del trabajo en frío necesario.

Cuando se desea seleccionar el material para un componente que tiene ciertas propiedades mecánicas mínimas, se especifica la cantidad de trabajo en frío que debe aplicarse.

2.5.3 Diseño del proceso de deformación.

Se establecen las dimensiones originales del material, lo cual permite efectuar las combinaciones deseables de propiedades y dimensiones finales. Se calcula el porcentaje de trabajo en frío necesario y, usando las dimensiones finales deseadas, se calculan las dimensiones originales del metal mediante la ecuación de trabajo en frío (2).

2.5.4 Maquinabilidad.

La maquinabilidad se relaciona con la facilidad con la que puede maquinarse un material hasta obtener un buen acabado superficial con una vida útil razonable del dado de trefilado. Las tasas de producción se ven afectadas de manera directa por la maquinabilidad. Es difícil definir propiedades susceptibles de ser cuantificadas en relación a la maquinabilidad, por tanto esta se reporta, por lo general, en términos comparativos, al desempeño o rendimiento o desempeño de un material particular tomado como estándar (10).

2.5.5 Teoría sobre la falla o ruptura.

Se han propuesto varias teorías sobre las fallas, con el objeto de predecir, con arreglo al comportamiento del material en los ensayos de tensión, las condiciones en las que se producirá la ruptura bajo cualquier tipo de cargas combinadas, por ruptura se entiende aquí la falla del material, tanto por ruptura real como por fluencia, según sea el efecto que ocurra antes. No se considera la falla por una desarticulación local de la estructura o por falla de estabilidad elástica.

2.5.6 Teoría del esfuerzo máximo

Propuesta por Rankine, se basa en la hipótesis de que la falla tiene lugar cuando el mayor de los esfuerzos principales alcanza un valor límite, que puede ser el punto de fluencia determinado en un ensayo de tensión simple, o el esfuerzo último si el material es frágil. (11)

2.6 Microestructura de los metales trabajados en frío.

Durante la deformación se produce una estructura fibrosa conforme los granos dentro del material se alargan. Durante la deformación, los granos giran alargándose también, causando que algunas direcciones y planos cristalográficos se alineen. En consecuencia, se desarrollan orientaciones preferenciales o texturas. Este efecto produce un comportamiento anisotrópico.

En procesos como el trefilado, se produce una textura de fibra. En los metales CC, las direcciones $\langle 110 \rangle$ se alinean en el eje del alambre. En los metales CCC se alinean en las direcciones $\langle 111 \rangle$ o bien $\langle 100 \rangle$. Afortunadamente estas proporcionan la mayor resistencia a lo largo del eje del alambre, que es lo deseable.

Cualquier inclusión (partícula extrañas como óxidos) o grano de segunda fase que se encuentre presente en la estructura original, se alinea también durante la deformación las inclusiones blandas normalmente se deforman y se alargan; las inclusiones duras pueden no deformarse pero se alinean en la dirección de la deformación. Las inclusiones alargadas, llamadas sopladuras, actúan como pequeñas ralladuras internas y reducen las propiedades mecánicas del metal trabajado en frío.

Cuando la pieza es procesada mayormente o puesta en servicio, debe asegurarse que los altos esfuerzos de tracción no actúen sobre estas inclusiones agudas, causando nucleación de grietas (2).

2.7 Características del trabajo en frío.

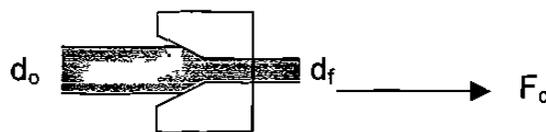
Hay cierto número de ventajas y de limitaciones del endurecimiento de un metal trabajado en frío o endurecido por deformación.

1. Se puede simultáneamente endurecer el metal mientras le damos la forma final deseada.
2. Se obtienen excelentes tolerancias dimensionales y acabados superficiales a través del proceso de trabajo en frío.
3. El proceso de trabajo en frío es un método de bajo costo para producir grandes cantidades de piezas pequeñas. Sin embargo, para piezas grandes la cantidad de trabajo en frío es limitada. Si se intenta mucha deformación el metal puede fallar durante el procesamiento. Además las fuerzas elevadas requieren de grandes y costosos equipos de conformado para sobrepasar el esfuerzo de fluencia en piezas grandes.
4. La ductilidad, la conductividad eléctrica y la resistencia a la corrosión se deterioran por el trabajo en frío. Sin embargo, el trabajo en frío reduce la conductividad eléctrica en menor grado que los demás procesos de endurecimiento, tales como el endurecimiento por solución sólida. Esto hace al trabajo en frío una manera más satisfactoria de endurecer materiales conductores, tales como los alambres usados para la transmisión de energía eléctrica.

5. Algunas técnicas de deformación pueden llevarse a cabo solo si se aplica el trabajo en frío. Por ejemplo, el trefilado del alambre requiere que una barra sea tirada a través de un dado para producir una menor sección transversal (figura 7). Para una fuerza dada de trefilado F_d , se produce una fuerza diferente en los alambres original y final. El esfuerzo del alambre inicial debe sobrepasar el esfuerzo de fluencia del metal para causar deformación, el esfuerzo del alambre final debe ser mayor que su esfuerzo de fluencia para prevenir una falla. Esto se lleva a cabo solo si la deformación del alambre se endurece durante el trefilado.

$$\text{Esfuerzo} = F_d / (\pi/4)(d_o^2) > \text{Esfuerzo de fluencia original}$$

$$\text{Esfuerzo} = F_d / (\pi/4)(d_f^2) > \text{Esfuerzo de fluencia final}$$



Dado

Figura 7 trefilado

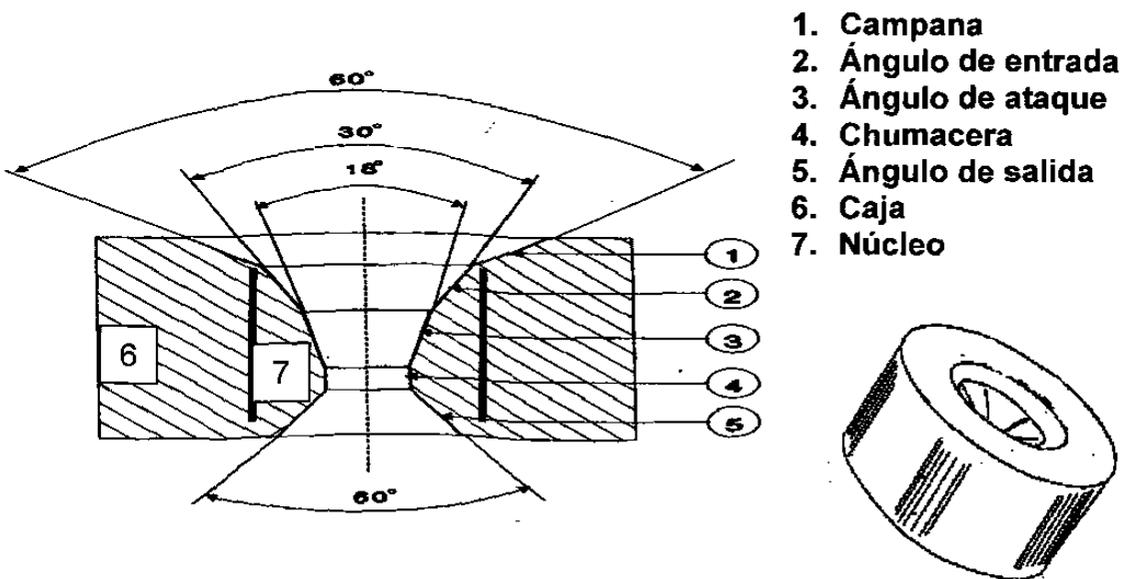
La figura 7 muestra el proceso de trefilado del metal. La fuerza F_d actúa tanto en el diámetro original como en el final, por lo que el esfuerzo producido en el alambre final es mayor que el del metal original.

Si el metal no se endureciera durante el trefilado, el alambre final se rompería antes de que el metal original fuera forzado a través del dado(2)

2.8 Dados de estirado.

El corazón de la operación de estirado es el material de deformación que toma lugar dentro del dado de estirado, por lo tanto, minimizar el trabajo hecho en el dado es extremadamente importante a fin de reducir la fuerza de estirado y proveer daños en el alambre. La carga de estirado se incrementa en relación al incremento en el área de reducción, y el área de reducción máxima permitida depende del material que se vaya a estirar.

Los dados de estirado normalmente para el proceso de estirado de alambre son de carburo de tungsteno o de diamante policristalino, estos dados tienen una geometría como la mostrada en la figura 8.



La figura 8 muestra las principales partes del dado de trefilado.

El ángulo de campana crea una presión hidrostática sobre la superficie del alambre haciendo que el lubricante fluya hacia adentro del dado.

El ángulo de aproximación es la sección en la cual ocurre la reducción de diámetro, este ángulo llamado α es una importante variable de proceso.

La función de la chumacera es permitir que la superficie dañada por el ángulo de aproximación sea refinada sin cambiar de diámetro el alambre.

El ángulo de salida permite que el metal se expanda ligeramente conforme el material deja el dado, este también minimiza la posibilidad de abrasión si el alambre se detiene o si el dado está fuera de alineación.(4)

2.8.2 Definición de las partes del dado de estirado

Caja: generalmente es de acero y es la parte que contiene el núcleo ya sea de carburo de tungsteno, compax o diamante.

Núcleo: es la parte del dado que realiza el trabajo de reducción, este núcleo debe reunir una serie de características en su geometría.(4)

2.8.2.1 Geometría del dado de estirado (Partes principales)

- *Campana:* ángulo de 60° que sirve para que entre la mayor lubricación posible en el dado.
- *Ángulo de entrada:* ángulo de 30° que sirve de guía del alambre para dirigirlo al siguiente ángulo a la vez que acentúa la lubricación.
- *Ángulo de ataque o reducción:* ángulo de 18° con $\pm 2^\circ$, aquí es donde el alambre hace contacto con el dado, haciendo un esfuerzo para empezar a reducir el diámetro y pasar a la chumacera.
- *Chumacera:* en esta parte del dado es donde se le da el diámetro requerido al alambre. La longitud de la chumacera debe ser de 30 a 35% del diámetro de ésta.

* *Ángulo de salida:* sólo es un desahogo del dado para no lastimar el acabado del alambre y puede ser de 30° a 60° (4)

2.9 Proceso de fabricación del alambraón de aluminio.

Para la producción de aluminio 1350 de 9.5 mm de diámetro se utiliza una configuración de rodillos formadores que contiene tres espacios de trabajado en rodillos espaciados 120 grados cada una de las tres etapas. En los primeros cuatro estantes de rodillos es donde se imparte la mayor cantidad de reducción de área de la barra. Esta reducción es de aproximadamente 35 por ciento, seguido por 2 estantes de aproximadamente 21 por ciento. Si es requerido un alambraón de 7.6 mm de diámetro es necesario dos estantes más de rodillos para proporcionar la reducción faltante. La mayoría de las máquinas para el manufacturado de aluminio en alambraón tienen de 6 a 15 estantes de rodillos de reducción para manufacturar alambraón de 9.5 mm o 3/8 in.(1)

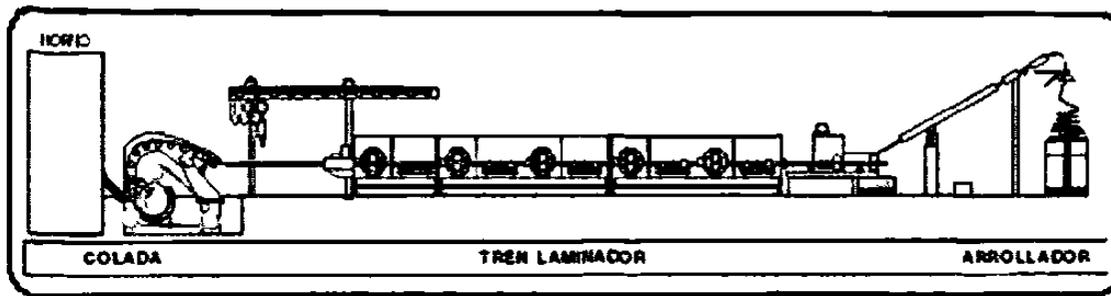
2.9.1 Colada continua.

El primer punto para la manufactura de alambraón de aluminio es el suministro del metal líquido a la correcta temperatura.

Varias formas de filtración son empleadas para prevenir que entre el metal se tengan algunas partículas dañinas de que pueden ser provenientes de los ladrillos refractarios por donde se transporta el metal fundido.

La presencia de gas de hidrogeno y algunos materiales alcalinos (Na, Li, etc) ha sido un problema de serias consideraciones para los productores de aluminio. En línea con el metal fundido se pone un tratamiento inerte y con esto la combinación activa de gases elimina casi por completo este problema.

Las líneas para manufacturar alambraón de aluminio muestran varios puntos importantes como se observa en la figura 9.



La figura 9 muestra la línea para la manufactura de alambres de aluminio.

El aluminio ocupa aproximadamente el 8% de la corteza terrestre, hasta 1886 se encontró la manera de hacerlo mas barato, es muy resistente a la corrosión.

2.9.2 Propiedades del alambre hecho por el proceso de laminado en caliente.

Para la mayoría de las empresas manufactureras de aluminio 1350, lo primero que se cuida cuando se hace una corrida de alambre es el porcentaje de elongación, la resistencia eléctrica y el esfuerzo de ruptura. La resistencia eléctrica comúnmente es convertida a porcentaje de IACS o conductividad.

Los métodos comúnmente usados para cambiar estas propiedades son:

Porcentaje de elongación: El método más efectivo para incrementar el porcentaje de elongación del alambre es incrementar la cantidad de Fe (hierro) en el metal líquido.

También puede ser incrementada la elongación mediante el incremento de la velocidad y de la temperatura de la barra antes de entrar a los rodillos de reducción, otra forma es la de mediante la adición de pequeñas cantidades de granos finos de metal de aluminio 1350.

Porcentaje de conductividad (resistividad): Lo que hace cambiar la más conductividad del metal es la composición química del mismo. Si alguno de los metales de la formulación esta fuera de lo especificado puede cambiar la conductividad eléctrica del alambón ya como producto final.

También el historial térmico y mecánico puede variar la conductividad eléctrica, abajo se enumeran algunos factores que pueden afectar esto.

1. Sección transversal de la barra a deformar.
2. Velocidad del flujo del metal líquido.
3. Temperatura de la barra.
4. Presión de la solución de las estaciones de rodillos.
5. Temperatura de la solución de las estaciones de rodillos.
6. Distribución de la solución en los rodillos de reducción.
7. Concentración de la solución de las estaciones de rodillos.

Esfuerzo de ruptura: Al igual que con la conductividad el historial térmico y mecánico puede afectar esta propiedad, para hacer que el esfuerzo de ruptura del metal decrezca se listan varios ajustes en orden de importancia.

1. Incremento de velocidad del metal a deformar.
2. Incremento de la temperatura del metal en la entrada de los rodillos de deformado.
3. Incremento de la temperatura de la solución de las estaciones de rodillos de reducción.
4. Bajar la presión de solución en los rodillos de reducción.
5. Reducir el flujo de la solución en las estaciones de los rodillos de reducción, esto se recomienda en los estantes del numero 5 al 11.
6. Incrementar la concentración de aceite en la solución de los rodillos de reducción.

Para incrementar el esfuerzo de ruptura del metal se recomienda hacer los siguientes ajustes.

1. Reducir la temperatura de la barra antes de la entrada a los rodillos, la mínima recomendada es de 440°C.
2. Incrementar la presión de la solución de las estaciones de rodillos.
3. Bajar la temperatura de la solución de los rodillos de reducción a 43°C aproximadamente mediante el incremento de flujo de agua de enfriamiento.
4. Incrementar el flujo de solución a los estantes del 1 al 8.

Con la misma composición química, el esfuerzo de ruptura y la conductividad eléctrica serán inversamente proporcionales. El esfuerzo más alto de ruptura dará como resultado el porcentaje de conductividad eléctrica más bajo. El único camino para producir un alto esfuerzo con una alta conductividad eléctrica es mejorar la composición química, por ejemplo 0.04 Si y 0.10 Fe.

2.10 Proceso de fabricación de alambres de aluminio para conductores eléctricos (4).

2.10.1 Descripción del proceso de trefilado

El proceso de trefilado consiste básicamente en reducir el diámetro de un alambre o alambión, al jalar el alambre a través de una serie de dados estacionarios que gradualmente van decreciendo en diámetro.

Al pasar el alambre por un dado lo que ocurre es que estiramos o elongamos el material, y de acuerdo al diseño de cada máquina es el % de elongación que se tiene.

Para las estiradoras SYNCRO el % de elongación es de 25%, es decir, si pasamos por un dado 1 metro de alambión a la salida obtendremos 1.25 metros, esto nos da un % de reducción de área de 20.5%.

La serie de datos se coloca en posiciones predeterminadas de acuerdo al número de datos que se vayan a utilizar.

Cuando se hace pasar un alambre a través del dado, se genera fricción, para disminuir este fenómeno se utiliza una solución base en el caso de estirado de cobre, y aceite en el caso de estirado de aluminio.

El aceite debe bañar la entrada del alambre al dado, además de las poleas y los carrier, que son los lugares donde se genera la fricción.

2.10.2 Características del aluminio.

- El aluminio es el tercer elemento más abundante de la naturaleza como Bauxita.
- 4 Kg de Bauxita proporcionan 2 Kg de aluminio.
- Una de las características más ventajosas del aluminio es su bajo peso ya que representa sólo el 30.4% del peso del cobre.
- La aleación más utilizada de aluminio es la 1350 (la cual contiene un 99.5% de aluminio y un 0.5% de otros elementos aleantes).

2.10.3 Lubricantes para estirado de alambres.

Para alambres no ferrosos hay básicamente dos condiciones de lubricación a ser consideradas:

1. Lubricación ilimitada (hay contacto metal a metal).
2. Lubricación hidrodinámica (separadas por película de lubricante).

Propósito o funciones de un lubricante:

- Remover el calor
- Reducir el desgaste por fricción
- Disminuir el consumo de energía

- Mejor acabado superficial
- Reducir esfuerzo de estirado

2.10.3.1 Lubricante para estirado de alambres de aluminio.

Está formado por aceite (mineral + aditivos). El aluminio durante el proceso de trefilado no puede estar en contacto con el agua ya que lo oxida o lo mancha.

Con el uso, la viscosidad del aceite aumenta, este aumento en la viscosidad puede provocar reventones.

¿Por qué es tan caliente el área de estirado?

La disipación de calor por medio de aceite no es tan efectiva como con emulsiones, pero para el aluminio el aceite reduce la fricción lo suficiente. La lubricación limitada da brillantez al acabado superficial.

La energía necesaria para trefilar el alambre es manifestada en calor, este calor es absorbido parte por el aceite que se encuentra alrededor de 60°C, el resto es calor que se queda en el mismo alambre, al salir este de la caja de trefilado tiene una temperatura de 100°C aproximadamente, esto es lo que hace que el área de estirado grueso sea tan caliente.

2.10.4 Alambrón de aluminio aleación 1350 temple duro.

Es el más comúnmente utilizado, y para lograrlo se aprovecha el proceso de estirado.

El alambroón de aluminio debe entrar a la máquina con ciertas características (% de elongación y esfuerzo de ruptura) para que al pasar por un número determinado de dados, al obtener el producto final, este salga con el esfuerzo de ruptura especificado. (5)

Diámetros (pulg)	Esfuerzo K/mm²
.00984 al .0492	20.3
.0492 al .0590	19.8
.0590 al .0688	19.3
.0688 al .0787	18.8
.0787 al .0885	18.3
.0885 al .0984	17.8
.0984 al .1181	17.3
.1181 al .1377	16.8
.1377 al .2559	16.3

2.10.5 Alambres de aluminio 1350 temple suave.

- Los alambres suaves se hacen de dos formas: La primera consiste en meter el carrete de alambre de aluminio al horno y elevarle la temperatura hasta mínimo 300°C, la cual es la temperatura de recristalización del aluminio.
- La segunda es que en una estiradora que tenga recocedor en línea se recosa el alambre mediante un voltaje aplicado, el cual hace llegar al alambre a una temperatura cercana a la velocidad de recristalización.
- El esfuerzo para los alambres suaves es de 10 K/mm².

2.10.6 Descripción general de una máquina trefiladora.

Para lograr el proceso de estirado se cuentan con dos tipos de máquinas:
En Tandem y En Cono.

Después del último dado se cuenta con una polea de tracción principal (capstan), posteriormente el alambre pasa por unas poleas de recocido las cuales le dan la suavidad requerida, después es mandado hacia el Take-up (spooler) pasando por un amortiguador (dancer) quien controla la tensión de éste.

El equipo incluye un pedal para impulsos que se encuentran a lo largo de la máquina para facilitar el enhebrado, cuenta con un interruptor de paro automático el cual detendrá la máquina en caso de ruptura de alambres. El sistema de solución (emulsión o aceite) está conectado al sistema central por medio de tuberías para suministro y retorno.

La función de una estiradora (figura 9) es producir un alambre de un cierto diámetro a partir de un alambre mayor que el de salida (que es el insumo), mediante un número de dados, los cuales van decreciendo en diámetro hasta llegar al diámetro final del producto (se le llama serie de dados) y un lubricante el cual actuará para disminuir la fricción entre el alambre y el dado y para enfriar los dados de estirado.

2.10.7 Partes principales de una trefiladora de alambre.

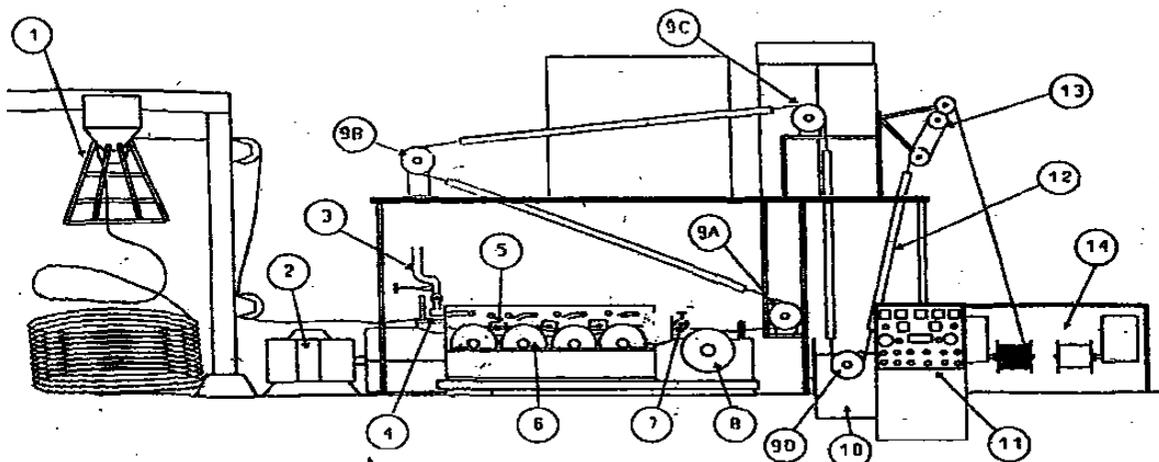


Figura 9 máquina trefiladora para alambres gruesos.

- 1 Pay Off (Entregador)
2. Motor principal
3. Tubo alimentador de solución
4. Polea guía de entrada
5. Portadados
6. Carriers (en la caja de trefilado)
7. Micro para rotura de alambre
8. Capstan
9. Poleas de recocido (A,B,C,D)
10. Depósito de enfriamiento
11. Tablero de control
12. Tubo de solución de enfriamiento
13. Amortiguador (Dancer)
14. Take-Up (Spooler doble)

2.10.8 Pasos a seguir para producir alambres de aluminio.

- El operador lee la O.F o la M.O.F ya sea en papel o en una computadora, con la finalidad de conocer la operación que se realizará.
- El operador consulta la hoja de proceso de este producto y coloca las transmisiones, tap, presiones y todo lo que se especifique en la hoja de proceso.
- El operador va al Taller de dados a solicitar los datos necesarios para estirar ese producto e informa al Taller de dados en qué máquina se estirará.
- El operador ensarta y enhebra la serie de dados, evitando de no machucarse o golpearse.
- El operador revisa el diámetro entre el dado de salida y el capstan, con esto determina qué diámetro tendrá el producto final. Realiza un arranque y corrobora que el diámetro esté dentro de especificación; si no es así, manda al desperdicio el carrete o si se puede mandar a estirar a un diámetro menor se manda.
- El operador ajusta el Contador de metros según el tramo necesitado.
- El operador revisa el material conforme al Plan de Control.
- El operador coloca una Etiqueta a cada carrete con la información que pida la etiqueta.
- En caso de que un producto no cumpla con las especificaciones, se le asigna una Etiqueta color rojo.

2.11 Especificaciones del aluminio 1350 para el alambón y alambres en aplicaciones eléctricas (5).

Alcance: el material cubierto por esta especificación es el alambón de aluminio rolado en caliente, con diámetro de 0.375 in, en los temples mostrados en la tabla 2 para trefilarse a alambre, usados en conductores eléctricos (aleación AA 1350).

2.11.1 Propiedades del Aluminio 1350.

General: El alambón deberá ser uniforme en calidad y temple, liso y libre de agrietamientos, fisuras, torceduras, inclusiones, secciones con daños mecánicos y otras imperfecciones. El alambón deberá ser entregado en un solo tramo por rollo. El alambón deberá ser procesable en alambre que cumpla con los requerimientos de ASTM B230, ASTM B231 y ASTM B232. (5)

Composición química: El alambón deberá cumplir con los requerimientos de composición química que se muestra en la tabla # 2

Tabla # 2 Especificación de la composición química del aluminio 1350.

ELEMENTOS	Composición %
Aluminio mínimo	99.5
Silicio máximo	0.10
Fierro máximo	0.40
Cobre máximo	0.05
Manganeso máximo	0.01
Cromo máximo	0.01
Zinc máximo	0.05
Boro máximo	0.05
Galio máximo	0.03
Vanadio + Titanio máximo	0.02
Otros elementos máximo	0.01

Esfuerzo a la tensión: El esfuerzo a la tensión de los temples respectivos del alambón se especifican en la tabla # 3. (5)

Tabla # 3 Especificación de esfuerzo a la tensión del alambón 1350.

Temple	Esfuerzo a la tensión Kg/mm ²	
	Mínimo	Máximo
1350-H14 (Alto esfuerzo)	11.5	12.7
1350-H14 (Bajo esfuerzo)	10.5	11.4
1350- H14 (Duro)	12.7	13.5

% Elongación: El % de elongación respecto al alambón se especifica en la tabla # 4.

Tabla # 4 Especificación de porcentaje de elongación de aluminio 1350.

Temple	% Elongación	
	Mínimo	Máximo
1350-H14 (Alto esfuerzo)	6	10
1350-H14 (Bajo esfuerzo)	11	15
1350- H14 (Duro)	5	8

Resistividad: La resistividad del alambón en cada temple se especifica en la tabla # 5.

Tabla # 5 especificación de resistividad eléctrica del alambre 1350.

Temple	Resistividad $\Omega\text{-mm}^2/\text{m}$ máximo	Equivalencia conductividad Volumétrica % de IACS, mínimo.
1350-H14 (Alto/Bajo esfuerzo)	0.028080	61.4
1350- H14 (Duro)	0.0281226	61.3

Diámetro: El diámetro del alambre deberá ser especificado en fracciones decimales de una pulgada usando tres lugares de decimales o milímetros usando dos lugares decimales. El alambre de aluminio deberá ser uniforme y deberá tener las siguientes dimensiones.

Diámetro nominal 0.375 in. (9.52 mm).

Desviación del diámetro medio del diámetro nominal +/- 0.020 in. (0.51 mm).

Desviación del diámetro en cualquier punto del diámetro nominal +/- 0.030 in. (0.76 mm).

Uniones: Las uniones en el alambre de aluminio deberán ser efectuadas mediante soldadura eléctrica, soldadura en frío mediante presión o con soldadura eléctrica con iniciación en frío. El esfuerzo a la tensión de las uniones deberá ser de no menos de 11,000 psi (76 Mpa).

3.- Procedimiento Experimental.

3.1 Composición química del aluminio del Lote "A" y "B".

El análisis químico se realizó en mediante el proceso conocido como absorción atómica.

3.2 Propiedades Mecánicas de los alambres del Lote "A" y "B".

Para la elaboración de este análisis se siguieron los estos pasos:

- a) Se selecciono un rollo de alambre de aluminio 1350 en el lote "A" con las siguientes propiedades mecánicas 9.4 Kg/mm^2 de esfuerzo de ruptura con 5 por ciento de elongación.
- b) Se selecciono un rollo de alambre de aluminio 1350 en el lote "B" con las propiedades semejantes a las del lote "A" (9.4 Kg/mm^2 de esfuerzo de ruptura con 5 por ciento de elongación).
- c) Se cortaron las muestras a 254 mm entre marcas y 35.4 mm de cada lado.
- d) Se sometieron las dos muestras de alambre (lote "A" y lote "B") al proceso de estirado, se escogió el calibre 4 AWG que tiene 204 mils (5.19 mm) de diámetro.
- e) Se sometieron los 5 alambres de aluminio de cada lote a la prueba destructiva de tensión en una maquina Universal convencional.
- f) Se sometieron los 5 alambres a la prueba de dureza superficial en la sección transversal.
- g) Se analizaron los datos en Excel para obtener gráficos, curvas y ecuaciones.

3.3 Microestructura de las muestras.

Las muestras se analizaron en un microscopio óptico con capacidad de 1000 aumentos.

Para analizar las muestras se prepararon de la siguiente manera.

- Se obtuvo el alambroón del lote "A" y "B".
- Se trefilaron estos dos alambrones con 4 dados (8.43, 7.11, 6.12 y 5.19 mm de diámetro).
- Para cada lote de aluminio se cortaron 2 muestra de 1 cm de altura (obteniendo 10 muestras por cada lote).
- Se montaron las muestras en el molde (una para ver la forma longitudinal del alambre y la otra para ver la forma transversal) utilizando resina poliéster y catalizador.
- Se realizó el desbaste y pulido de las muestras hasta llevarlas a acabado espejo auxiliándonos con pastas de diamante y paños para el pulido fino.
- Se preparó la solución de ataque químico con la siguiente fórmula: 2 ml de HF(48%), 3 ml de HCL (conc), 20 ml de HNO₃ (conc) y 175 ml de H₂O.
- Se atacaron las muestras conforme al siguiente procedimiento: Poner en inmersión en la solución el material por 10 minutos, sacar y enjuagar con agua caliente (no remover con papel o cualquier otra sustancia), después del enjuague aplicar alcohol y secar con aire caliente.
- Las muestras se analizaron en un microscopio óptico con capacidad de 1000 aumentos.
- Se analizaron las muestras para localizar granos e imperfecciones.

3.4 Microestructura de las muestras en Microscopio electrónico de barrido (SEM).

El análisis se realizó a los alambres de 9.525 mm y a los de 5.19 mm de diámetro del lote "A" y "B", este análisis fue antes de que las muestras fueran atacadas con la solución química, el SEM utilizado tiene una capacidad de 30,000 aumentos y tiene configurado un software que tiene el nombre de INCA, las muestras están en una cámara inerte la cual tiene la atmósfera de nitrógeno, en este equipo se pueden observar partículas extrañas así como imperfecciones del material, al observar algún elemento que se desee saber que contiene se puede realizar por medio de una chispa un análisis químico, con el cual se observa los elementos presentes en la partícula así como los porcentajes de los elementos de los que esta compuesto.

4.- Resultados y Discusión.

4.1 Análisis de la composición química del aluminio del Lote "A" y "B".

En la tablas # 5 se muestra la composición química de el aluminio del lote "A" y "B", el valor de todos los elementos esta dentro de lo permitido, pero se nota una diferencia que pudiera ser importante principalmente en el Fierro y el silicio.

ELEMENTOS	Lote A %	Lote B %
Aluminio	99.78	99.84
Silicio	0.039	0.024
Fierro	0.164	0.1124
Cobre	0	0.004
Manganeso	0.002	0.0011
Magnesio	0.001	0.008
Cromo	0	0.0011
Níquel	0	0.0024
Zinc	0.013	0.0024
Boro	0.009	0.0030
Galio	0.011	0
Vanadio	0.005	0.0069
Titanio	0.001	0.0034

Tabla # 5 Composición química del aluminio 1350.

4.2 Análisis de las Propiedades Mecánicas del los alambres del Lote "A" y "B".

4.2.1 Análisis de esfuerzo-deformación Ingenieril del alambón.

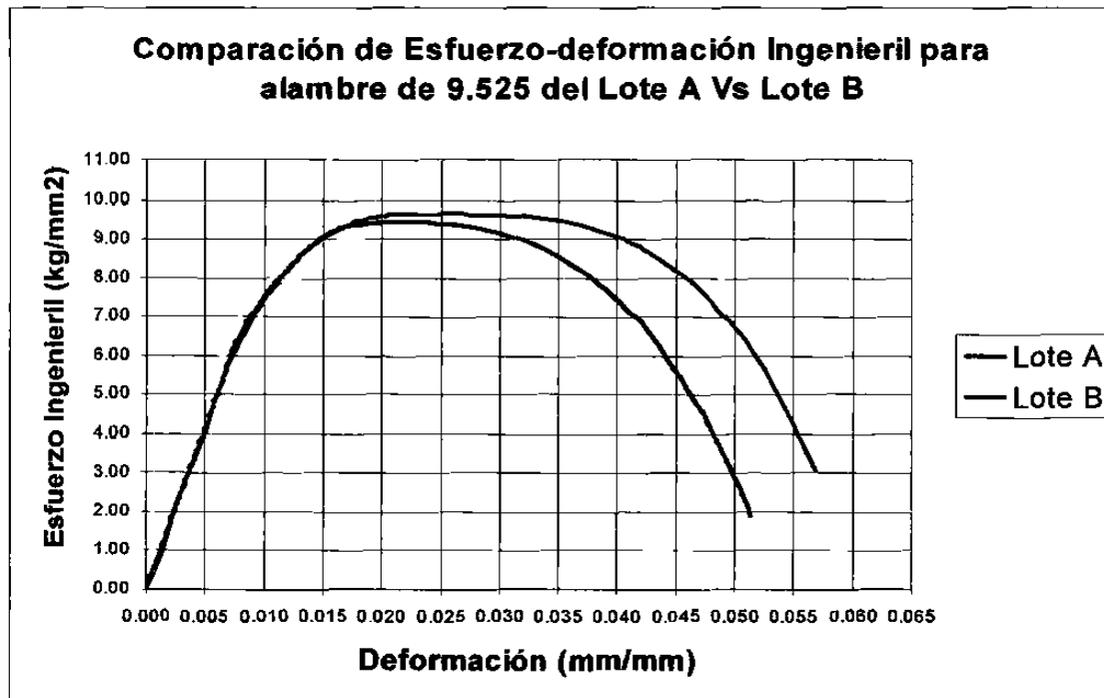


Figura 10 Comparación de los alambres de 9.525 mm Lote "A" Vs Lote "B" de 9.525 mm

En la figura 10 se muestra un esfuerzo último muy parecido en el aluminio del lote "A" (9.41 kg/mm²) y "B" (9.63 kg/mm²), la deformación del lote "A" es ligeramente menor que la del lote "B".

4.2.2 Análisis de esfuerzo-deformación comparando el lote "A" Vs el lote "B" en cada diámetro de alambre.

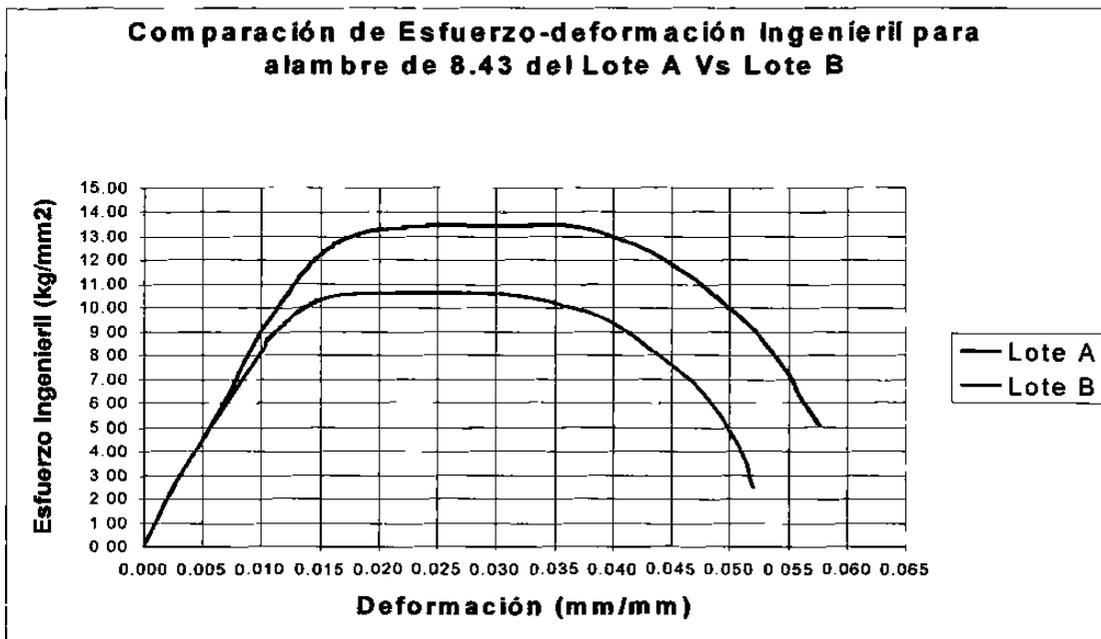


Figura 11 Comparación de esfuerzo del alambre de 8.43 mm de diámetro.

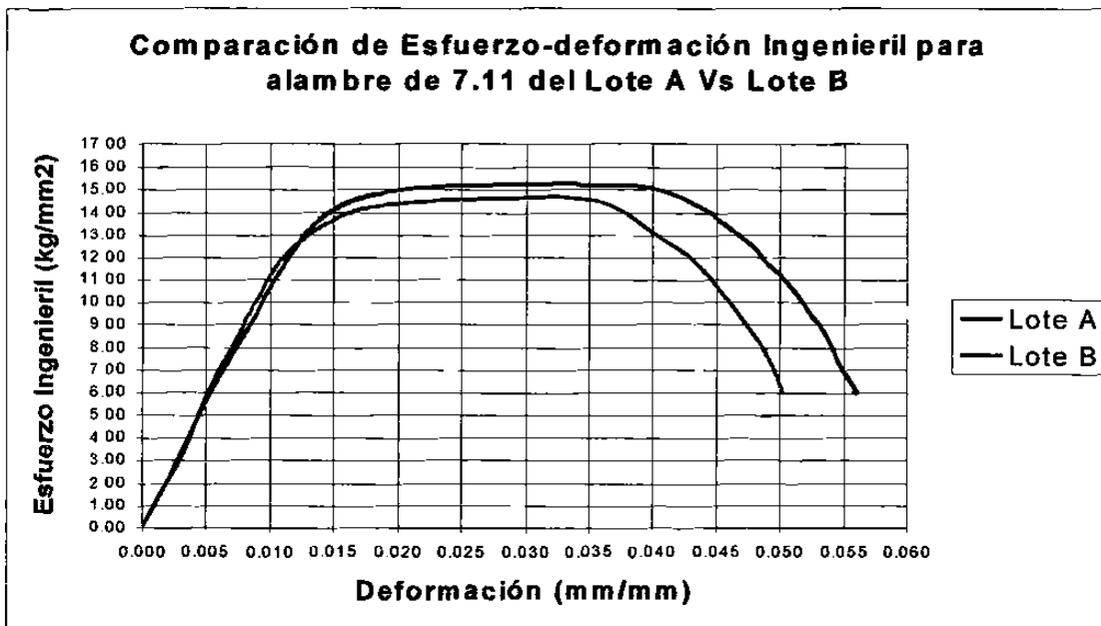


Figura 12 Comparación de esfuerzo del alambre de 7.11 mm de diámetro.

La figura 11 y 12 muestran que el lote "A" supera en esfuerzo último de tracción al lote "B" siendo que era de esperarse un esfuerzo de tracción muy parecido.

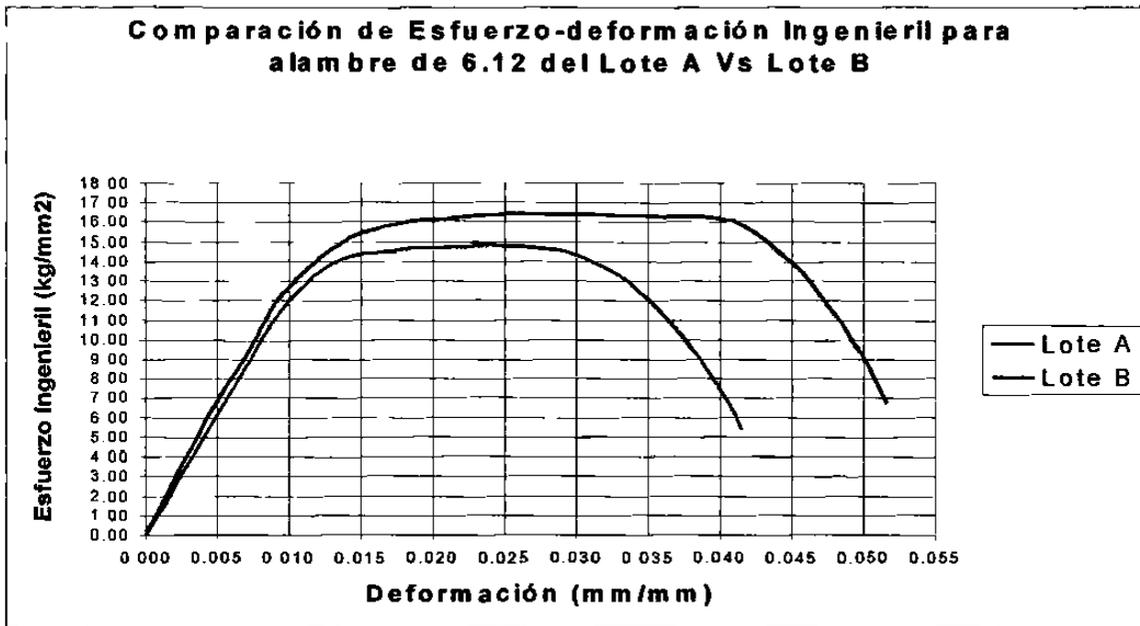


Figura 13 Comparación de esfuerzo de alambre de 6.12 mm de diámetro.

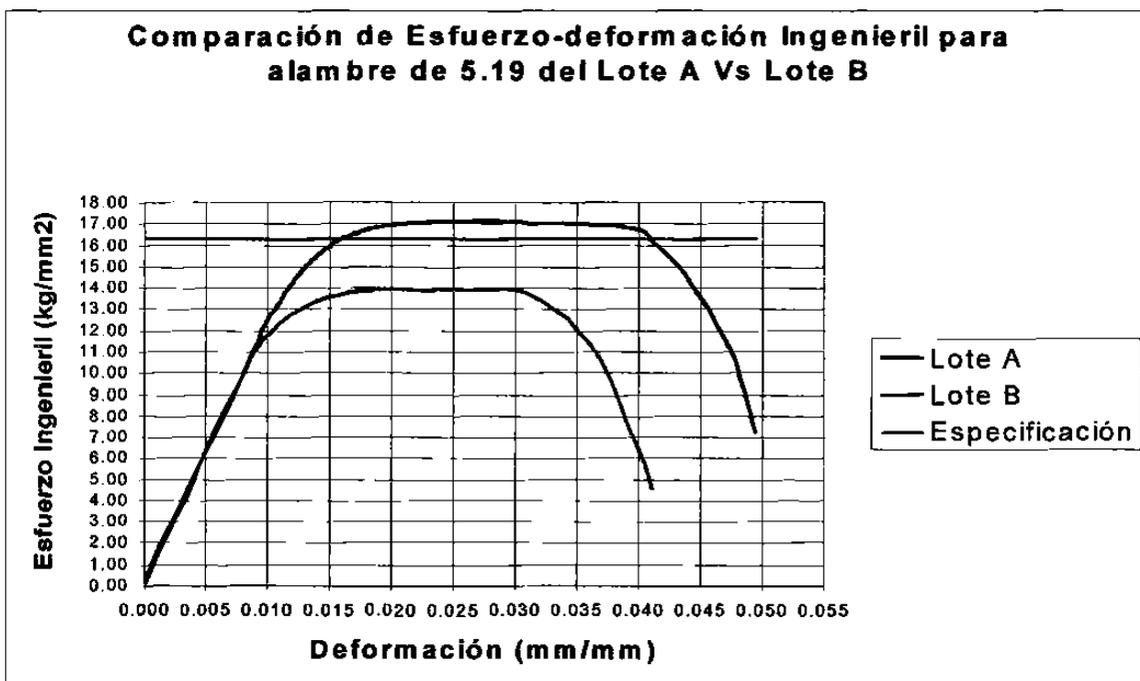


Figura 14 Comparación de esfuerzo último de tracción para los alambres de 5.19 mm de diámetro.

En la figura 13 se muestra que el alambre del lote "A" sigue teniendo un esfuerzo mas elevado que el del lote "B", en la figura 14 se muestra que el alambre del lote "A" obtuvo un esfuerzo mas alto que el mínimo especificado mientras que el alambre del lote "B" no alcanzó a obtener el esfuerzo mínimo especificado (16.3 Kg/mm²) logrando solamente llegar al esfuerzo de 13.92 Kg/mm².

4.2.3 Análisis de esfuerzo deformación del aluminio de los lotes "A" y "B" trefilado con 4 dados.

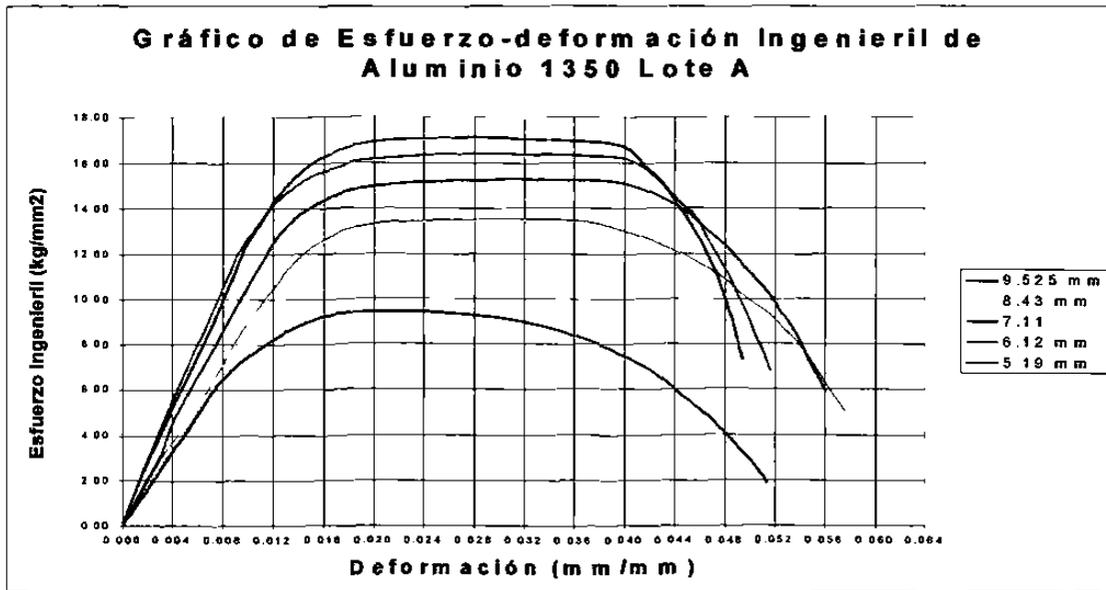


Figura 15 Comportamiento de aluminio del lote "A" al trefilarse con 4 dados.

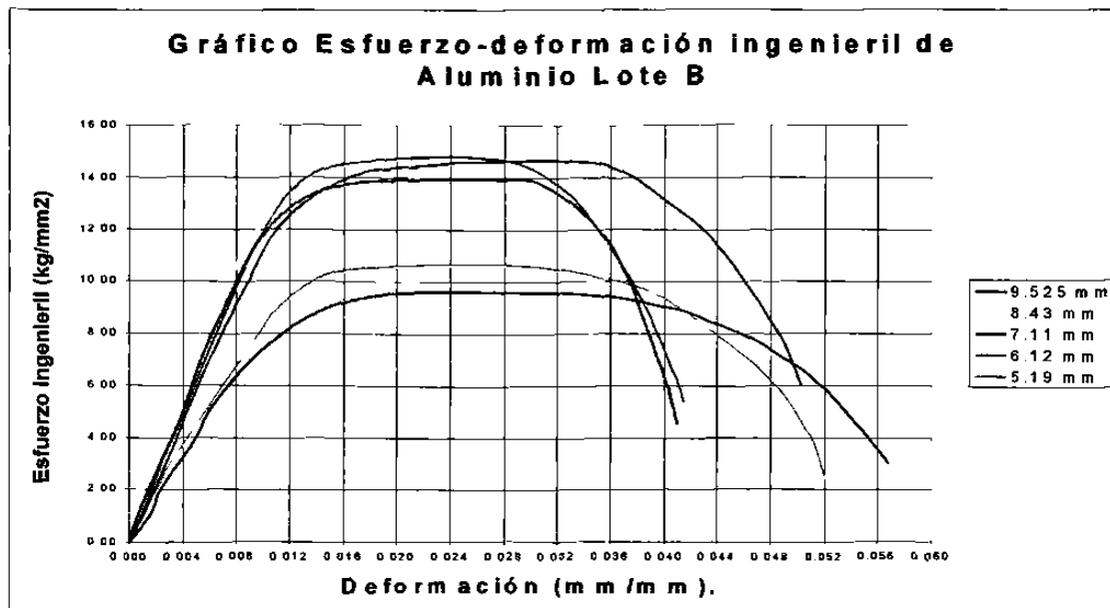


Figura 16 Comportamiento de aluminio del lote "B" al trefilarse con 4 dados.

En la figura 15 se muestra un comportamiento normal del aluminio del lote "A" ya que el esfuerzo último se incrementa en cada paso de trefilado. El esfuerzo del alambre de 9.525 mm de diámetro es de 9.41 kg/mm², al pasar este alambre por un dado de trefilado de 8.43 mm de diámetro el esfuerzo obtenido es de 13.48 kg/mm², al pasar el alambre de 8.43 mm de diámetro por un dado de 7.11 mm de diámetro el esfuerzo obtenido fue de 15.28 kg/mm², al pasar el alambre de 7.11 mm de diámetro por el tercer dado de la serie de trefilado (6.12 mm) dio un esfuerzo último de tracción de 16.39 kg/mm² y por último se paso el alambre de 6.12 mm de diámetro por el cuarto dado (5.19 mm) se obtuvo un esfuerzo de 17.13 kg/mm². Este comportamiento de incremento de esfuerzo es debido a que conforme se incrementa con cada dado el porcentaje de trabajado en frío la morfología del aluminio cambia creando granos alargados en dirección de la longitud del alambre.

En la figura 16 se muestra el comportamiento del lote "B" al incremento de trabajado en frío, este es diferente al mostrado en el lote "A", al pasar el alambre de 9.525 mm de diámetro por un dado de trefilado de 8.43 mm de diámetro el esfuerzo del aluminio sube de 9.63 Kg/mm² a 10.65 Kg/mm², al pasar el alambre de 8.43 mm de diámetro por un dado de trefilado de 7.11 mm el esfuerzo sube de 10.65 Kg/mm² a 14.63 Kg/mm², al pasar el alambre de 7.11 mm de diámetro por un dado de trefilado de 6.12 mm el esfuerzo sube de 14.63 Kg/mm² a 14.8 Kg/mm², pero al pasar el alambre de 6.12 mm de diámetro por un dado de trefilado de 5.19 mm el esfuerzo baja de 14.63 Kg/mm² a 13.92 Kg/mm² cuando lo normal es que suba a un mínimo de 16.3 Kg/mm² como sucede con el aluminio del lote "A" ver tabla 8.

4.2.4 Análisis de esfuerzo-real deformación-real del aluminio de los lotes "A" y "B" trefilado con 4 dados.

En la figura 17 se muestra el esfuerzo en cada paso de trefilado del aluminio del lote "A", el comportamiento es normal ya que se incrementa conforme se incrementa el % de trabajado en frío, en la figura 18 se muestra como en el último paso el esfuerzo no se incrementa como era de esperarse.

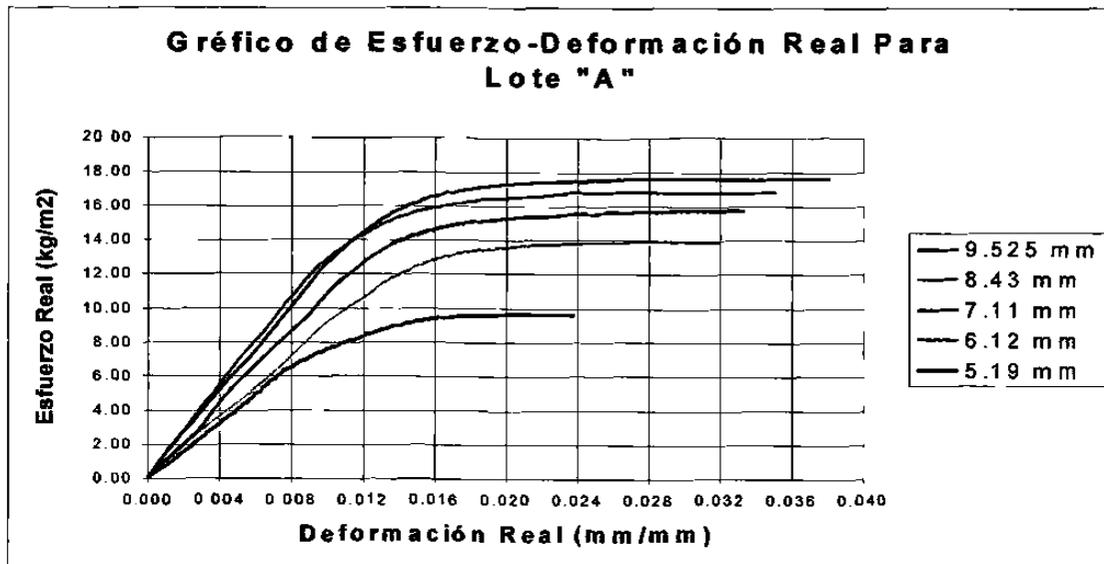


Figura 17 Comparación de esfuerzo-defromación real de los alambres del aluminio del lote "A".

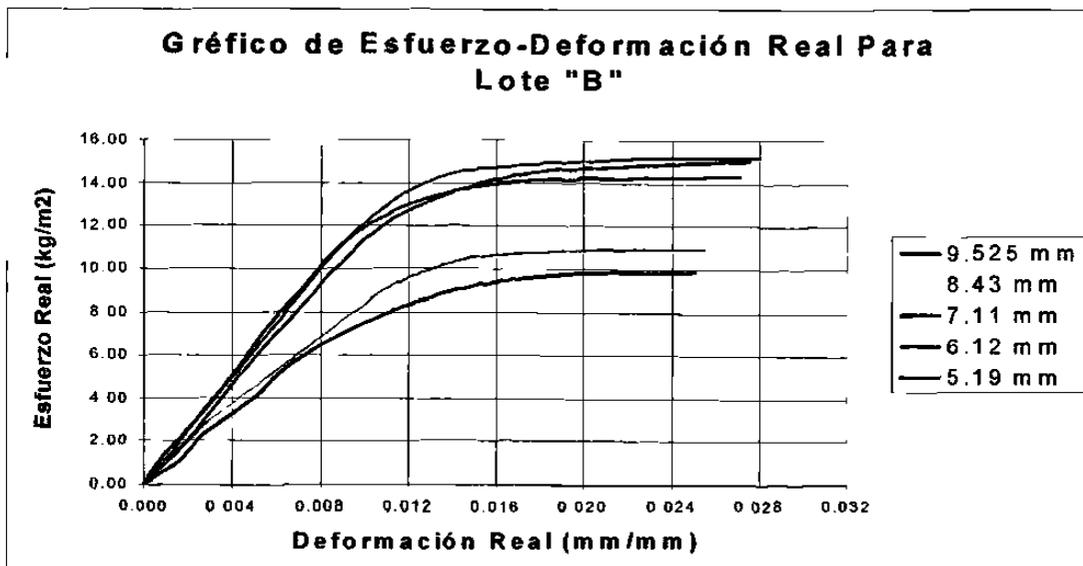


Figura 18 Comparación de esfuerzo-defromación real de los alambres del aluminio del lote "B".

4.2.5 Determinación del modelo matemático que rige el aluminio del lote "A".

En base al % de reducción de área que sufrió el material en cada dado de estirado, se determinó el % de trabajado en frío mediante la fórmula: Porcentaje de trabajo en frío = $((A_o - A_f) / A_o) \times 100$ y graficandola contra el esfuerzo último en cada paso obtuvimos su correspondiente curva, con esto se buscó una curva parecida con su ecuación, en la figura 19 se muestra la curva real y la curva de tendencia.

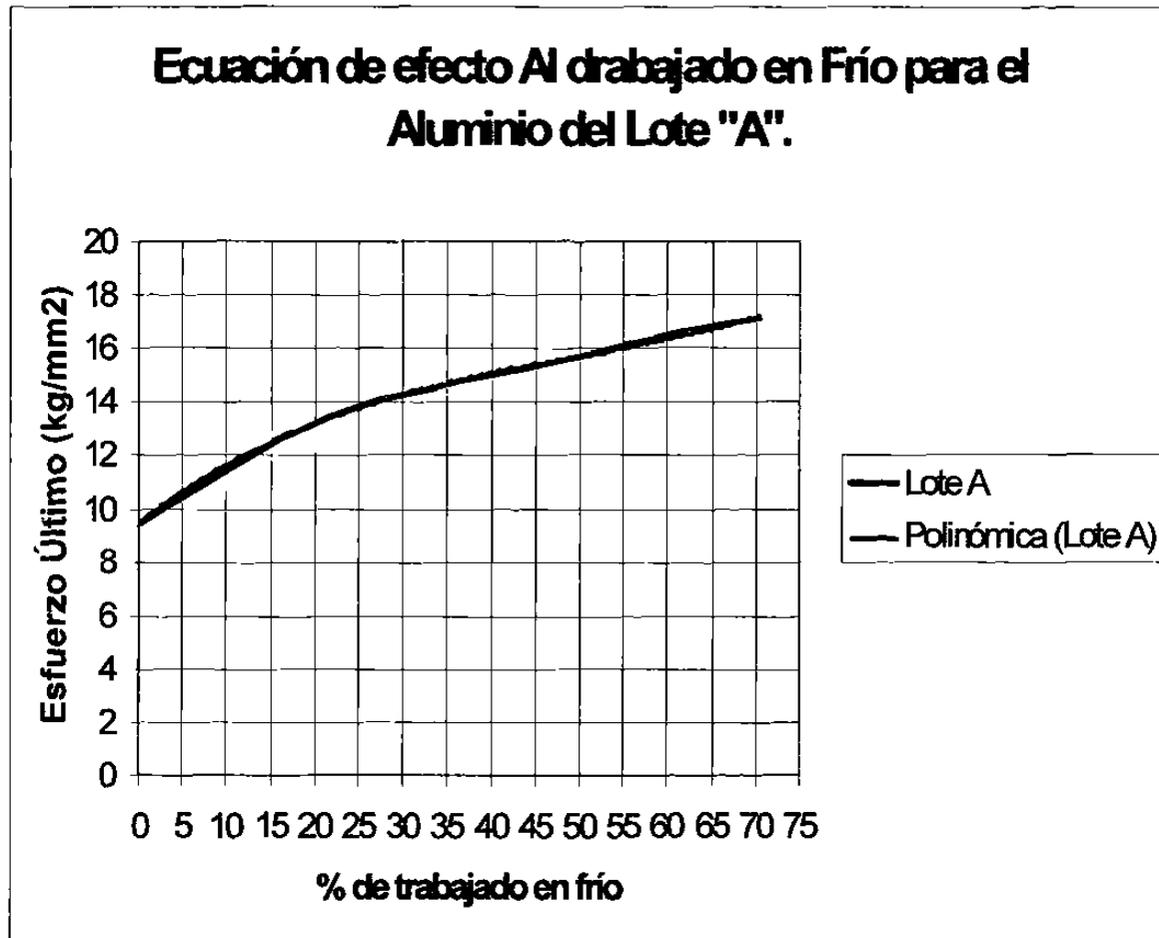


Figura 19 Modelo matemático para la obtención del esfuerzo último mediante el % de trabajado en frío.

Lote A			
	Diámetro (mm)	% de Trabajo en frío	Esfuerzo Último
Paso 0	9.525	0	9.41
Paso 1	8.43	21.67	13.48
Paso 2	7.11	44.28	15.25
Paso 3	6.12	58.72	16.39
Paso 4	5.19	70.31	17.13

Tabla 6 datos para el modelo del lote "A".

La ecuación obtenida para determinar el esfuerzo último de tracción en base al % de trabajado en frío que se suministrara al aluminio del lote "A" es como sigue:

$$\sigma_{ult} = 0.00003(\%TrFr)^3 - 0.004(\%TrFr)^2 + 0.259(\%TrFr) + 9.4216 \quad [4]$$

Donde:

σ_{ult} es el esfuerzo último que se obtendrá.

Y

%TrFr es el porcentaje de trabajado en frío que se suministrará.

4.2.6 Obtención del valor de exponente de endurecimiento por deformación "n" y constante de endurecimiento por deformación "K" para los lotes "A" y "B".

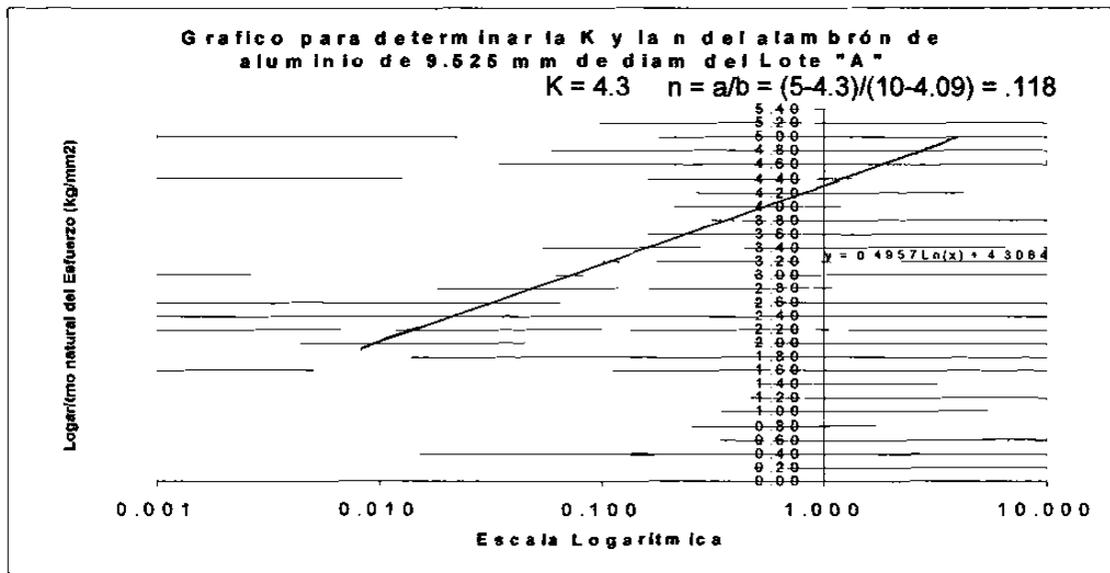


Figura 20 Determinación del valor de K y n para alambre de 9.525 mm.

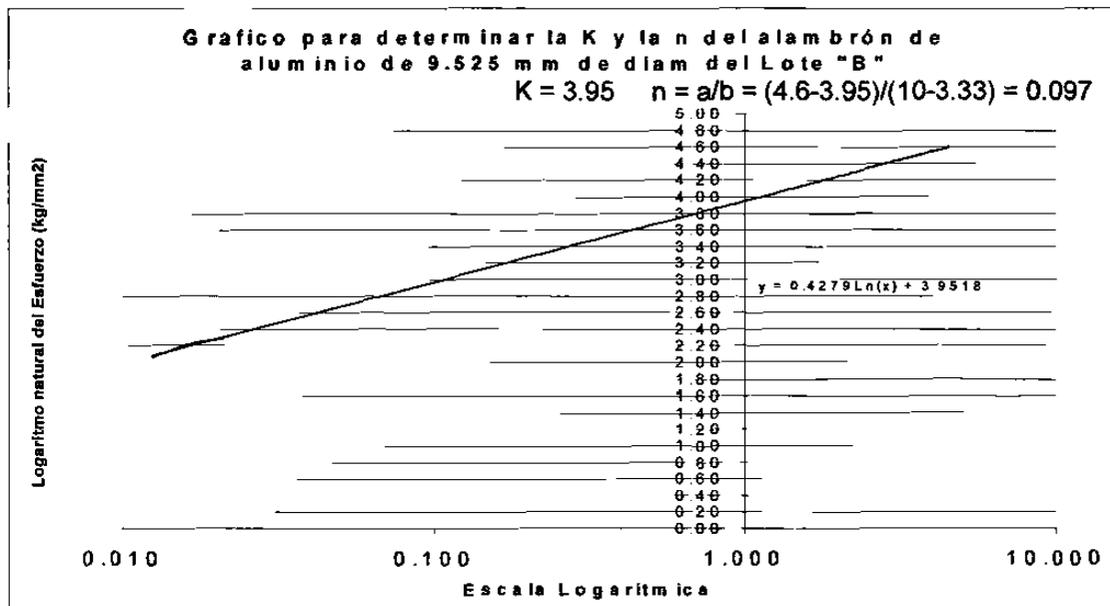


Figura 21 Determinación del valor de K y n para alambre de 9.525 mm.

En el apéndice I se muestran el resto de los cálculos de "K" y "n".

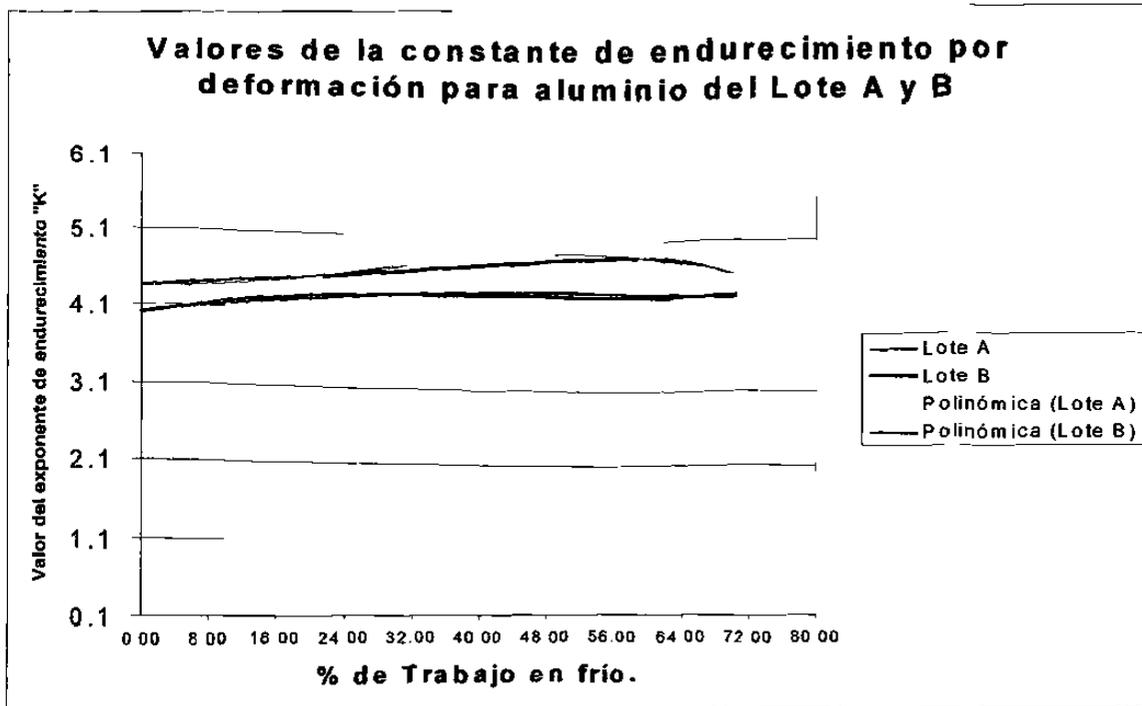


Figura 22 muestra la comparación en el lote "A" vs "B" del valor de K.

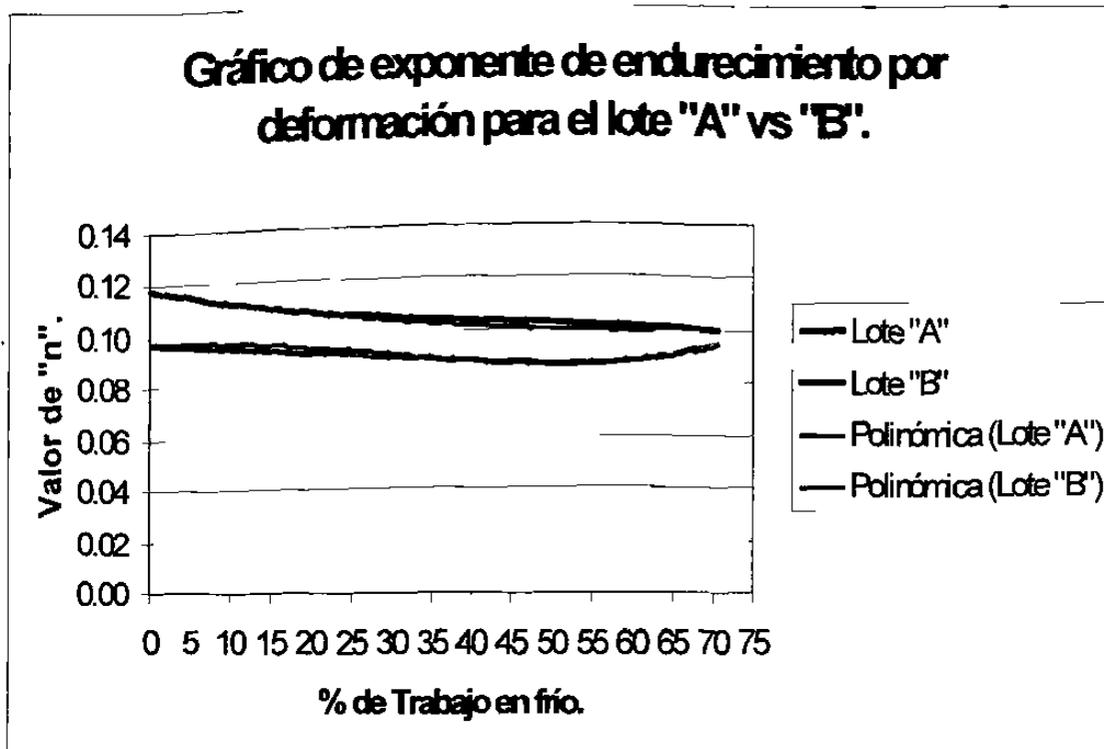


Figura 23 muestra la comparación del valor de "n" para el lote "A" y "B".

Comparando el valor de la constante de endurecimiento por deformación (K) del lote "A" en la figura 20 vs. el del aluminio del lote "B" en la figura 21 se observa un claro incremento en el del lote "A". Comparando el valor del exponente de endurecimiento por deformación (n) del lote "A" en la figura 20 vs. el del aluminio del lote "B" en la figura 21 se observa también el incremento en el del lote "A".

En las figuras 22 y 23 respectivamente se muestra la diferencia de los valores de K y n para el lote "A" y "B" se observa que el del lote "A" esta arriba que el del lote "B" lo cual representa la diferencia en propiedades mecánicas de ambos lotes de aluminio.

En base a las líneas obtenidas con los datos de % de trabajado en frío vs el valor de "K" de los alambres del lote "A" se buscó la línea de tendencia que mas se aproxima para ambos lotes con esto se encontró la ecuación que rige a cada lote como sigue:

$$K_A = -8 \times 10^{-6}(\%TrFr)^3 + 0.0006(\%TrFr)^2 - 0.0006(\%TrFr) + 4.3 \quad [5]$$

$$K_B = -0.0001(\%TrFr)^2 + 0.0151(\%TrFr) + 3.9627 \quad [6]$$

La ecuación 5 es para obtener el valor de K para el lote "A" y la ecuación 6 para el lote "B".

$$n_A = 5 \times 10^{-6}(\%TrFr)^2 - 0.0006(\%TrFr) + 0.118 \quad [7]$$

$$n_B = 2 \times 10^{-7}(\%TrFr)^3 - 2 \times 10^{-5}(\%TrFr)^2 + 0.0001(\%TrFr) + 0.097 \quad [8]$$

La ecuación 7 es para obtener el valor de n para el lote "A" y la ecuación 8 para el lote "B".

4.2.7 Análisis de dureza superficial en la sección transversal de los alambres del Lote "A" y Lote "B".

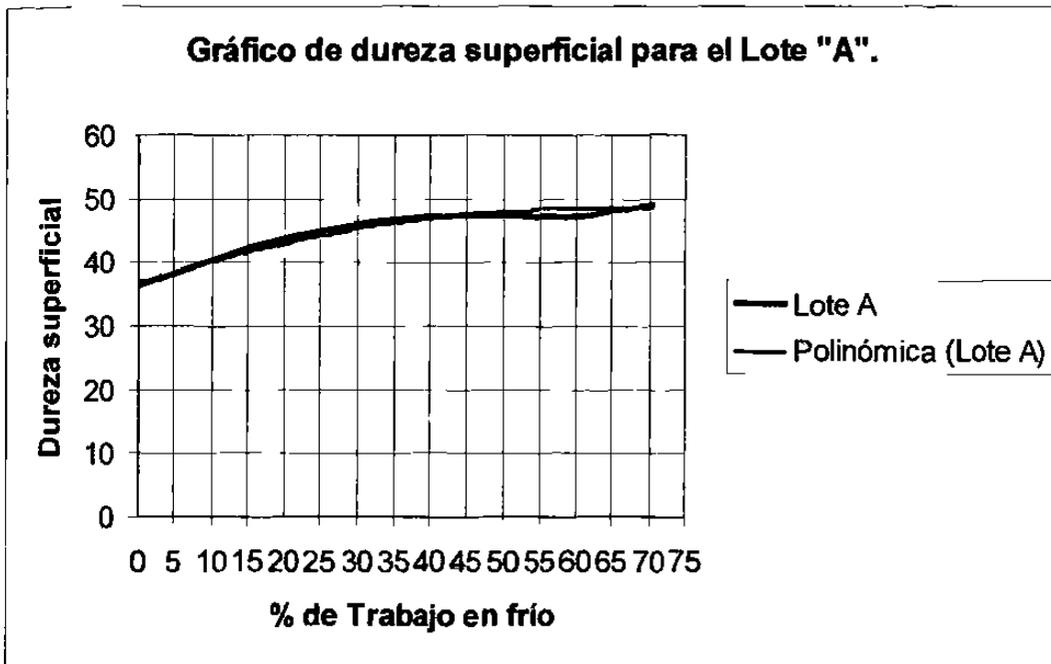


Figura 24 Dureza superficial de alambres del lote "A".

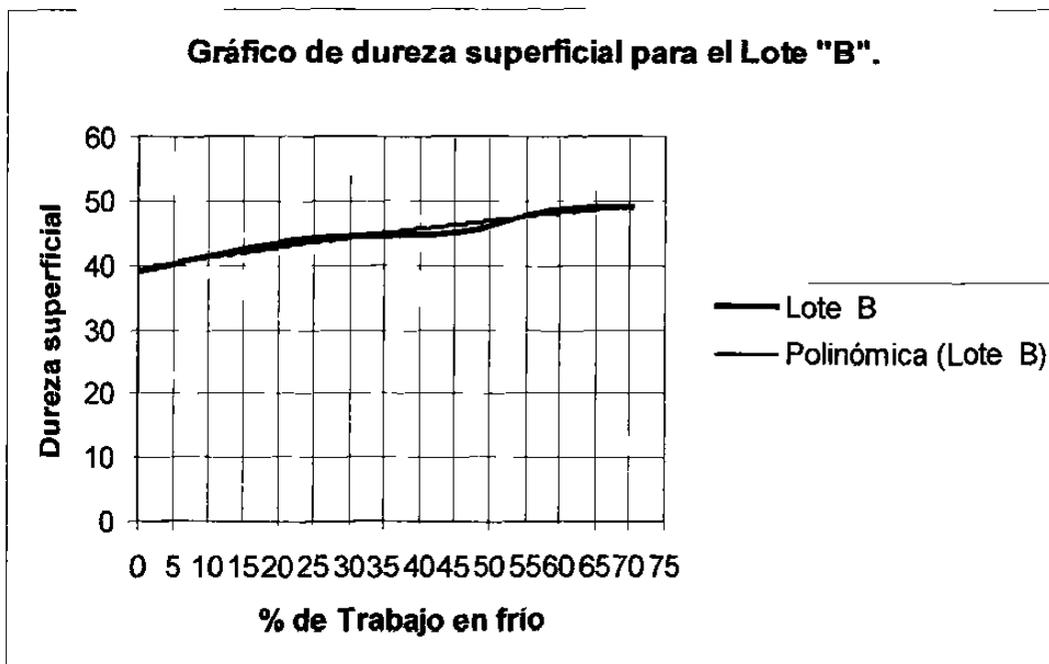


Figura 25 Dureza superficial de alambres del lote "B".

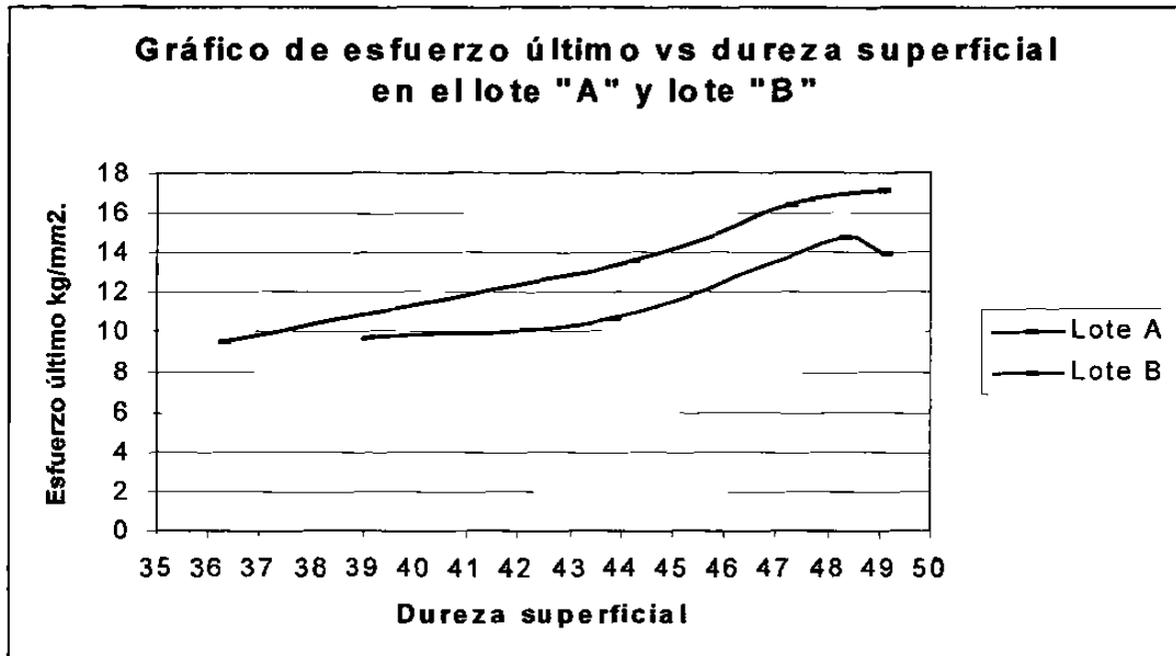


Figura 26 Variación de dureza en función del incremento de esfuerzo último.

En la figura 24 y 25 se observa que la dureza superficial en la sección transversal del aluminio del lote "A" y "B" se incrementa conforme el se incrementa la deformación en frío, en este análisis no se observa una diferencia sustancial entre los dos lotes.

$$D_A = -0.003 (\%TrFr)^2 + 0.3758(\%TrFr) + 36.575 \quad [9]$$

$$D_B = -0.0006(\%TrFr)^2 + 0.1775(\%TrFr) + 39.292 \quad [10]$$

La ecuación 9 es para obtener el valor Dureza superficial en función del esfuerzo último para el lote "A" y la ecuación 10 para el lote "B".

En la figura 26 se observa que aunque la dureza de ambos materiales llego en el último paso de trefilado llego a un valor de 49 el esfuerzo último marca la diferencia entre los dos lotes.

4.2.8 Determinación de datos y propiedades de los alambres del lote "A" y "B" en cada paso de trefilado.

Datos y propiedades de alambres del lote "A" y "B" de los diámetros de 9.525, 8.43, 7.11 mm, 6.12 mm y 5.19 mm de diámetro, en esta tabla se muestran la mayoría de los datos y algunas propiedades obtenidas con estos.

Datos y Propiedades.	9.525 mm		8.43 mm		7.11 mm	
	Lote A	Lote B	Lote A	Lote B	Lote A	Lote B
Diametro Inicial (di) mm	9.525	9.53	8.43	8.43	7.11	7.11
Longitud Inicial (li) mm	254.00	254.00	254.00	254.00	254.00	254.00
Area Inicial (Ai) mm ²	71.21	71.21	55.78	55.78	39.68	39.68
Longitud Recta (lr) mm	254.00	254.00	254.00	254.00	254.00	254.00
Di metro Final (df) mm	4.00	3.68	3.17	3.25	3.17	3.17
Longitud Final (lf) mm	266.70	266.70	265.10	265.10	265.90	263.50
Area Final (Af) mm ²	12.57	10.63	7.88	8.29	7.88	2.45
Deformación total (et)	0.051	0.059	0.058	0.053	0.057	0.050
Limite de proporcionalidad	6.00	7.13	10.04	8.61	12.92	11.20
Limite de elasticidad	6.60	7.63	10.61	8.66	13.57	11.95
Esfuerzo de cedencia (So o Syp)	8.10	8.60	12.60	10.20	14.40	13.00
Esfuerzo máximo o Ultimo	9.41	9.63	13.48	10.65	15.28	14.63
Esfuerzo de ruptura aparente.	1.90	3.05	5.02	2.47	5.99	5.98
Esfuerzo de trab. (Sw) con F.S. De 4.5	2.03	2.15	3.15	2.55	3.60	3.25
Modulo de Young (E) Kg/mm ²	840.0	600.0	890.0	760.0	940.0	1140.0
Resiliencia unit. (R.U.)	0.04	0.06	0.09	0.07	0.11	0.07
Tenacidad unitaria (T.U.)	0.45	0.54	0.76	0.55	0.85	0.69
Limite de endurencia (Se).	4.71	4.82	6.74	5.33	7.64	7.32
Ductilidad % de reducción de área (q)	82.35	85.07	85.87	85.14	80.14	93.83
Ductilidad % de elongación.	5.00	5.00	4.37	4.37	4.69	3.74
Exponente de endurecimiento x def "n"	0.12	0.10	0.11	0.13	0.08	0.09
Constante de endurecimiento x def "K"	4.30	3.95	4.50	4.65	4.10	4.25
Dureza superficial (prueba 15T).	36.22	38.99	44.15	43.8	47.28	44.95

Tabla 8 muestra los principales valores de los datos obtenidos en las experimentación y algunas propiedades calculadas con los mismos.

Continuación de Tabla 8.

Datos y Propiedades.	6.12 mm		5.19 mm	
	Lote A	Lote B	Lote A	Lote B
Diametro Inicial (di) mm	6.12	6.12	5.19	5.19
Longitud Inicial (li) mm	254.00	254.00	254.00	254.00
Area Inicial (Ai) mm ²	29.40	29.40	21.12	21.12
Longitud Recta (lr) mm	254.00	254.00	254.00	254.00
Diametro Final (df) mm	2.65	2.19	2.18	2.57
Longitud Final (lf) mm	265.10	261.90	263.50	261.93
Area Final (Af) mm ²	5.51	3.76	3.73	5.18
Deformación total (et)	0.052	0.042	0.049	0.041
Límite de proporcionalidad	12.20	11.00	13.31	10.70
Límite de elasticidad	12.31	11.94	14.20	11.33
Esfuerzo de cedencia (So o Syp)	14.80	18.00	15.90	12.70
Esfuerzo máximo o Último	16.39	14.80	17.13	13.92
Esfuerzo de ruptura aparente.	6.80	5.36	7.28	4.53
Esfuerzo de trab. (Sw) con F.S. De 4.5	3.70	4.50	3.98	3.18
Modulo de Young (E) Kg/mm ²	1400.0	1233.3	1225.0	1200.0
Resiliencia unit. (R.U.)	0.08	0.13	0.10	0.07
Tenacidad unitaria (T.U.)	0.81	0.69	0.81	0.55
Límite de endurencia (Se).	8.20	7.40	8.57	6.96
Ductilidad % de reducción de área (q)	81.26	87.20	82.33	75.47
Ductilidad % de elongación.	4.37	3.11	3.74	3.12
Exponente de endurecimiento x def "n"	0.13	0.09	0.10	0.09
Constante de endurecimiento x def "K"	4.82	4.30	4.60	4.33
Dureza superficial (prueba 15T).	47.21	48.25	49	49.06

Continuación de tabla 8.

En la tabla 8 se puede observar la deferencia de algunas propiedades del aluminio, como por ejemplo se observa que la deformación total de los alambres del lote "A" es mayor que la del lote "B" y el límite de proporcionalidad en todos los pasos es mayor el del lote "A" que el del lote "B".

Las afectaciones en las propiedades mecánicas del aluminio del lote "B" se ven afectadas por lo siguiente.

En el análisis químico comparativo del Lote "A" vs el lote "B" se muestra una diferencia en los principales elementos aleantes, En el lote "A" se muestra un contenido de Fe+Si de 0.203% mientras que para el lote "B" el contenido de Fe+Si es de 0.1364.

En el tomo 9 de la ASM en la figura 25 se muestra el efecto que tiene el contenido del Fe+Si en el esfuerzo de tensión del aluminio, esta gráfica se muestra ampliada (figura 27) para observar el rango en el que se encuentra el aluminio 1350.

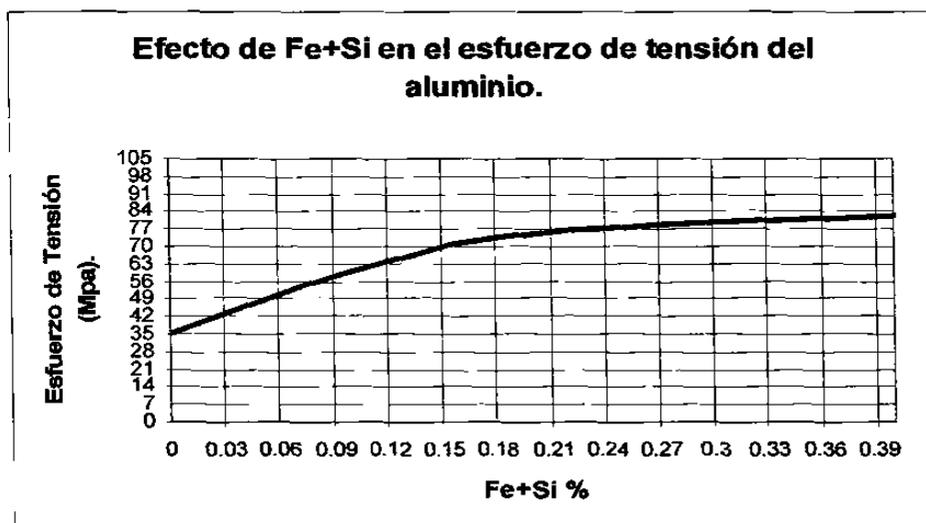


Figura 27 Efecto del Si+ Fe en el aluminio puro.

El esfuerzo último de tracción se ve afectado como muestra la figura 27. Teniendo un % de 0.1364 de Fe+Si el esfuerzo es de 65 MPa (6.62 Kg/mm^2) en tanto que para un % de 0.203 el esfuerzo es de 76 Mpa (7.74 Kg/mm^2), por lo que con un aumento del 0.06 % de Fe+Si hubo un incremento en el esfuerzo de 17%.

Pequeñas cantidades de silicio reducen la tendencia a la fractura por actuar como obstáculos cuando la grieta se desplaza.

El hierro es la más alta impureza encontrada en el aluminio puro, este tiene una muy buena solubilidad cuando el aluminio esta fundido, pero en estado sólido presenta muy baja solubilidad (0.04%). Mucho del acero presente en el aluminio puede aparecer como una segunda fase inter metálica en combinación con aluminio o otros elementos aleantes, Gracias a esta limitada solubilidad es empleado en aluminio para conductores eléctricos ya que provee un incremento en la resistencia a la la tensión (figura 27) y mejores características al creep a elevadas temperaturas.

El hierro hace que el tamaño de grano se reduzca, debido que tiene un punto de fusión más elevado que el aluminio crea puntos de nucleación en la fundición(6).

Los compuestos intermetálicos son generalmente duros y frágiles pero pueden proporcionar un excelente endurecimiento por dispersión a la matriz suave.(2)

4.3 Análisis microestructural de las muestras en Microscopio óptico y electrónico de barrido.

Se verificaron las muestras ya pulidas a pocos aumentos (66x), a 1000 aumentos (como máximo) y en el SEM hasta 30,000 aumentos de ser necesario.

4.3.1 Análisis microestructural realizado con el microscopio óptico a 66 aumentos.

Después de someter las muestras al ataque químico se observa a 66 aumentos una clara diferencia en la morfología y distribución de los granos, en el Lote "A" (figura 28 A) se observa que desde el centro del alambre se generan hacia la periferia los granos teniendo una mayor densidad en el centro este tipo de acomodamiento u ordenamiento hace que las propiedades mecánicas del aluminio sean mayores.

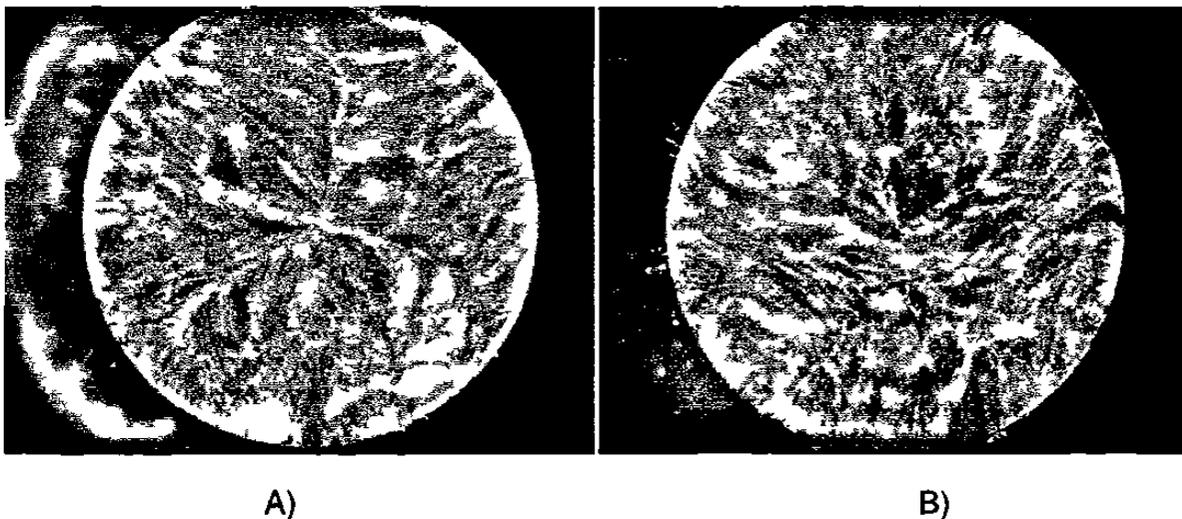


Figura 28 A) muestra la morfología del alambre de 7.11 mm de diámetro del lote "A", B) muestra la morfología del alambre de 7.11 mm de diámetro del lote "B".

Este efecto es debido al historial de trabajado o deformado del material, si el material en el proceso de laminado en caliente fue deformado proporcionalmente en todas las direcciones el arreglo morfológico del alambre será como el del lote "A", pero si el material fue deformado solamente dos direcciones debido al sistema de rodillos laminadores esto creara una morfología como la del lote "B" (figura 28 B).

Las morfologías de todos los pasos se muestran en el Apéndice II.

4.3.2 Análisis de tamaños de grano e imperfecciones en microscopio óptico del lote "A" y "B" en el alambroón de 9.525 mm de diámetro.

En la figura 29 se observan los granos y las imperfecciones encontradas la figura 29 A) y B) muestran grietas encontradas en la periferia del aluminio del lote "B".

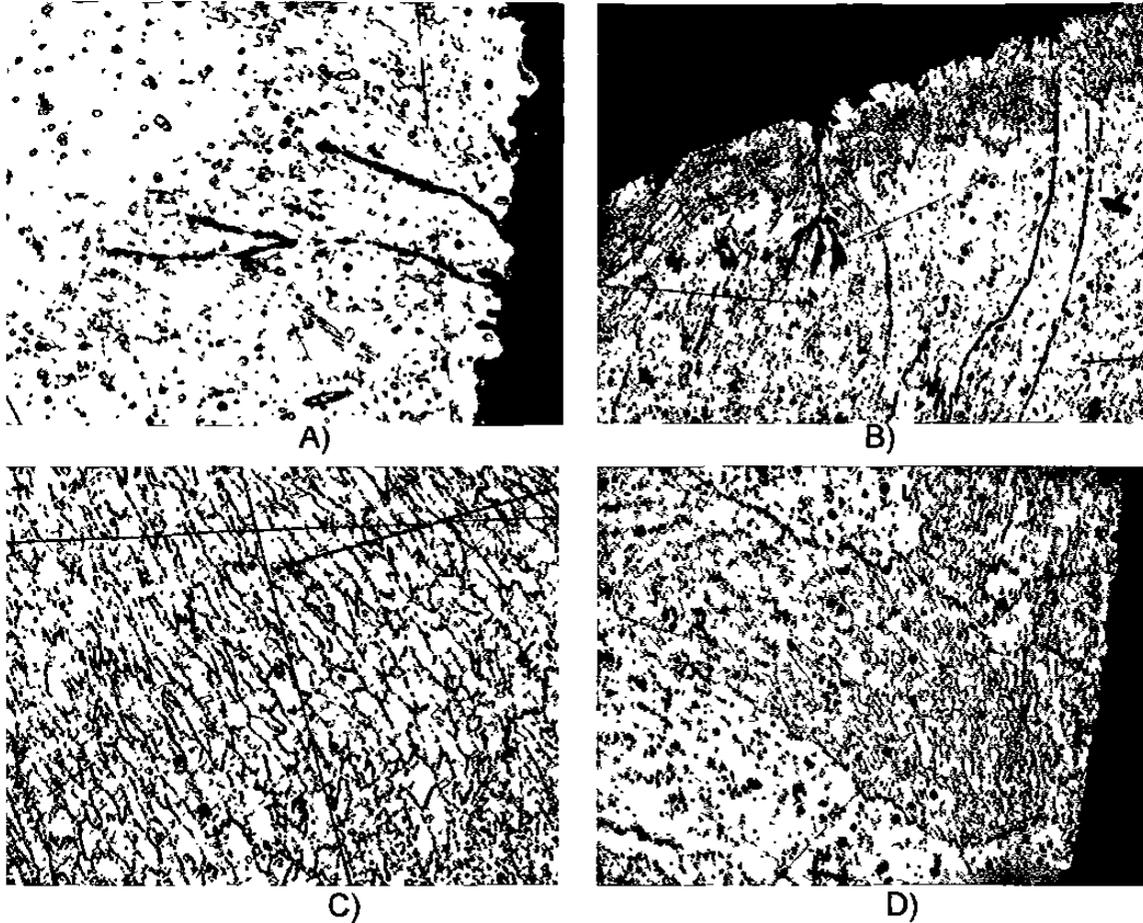


Figura 29 A) Alambre del lote "B" a 500x, B) alambre del lote "B" a 200x, C) Alambre del lote "B" a 200x. D) Alambre del lote "A" a 200x.

4.3.3 Análisis de tamaños de grano e imperfecciones en microscopio óptico del lote "A" y "B" en el alambre de 8.43 mm de diámetro.

En la figura 30 se encuentran las grietas o defectos superficiales en el alambre del aluminio del lote "B" y se muestra que los granos no tienen uniformidad en ambos lotes debido al trabajado en frío.

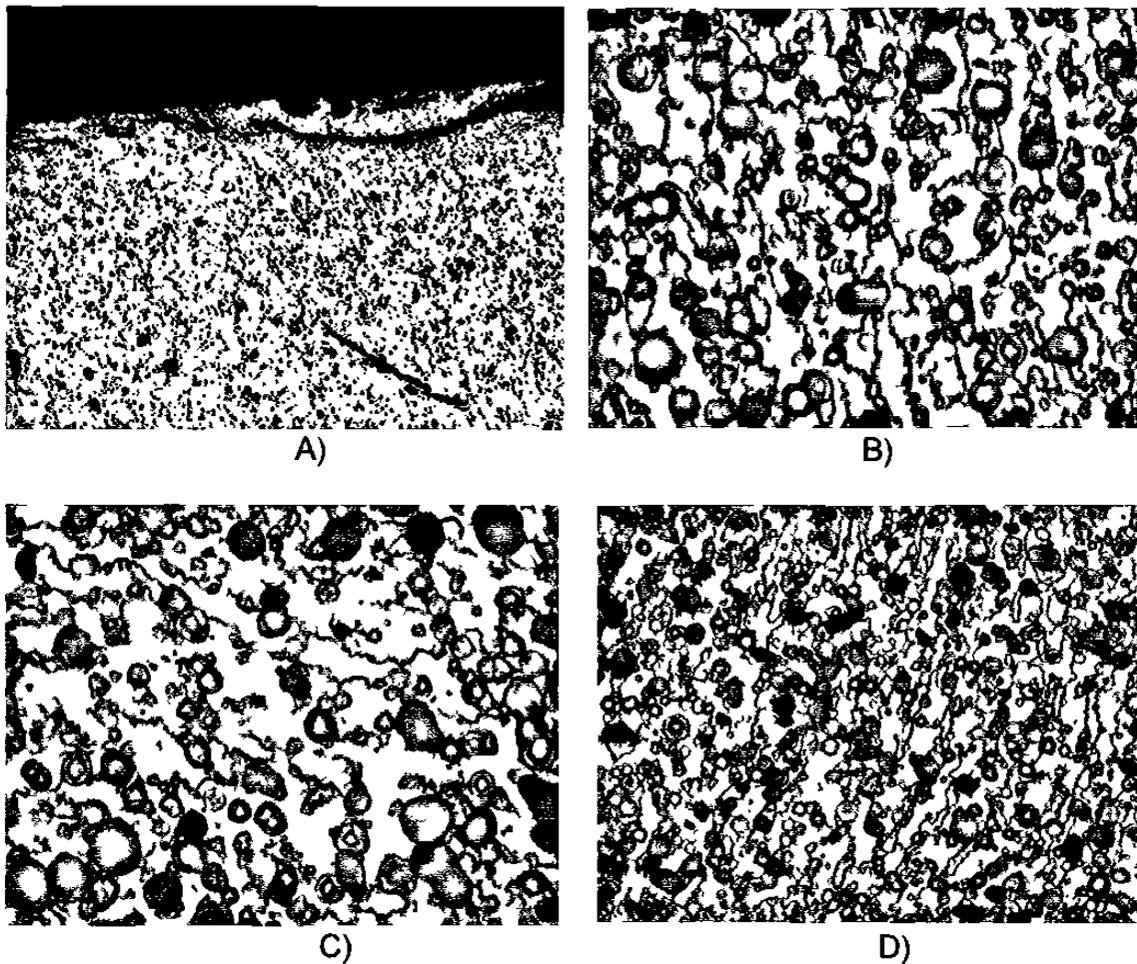


Figura 30 A) Alambre del lote "B" a 200x, B) alambre del lote "B" a 1000x, C) Alambre del lote "A" a 500x, D) alambre del lote "A" a 1000x.

4.3.4 Análisis de tamaños de grano e imperfecciones en microscopio óptico del lote "A" y "B" en el alambre de 7.11 mm de diámetro.

En la figura 31 se observan imperfecciones en la superficie del alambre del lote "B".

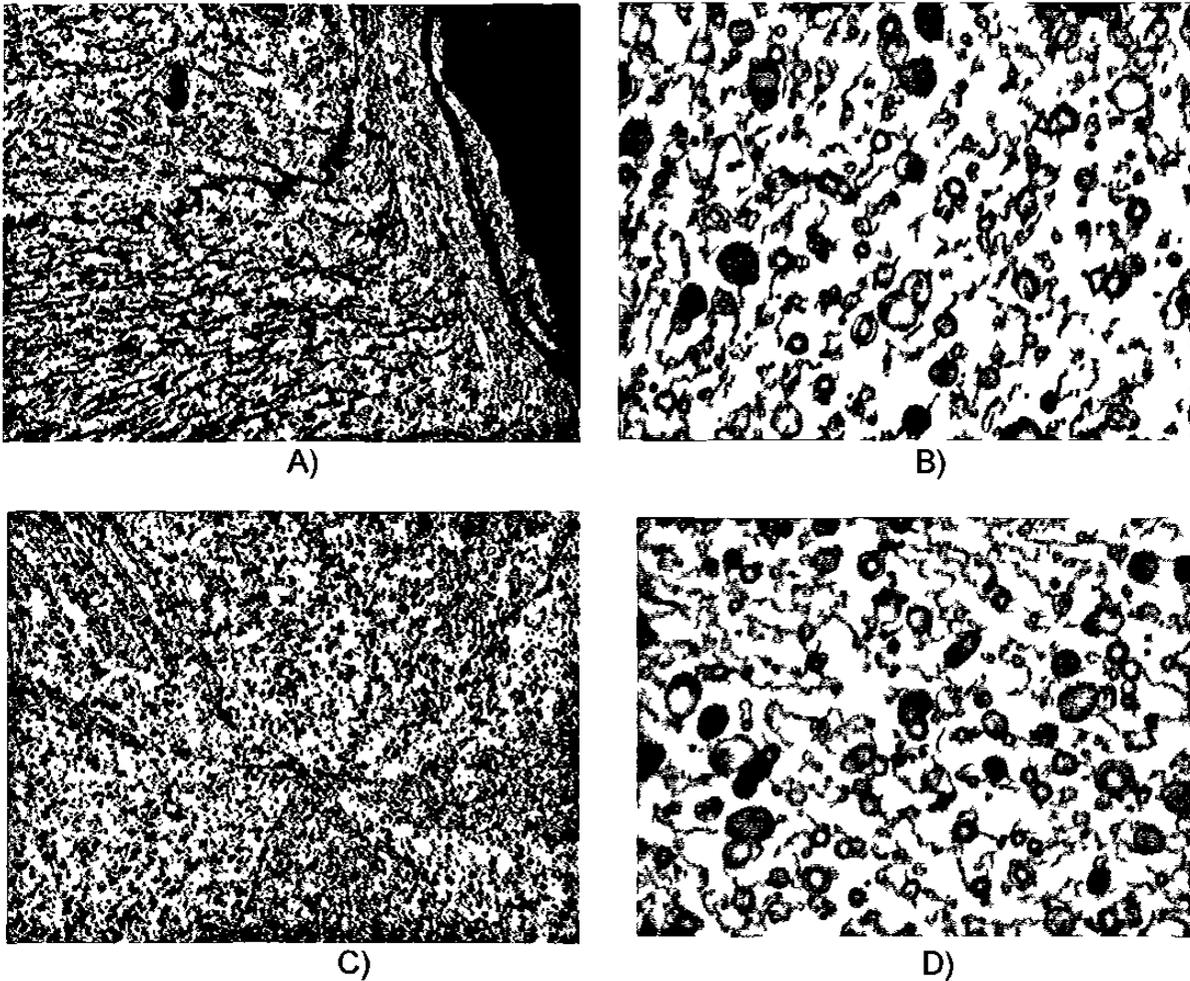


Figura 31 A) Alambre del lote "B" a 200x, B) alambre del lote "B" a 1000x, C) Alambre del lote "A" a 500x , D) alambre del lote "A" a 1000x.

4.3.5 Análisis de tamaños de grano e imperfecciones en microscopio óptico del lote "A" y "B" en el alambre de 6.12 mm de diámetro.

En la figura 32 se muestran imperfecciones en la superficie del aluminio del lote "B", con respecto al tamaño de grano de ambos lotes no se aprecia correctamente ya que no tienen una forma y distribución uniforme.

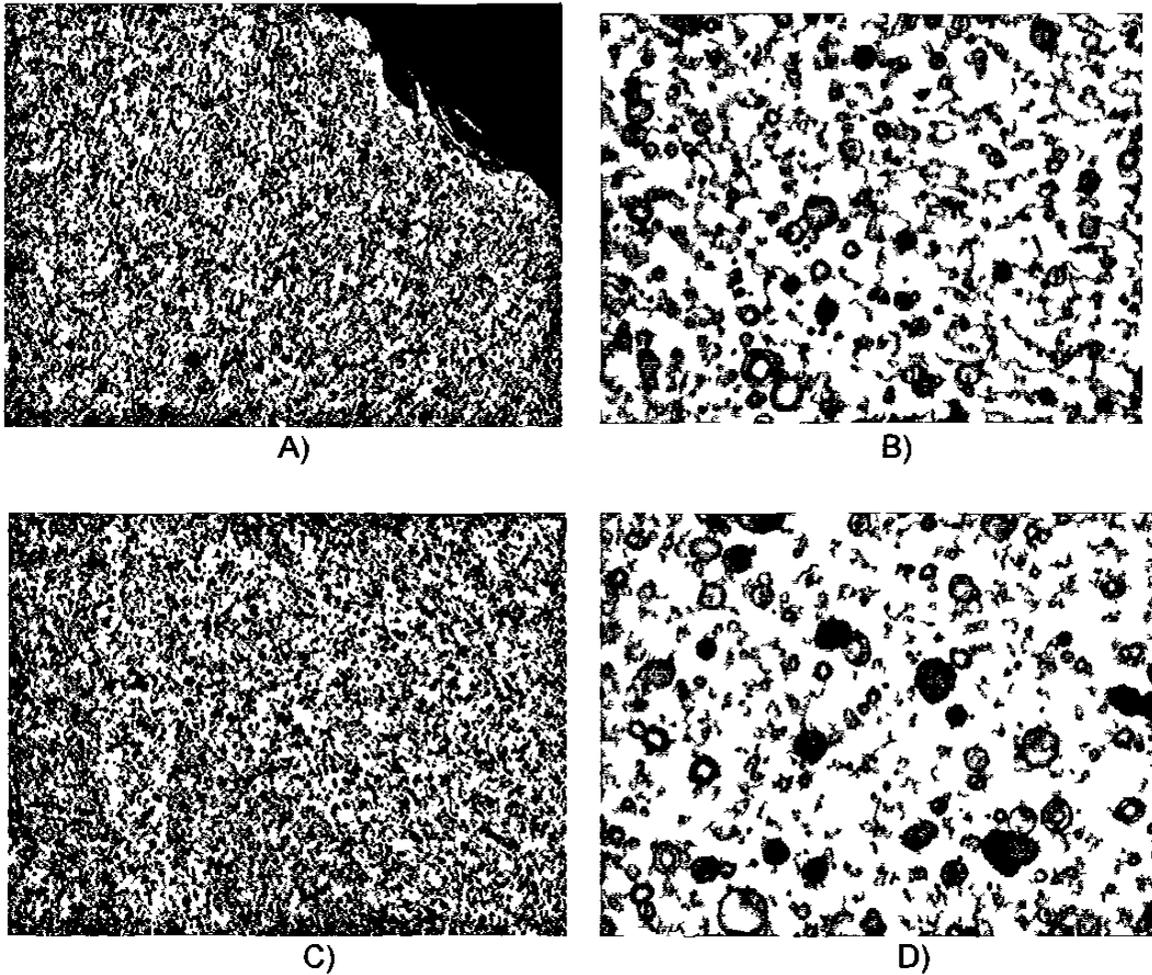


Figura 32 A) Alambre del lote "B" a 200x, B) alambre del lote "B" a 1000x, C) Alambre del lote "A" a 200x, D) alambre del lote "A" a 1000x.

Al analizar el tamaño de grano después del ataque químico y darnos cuenta que los granos están deformados y en diferentes direcciones en ambos lotes pudimos observar que el alambrón del lote "B" desde antes de entrar el proceso de trefilado presenta imperfecciones o grietas [figura 29 A), B), figura 30 A), figura 31 A), figura 32 A)] las cuales se encuentran en todo lo largo del alambre (aunque solo se analizaron fracciones X de la longitud del material), las cuales perjudican la resistencia a la tensión del material debido a que actúan como iniciadoras de grieta.

Estas grietas son debido a una falta de control en la cantidad y velocidad de deformación que se suministro al material en el rolado en caliente, así como a la deformación solamente en ciertas direcciones y no en toda la periferia y uniformemente.

4.3.6 Análisis de tamaños de grano e imperfecciones en microscopio óptico del lote "A" y "B" en el alambre de 5.19 mm de diámetro.

En la figura 33 se muestran una mayor cantidad de partículas intermetálicas en el lote "A" [figura 33 C)] que en el lote "B" [figura 33 B)].

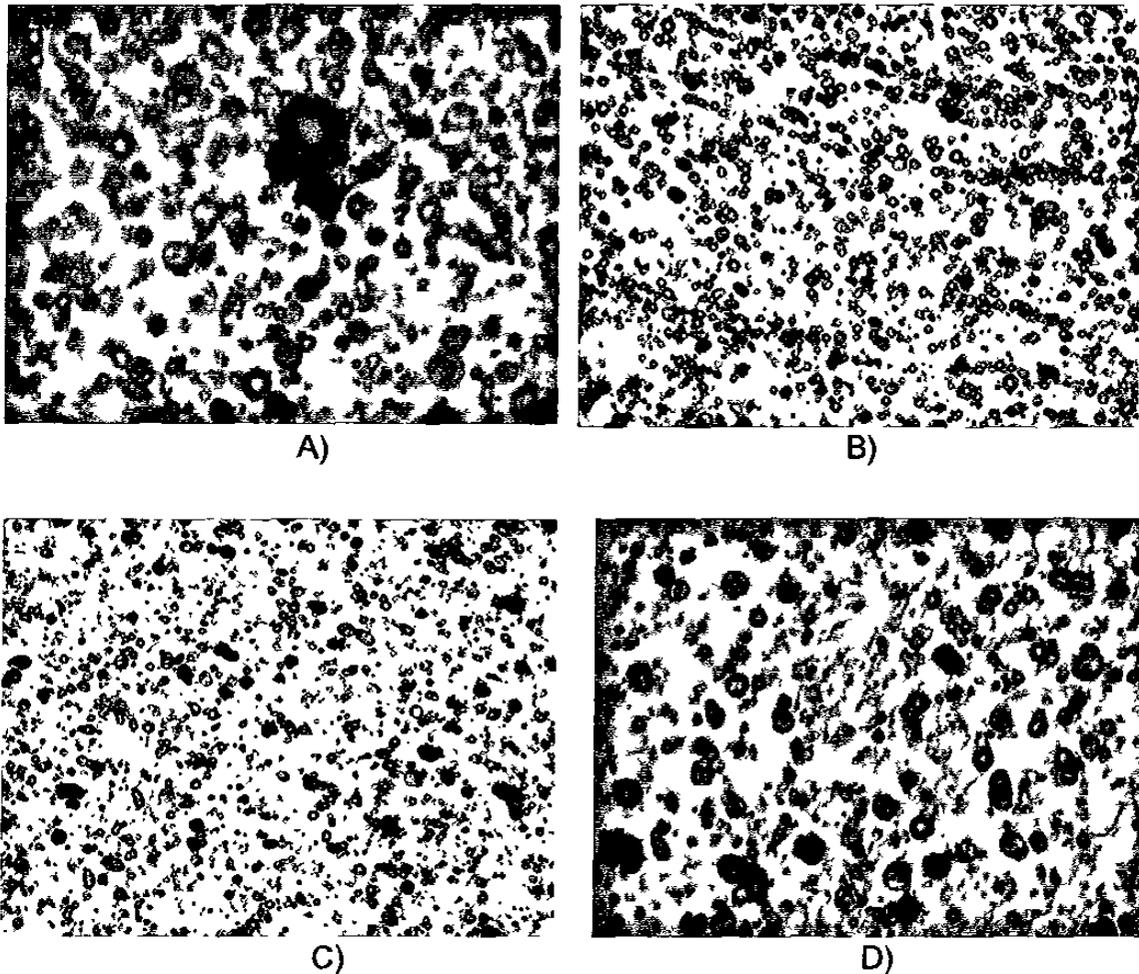


Figura 33 A) Alambre del lote "B" a 1000x, B) alambre del lote "B" a 500x, C) Alambre del lote "A" a 500x , D) alambre del lote "A" a 1000x.

En el apéndice III se muestran todas las imágenes del análisis de la microestructural después del ataque químico con microscopio óptico.

4.3.7 Análisis microestructural de las muestras en Microscopio electrónico de barrido (SEM) para el lote "A" y "B".

El análisis microestructural de las muestras se realizó solo sobre los alambres de 9.525 y 5.19 mm de diámetro del lote "A" y "B", el análisis se realizo antes de dar el ataque químico al aluminio de ambos lotes.

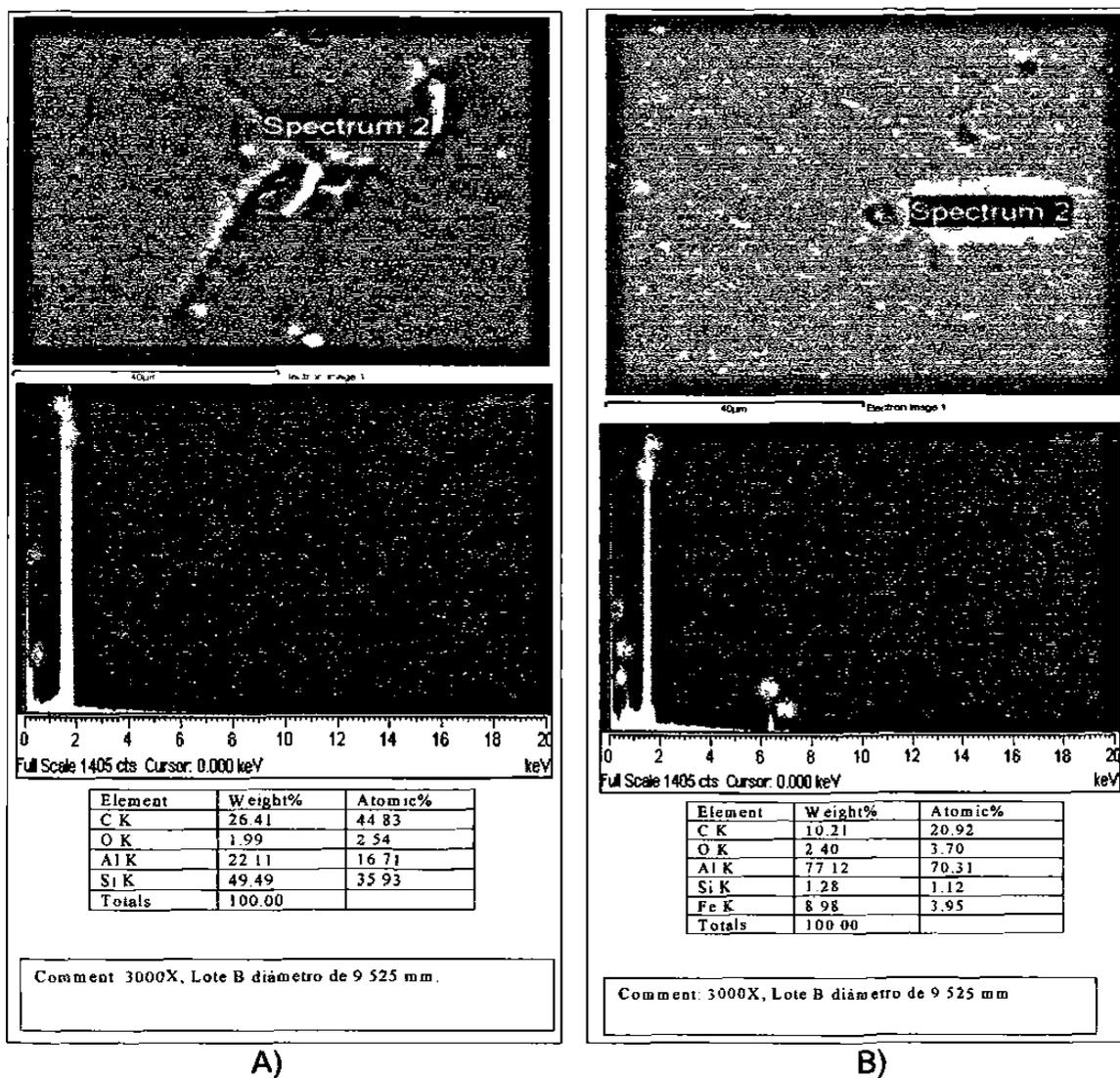
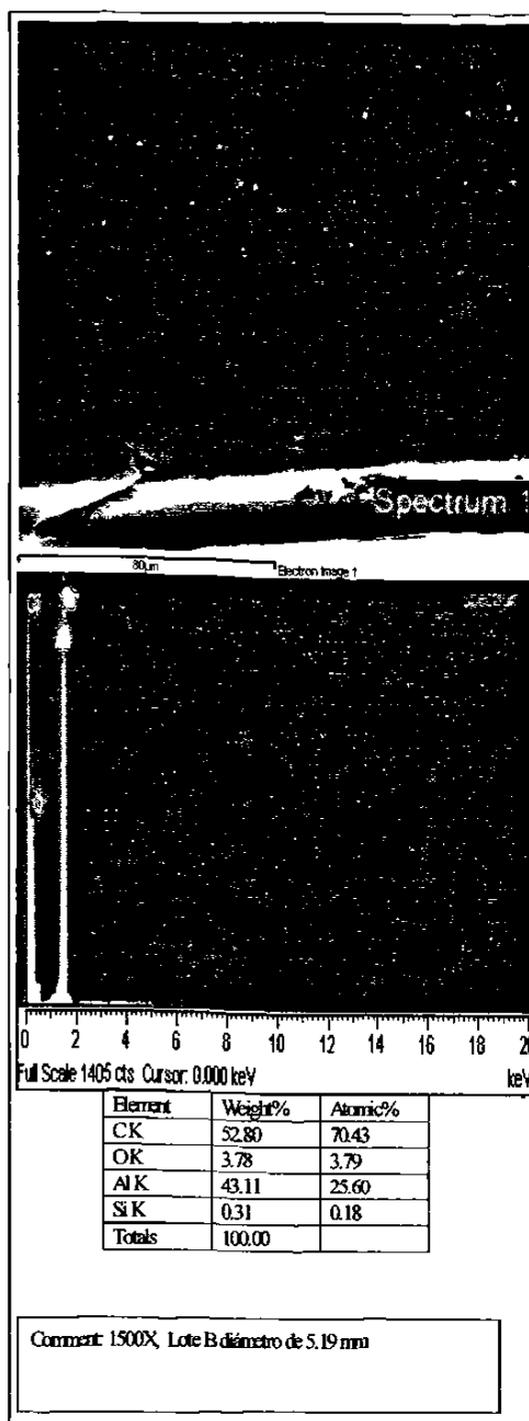
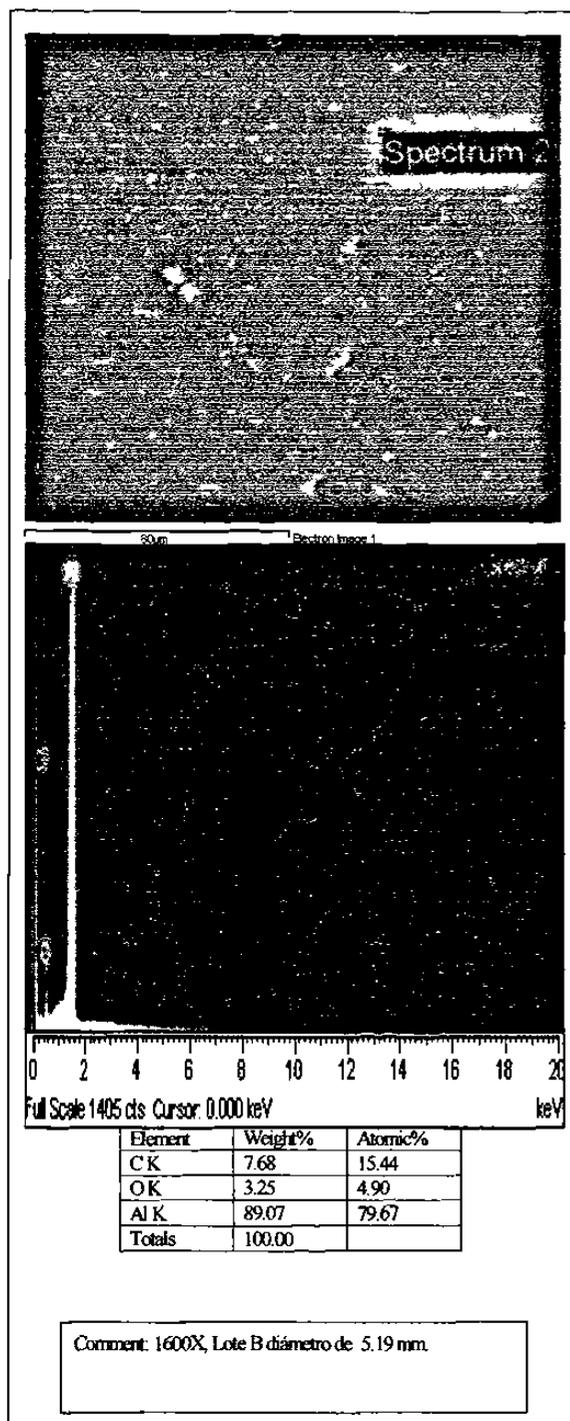


Figura 34 Lote "B" A) partícula de silicio en forma de precipitado, B) Hierro en forma de intermetálico.



A)

B)

Figura 35 Lote "B" A) Imperfección en la matriz de aluminio, B) Grietas encontradas en la periferia del alambre.

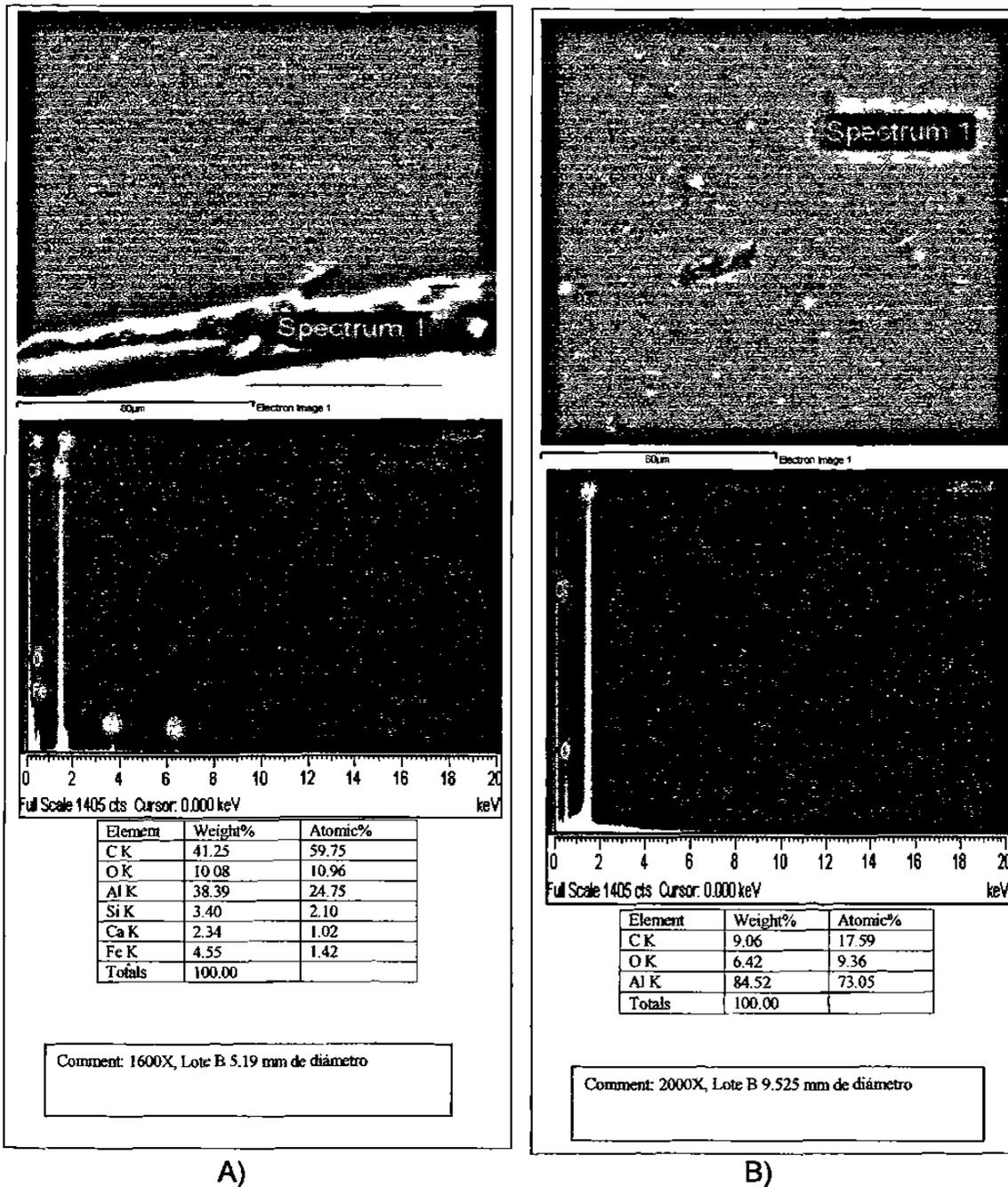


Figura 36 Lote "B" A) Grietas e imperfecciones encontradas en la periferia, B) Huecos o imperfecciones encontrados en la matriz de aluminio.

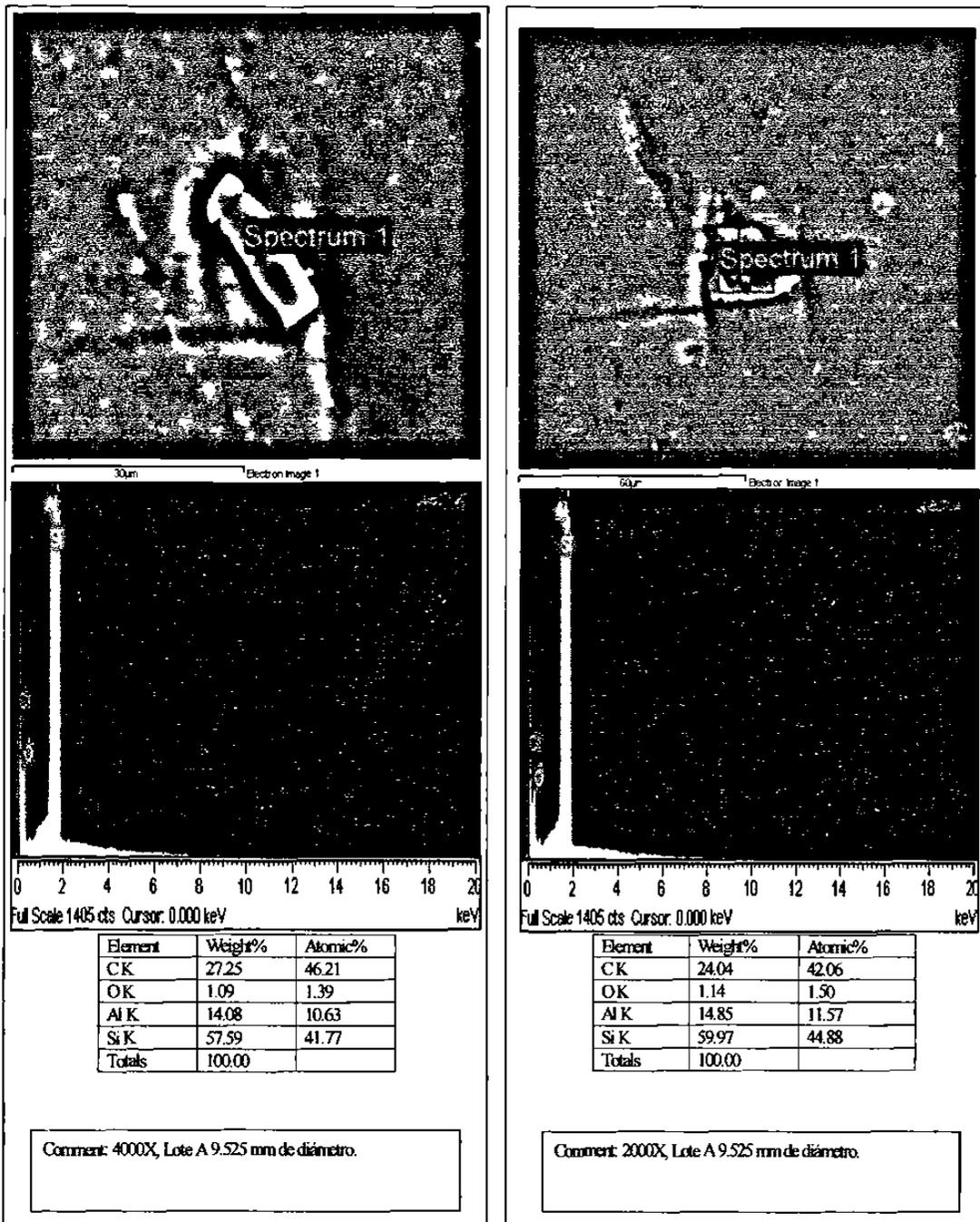


Figura 37 Lote "A" A) Partícula de silicio, B) Partícula de silicio.

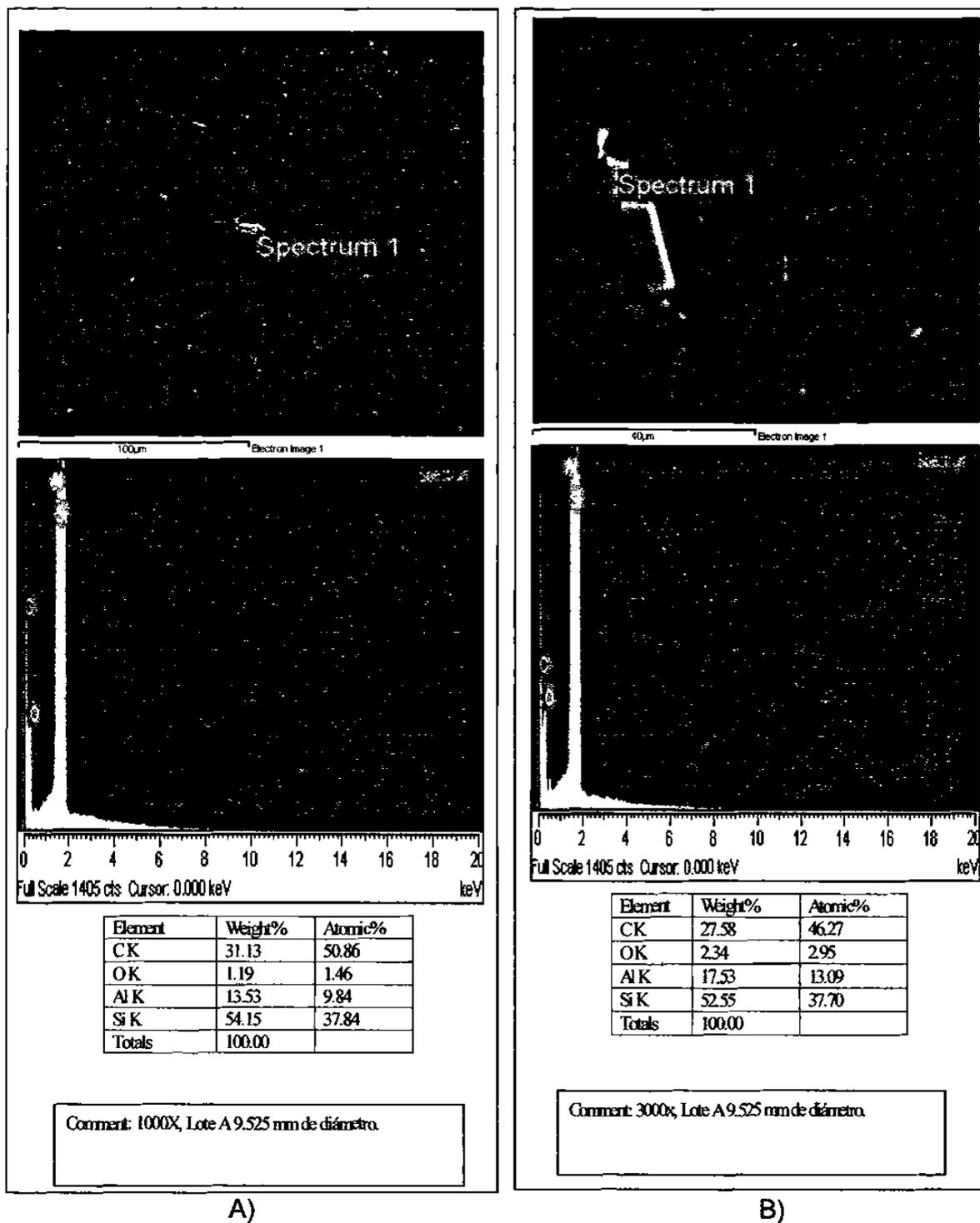


Figura 38 Lote "A" A) Partícula de silicio, B) Partícula de silicio.

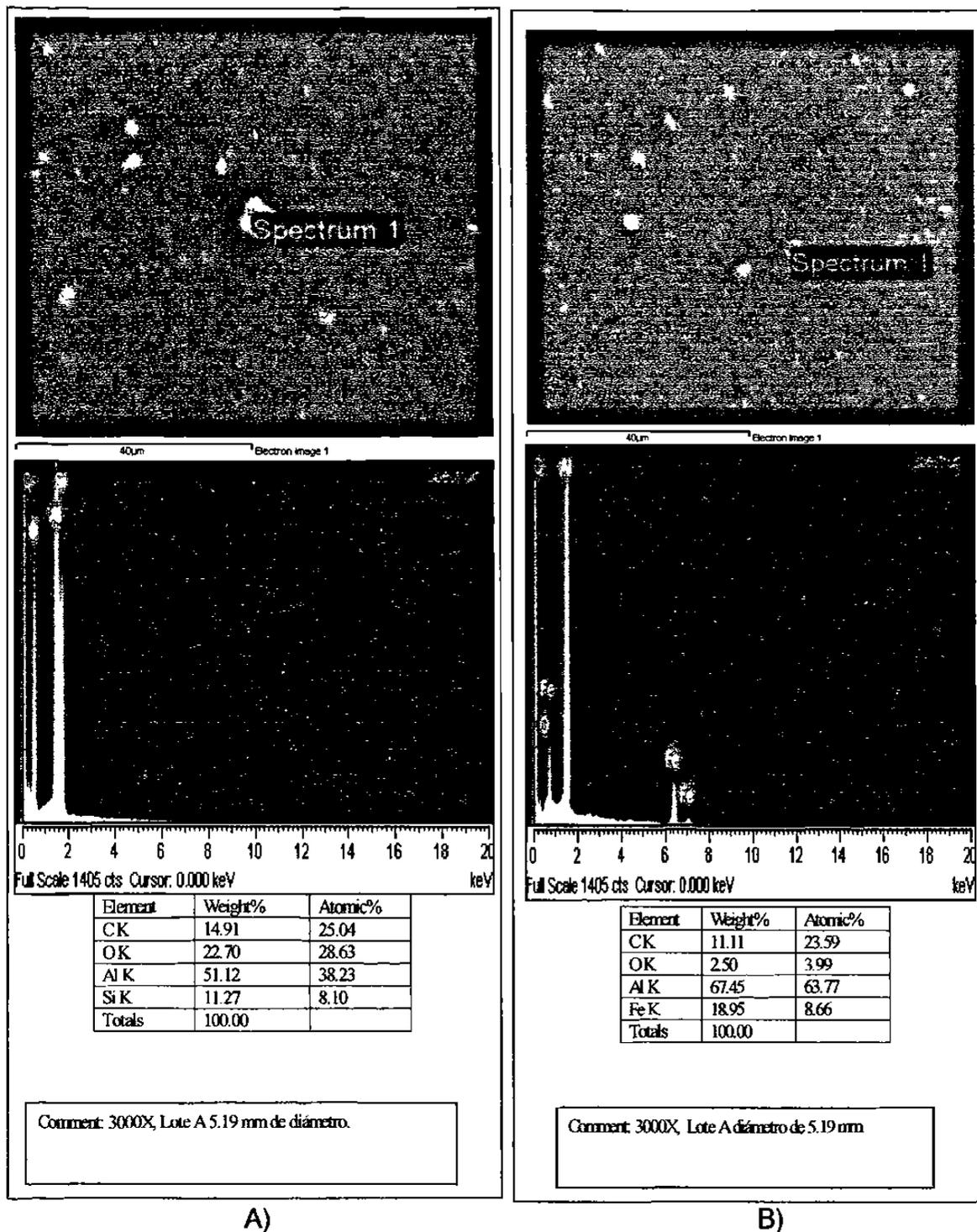
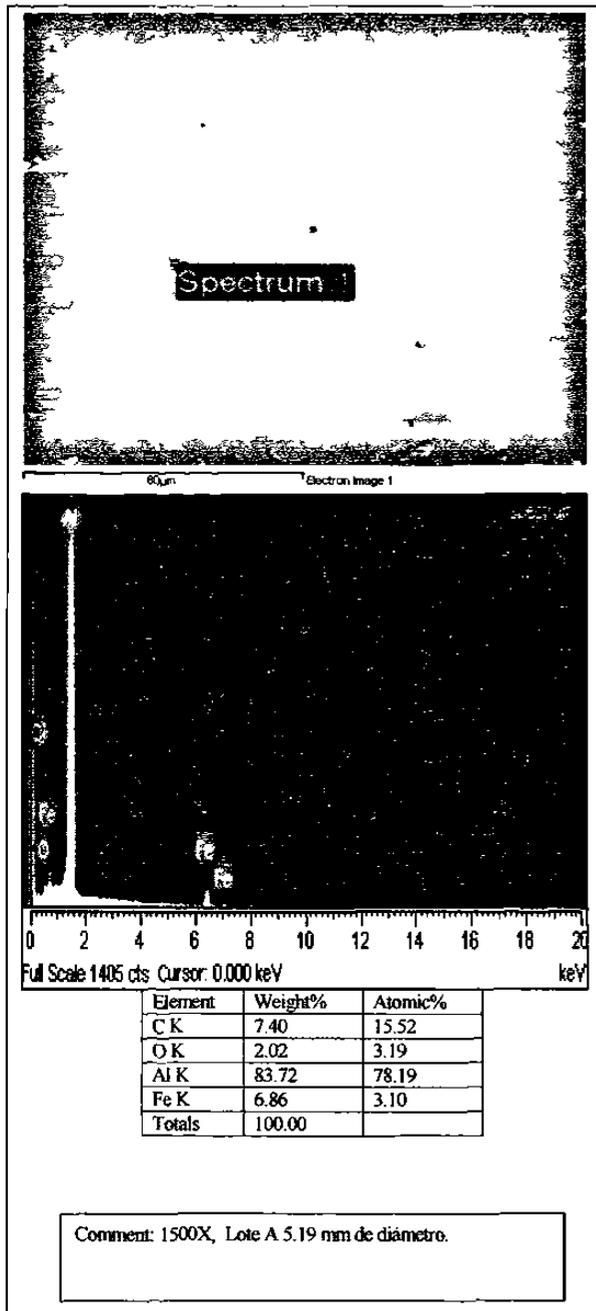
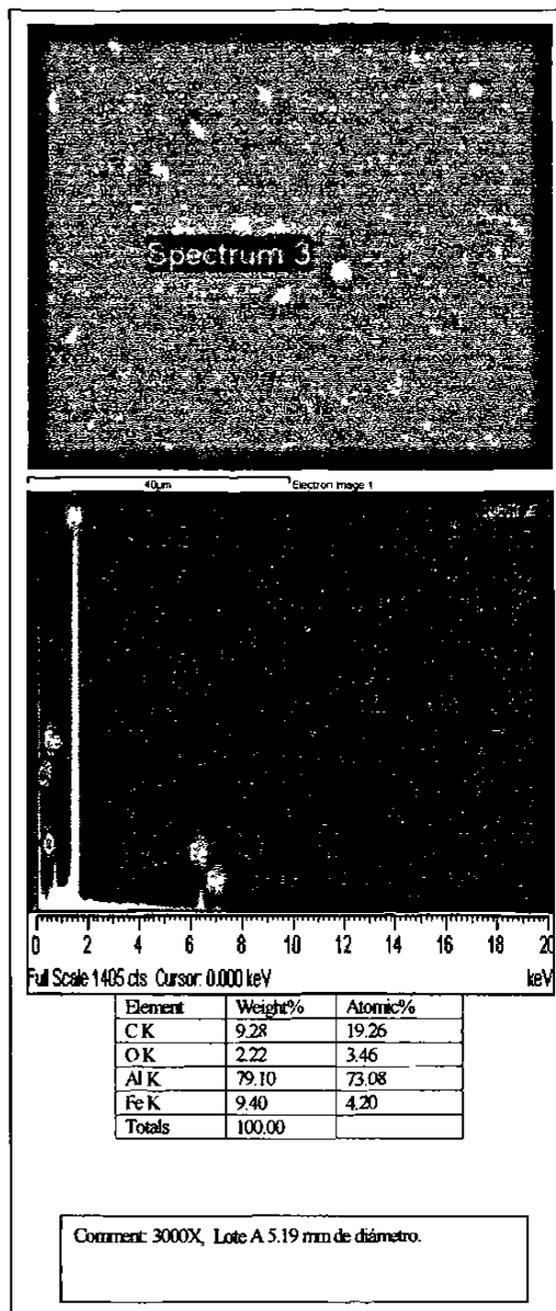


Figura 39 Lote "A" A) Partícula de silicio, B) Partícula de Hierro en forma de intermetalico.



G)



H)

Figura 40 Lote "A" A) Hierro en forma de intermetálico, B) Hierro en forma de intermetálico.

En el análisis realizado en el microscopio electrónico de barrido se localizaron una mayor cantidad de partículas de silicio en el lote "A" [Figura 37 A) y B), Figura 38 A) y B), y Figura 39 A)] que en el lote "B" (Figura 34 A). El silicio presenta una baja solubilidad en aluminio creando precipitados (9).

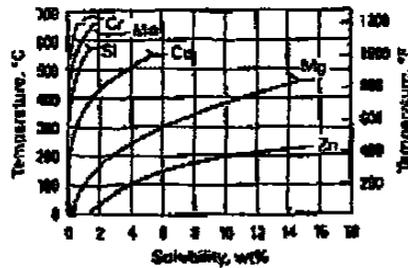


Figura 41 Equilibrio binario de solución en sólido como función de la temperatura para elementos aleantes del aluminio.

Algunos elementos como el galio, cobre, manganeso, cromo y silicio tiene una solubilidad de menos del 10% pero mayor al 1%, el magnesio presenta una solubilidad en estado sólido de mas de 10%.(6)

Para que exista una buena solución sólida se deben cumplir con tres puntos importantes:(2)

- Los átomos de los materiales deben ser de tamaño similar con no más de un 15% de diferencia en el radio atómico, para minimizar la deformación de la red.
- Los materiales deben tener la misma estructura cristalina.
- Los átomos de los materiales deben tener la misma valencia y electronegatividad similares.

Como el silicio presenta una estructura de CC y el aluminio una CCC es poco probable que se presente una solubilidad significativa entre estos dos elementos.

Por otro lado el radio atómico del silicio es de 1.176 y el del aluminio de 1.432 lo cual representa un 21% de diferencia. Por lo cual no tienen una buena solubilidad en estado sólido.

Debido a que el silicio en estado sólido presenta una muy baja solubilidad crea precipitados. Estos precipitados actúan como obstáculos en el trayecto de las dislocaciones al momento de efectuarse la ruptura dando como resultado una mayor resistencia a la ruptura en el aluminio del lote "A".

Cuando se añade suficiente elemento de aleación para exceder el límite de solubilidad, se produce una aleación de dos fases, permitiendo que la aleación se endurezca por dispersión. Se denomina la fase continua, que usualmente está presente en mayor cantidad, la matriz. La segunda fase, por lo común presente en cantidades menores, es llamada precipitado.

Existen ciertas consideraciones generales para determinar en qué forma las características de la matriz y del precipitado afectan las propiedades generales de la aleación.

- La matriz debe ser blanda y dúctil, y el precipitado duro y frágil, el precipitado interfiere con el deslizamiento, siendo que la matriz proporciona al menos cierta ductilidad.
- El precipitado duro y frágil debe ser discontinuo, y la matriz continua blanda y dúctil. Este arreglo capacita a la matriz para impedir las grietas, que se forman, que se forman en el precipitado frágil.
- Las partículas del precipitado deben ser pequeñas y numerosas, incrementando la posibilidad de que interfieran en el proceso de deslizamiento.
- Las partículas del precipitado deben ser redondeadas en lugar de puntiagudas o afiladas. La forma redondeada es menos propensa a iniciar una grieta.
- Grandes cantidades del precipitado incrementan la resistencia de la aleación.(2)

4.4.- Especificaciones.

4.4.1 Composición química.

Por especificación el máximo permitido por norma de Fe es de 0.40% (Vs .1124 que tiene el aluminio del lote "B") y de Si es de 0.10% (vs .024 que tiene el aluminio del lote "B"). Se recomienda especificar la cantidad de estos elementos como mínimo en conjunto de 0.240 para lograr un efecto favorable en las propiedades del aluminio.

4.4.2 Morfología del alambrón.

La morfología del material laminado en caliente deberá presentar una forma parecida a la de la figura 28 (A) ya que el no tener esta morfología puede afectar a las propiedades del material.

Por lo cual recomienda establecer como un estándar el tipo de morfología de la figura 28 (A). Al proveedor que no cumpla con este requisito se le recomienda verificar si el % de trabajado en caliente es el apropiado para este tipo de aluminio y verificar si la distribución de sus rodillos laminadores en caliente es la adecuada para lograr una deformación uniforme en todas las direcciones.

4.4.3 Microestructura del aluminio.

Después de hacer las correcciones necesarias al proceso de laminación se recomienda verificar el alambón de aluminio para validar que las grietas formadas desde la periferia hacia el centro del alambón han desaparecido.

4.4.4 Presencia de precipitado.

Debido a que el aluminio puro tiene propiedades mecánicas no muy buenas, es necesario incrementar estas con algunos elementos aleantes, es por eso que se recomienda plasmar en la especificación del aluminio 1350 que se verifique que el silicio forme precipitados redondeados (no en forma de agujas o puntiagudo) inmersos en la fase del aluminio puro.

5.- Conclusiones

- La cantidad de hierro más silicio afecta directamente proporcional a las propiedades mecánicas del aluminio 1350 en los rangos de 0.03% a .30%.
- La cantidad de precipitados de silicio afecta en forma directa a las propiedades mecánicas del aluminio 1350.
- La morfología obtenida por el rolado en caliente en el aluminio afecta en forma directa a las propiedades del mismo.
- Las grietas e imperfecciones en la superficie del alambre disminuyen las propiedades mecánicas del aluminio.

Referencias

- (1).- Procesos de manufactura Versión SI de B.H. Amstead P.h. F. Ostwald M.L. Begenman.
- (2).- La ciencia e ingeniería de los materiales de Donald R. Askeland.
- (3).- Adaptado de G. Dieter, Mechanical Metallurgy, McGraw- Hill, 1961, y otras fuentes.
- (4).- Manual de entrenamiento para operadores de trefilado de compañía fabricante de cables.
- (5).- Normas ASTM. (ASTM B230, ASTM B231 y ASTM B232.)
- (6).- Hanbook Volumen 2.
- (7).- Hanbook Volumen 3.
- (8).- Hanbook Volumen 9.
- (9).- Nueva enciclopedia temática el mundo del estudiante editorial cumbre.
- (10).- Diseño de elementos de maquinas 2 ed. Robert L Mott.
- (11).- Resistencia de materiales 4 Ed. Andrew Pytel Ferdinand L. Singer.