

U.N.M.d.P.



# EVOLUCIÓN DE DEFECTOS EN EL TREFILADO DE ALAMBRÓN DE ALUMINIO

Isabela Orsi

Director: Ing. Martín Iraizoz  
CoDirectora: Dra. Ing. Silvia Simison

Abril-2019



RINFI se desarrolla en forma conjunta entre el INTEMA y la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

## **Agradecimientos**

A Silvia Simison, por su aporte al desarrollo profesional de los estudiantes de la Universidad de Mar del Plata.

A María Victoria Canullo, por brindarme la posibilidad de desarrollar el trabajo en el Departamento de Metalurgia de Aluar. A Martín Iraizoz, por guiarme en el desarrollo del proyecto y enseñarme en cada paso. A Mauricio y a Jonatan que con paciencia me explicaron cómo usar los equipos en el laboratorio y el taller. A todo el departamento de metalurgia de Aluar que hicieron que durante seis meses me sienta a gusto trabajando.

A Roció y Alejandra que se transformaron en parte de mi familia durante la estadía en Puerto Madryn y que al final aceptaron que no importa el viento que haya, siempre hay que ir a la playa.

A mis amigas de siempre y a mis amigos de la facultad, por estar conmigo en el cierre de otra etapa y porque sigamos compartiendo momentos felices como este.

A Jose Luis, Elisabet, Donatela y Ornela por ser un pilar fundamental en mi vida y acompañarme siempre.

Y por último a mí, por no abandonar.

Gracias.



El siguiente trabajo se hizo en el marco de una pasantía en el año 2017 en Aluar en la ciudad de Puerto Madryn, Chubut.

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>7</b>
<b>1.1. ALAMBRÓN DE ALUMINIO PARA EL TRANSPORTE DE ENERGÍA</b>	<b>7</b>
1.1.1 ALEACIONES DE ALUMINIO UTILIZADAS EN LOS SISTEMAS DE TRANSPORTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA.	8
<b>1.2. PRODUCCIÓN DEL ALAMBRÓN. LÍNEA PROPERZI</b>	<b>8</b>
<b>1.3. TRATAMIENTOS PARA LA MEJORA DE PROPIEDADES</b>	<b>9</b>
<b>1.4. TREFILADO</b>	<b>11</b>
<b>1.5. LUBRICACIÓN</b>	<b>13</b>
<b>1.6. TREFILA</b>	<b>13</b>
<b>1.7. MÁQUINAS TREFILADORAS INDUSTRIALES</b>	<b>15</b>
<b>1.8. DEFECTOS</b>	<b>15</b>
<b>2. OBJETIVOS</b>	<b>16</b>
<b>3. EQUIPO Y MATERIALES UTILIZADOS</b>	<b>17</b>
<b>3.1. ALUMINIO</b>	<b>17</b>
<b>3.2. LUBRICANTE</b>	<b>17</b>
<b>3.3. TREFILAS</b>	<b>18</b>
<b>3.4. TREFILADORA</b>	<b>19</b>
<b>4. MÉTODOS</b>	<b>20</b>
<b>4.1. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL</b>	<b>20</b>
4.1.1. ENSAYO DE DUREZA	20
4.1.2. ENSAYO DE TRACCIÓN	20
<b>4.2. FLUJO DE MATERIAL</b>	<b>21</b>
<b>4.3. FISURAS</b>	<b>22</b>
4.3.1 FISURA LONGITUDINAL	22
4.3.2 FISURA TRANSVERSAL EN FORMA DE “V”	23
4.3.3 FISURA TRANSVERSAL ESTRECHA	24
<b>4.4. OVALIZACIÓN</b>	<b>24</b>
<b>4.5. PERFORACIONES</b>	<b>25</b>
<b>4.6. INCLUSIONES</b>	<b>25</b>

<b>5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>28</b>
<b>5.1. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL</b>	<b>28</b>
5.1.1 DUREZA SUPERFICIAL	28
5.1.2 ENSAYO DE TRACCIÓN	29
<b>5.2. FLUJO DE MATERIAL</b>	<b>31</b>
<b>5.3. FISURAS</b>	<b>32</b>
5.3.1 FISURA LONGITUDINAL	32
5.3.2 FISURA TRANSVERSAL EN FORMA DE "V"	34
5.3.3 FISURA TRANSVERSAL ESTRECHA	36
<b>5.4. OVALIZACIÓN</b>	<b>37</b>
<b>5.5. PERFORACIONES</b>	<b>38</b>
<b>5.6. INCLUSIONES</b>	<b>40</b>
<b>6. CONCLUSIONES</b>	<b>45</b>
<b>7. TRABAJO FUTURO</b>	<b>47</b>
<b>8. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>48</b>
<b>9. ANEXO</b>	<b>50</b>

## 1. Introducción

Esta sección busca que el lector se familiarice con una de las principales aplicaciones del alambroón de aluminio en la industria, la fabricación del alambroón de aluminio en Aluar, el proceso del trefilado y los defectos típicos de dicho proceso.

### 1.1. *Alambroón de aluminio para el transporte de energía*

Las líneas de transporte de energía eléctrica, conocidas como líneas de alta tensión, son el medio físico que se utiliza para transmitir energía eléctrica entre dos puntos y constituyen uno de los principales elementos que intervienen en la composición de una red eléctrica.

Las líneas de alta tensión consisten en varios conductores suspendidos de torres. Estos conductores están generalmente formados por un núcleo central recubierto por cables aluminio curvados helicoidalmente. Generalmente, los cables de una misma capa poseen el mismo diámetro y el giro de cada capa es opuesta al de la anterior. En el caso de las líneas aéreas de aluminio, es convencional que la torsión en la capa superficial sea en sentido horario. El diámetro final del cable y el número de capas que posea dependerá de la corriente eléctrica total que tenga que transportar. [1]

Si se lo compara con el acero o el cobre, para este tipo de aplicaciones, el aluminio posee mejores propiedades en la conductividad eléctrica por unidad de peso, la resistencia mecánica, el peso reducido y el precio [2] [3]. En la figura 1, se muestra un cable conductor de aluminio aleado con magnesio y silicio de 6 capas de la empresa Jinshui Cable Group [4]. En la imagen se puede observar la diferencia de diámetros entre los alambrones de las distintas capas, y cómo va disminuyendo hacia el interior.



Figura 1. Conductores de aluminio [1]

### 1.1.1 Aleaciones de aluminio utilizadas en los sistemas de transporte de energía eléctrica.

Los sistemas de transporte de energía eléctrica de alta tensión utilizan aluminio como elemento conductor. Dentro de los conductores eléctricos de aluminio existen diversas variantes de aleación en función del uso específico al que se apliquen. A continuación se describirán aquellos conductores relacionados con los materiales utilizados en este trabajo:

- *Conductor eléctrico (EC) de aluminio puro:* utilizado como conductor eléctrico por excelencia, pero con limitaciones parciales en tendidos aéreos de alta y media tensión debido a su baja resistencia mecánica. En estos casos, se utiliza con refuerzo central de acero o aleación de aluminio. [5]
- *Aleaciones de aluminio de la serie 6000:* aleaciones de aluminio de elevada resistencia mecánica ampliamente utilizadas como refuerzo de conductor eléctrico de alta y media tensión y como conductor eléctrico principal en aplicaciones específicas. [5]

### 1.2. **Producción del alambión. Línea Properzi**

La producción de alambión de aluminio (9.5 mm de diámetro) en ALUAR se realiza a través de una máquina de colada continua, seguida de una etapa de laminación donde se obtiene el alambión de sección circular. Finalmente, el material se comercializa en bobinas de hasta 2 toneladas.

El aluminio fundido se dirige a través de canales de material refractario hacia el comienzo de la máquina de colada continua *Properzi*. En el inicio, como se observa en la imagen a de la figura 2.a., la máquina posee un aro de cobre (rueda) con una ranura trapezoidal que dará forma al fondo y los laterales del molde. Una banda de acero continua, que está en contacto algo más de medio perímetro de la rueda, completa el cuarto lado del trapecio. La rueda y la banda de acero están refrigeradas exteriormente con agua y con condiciones adecuadas de velocidad de giro, lubricación y temperatura de metal, se puede obtener una barra continua. El correcto nivel de ingreso de metal es decisivo para la calidad de la barra y se controla a través de un flotador.



Figura 2. (a). Rueda de colada.(b). Laminador.

Previo al laminador la barra pasa por un horno de inducción para elevar la temperatura. Variando la temperatura de ingreso de la barra al laminador, se pueden modificar las propiedades del producto final. El laminador (figura 2.b.) es una máquina que está sincronizada con la velocidad de la rueda y reduce la sección de la barra colada hasta una varilla de 9,5 mm de diámetro (“alambrón”). El tren laminador consta de 11 cajas accionadas por un mismo motor. Cada caja posee tres rodillos ubicados a 120° uno respecto del otro. La orientación de los rodillos de una caja a la otra es alternativa de modo que la sección de la barra varía en cada caja de triangular a circular y viceversa.

Una vez obtenido el diámetro deseado, el alambrón se bobina en fardos de hasta 2 toneladas.

### **1.3. Tratamientos para la mejora de propiedades**

El aluminio y sus aleaciones se designan con un número de 4 dígitos. El primer dígito indica que elemento es el aleante principal y los tres restantes representan modificaciones de la aleación base.

- La serie 1000 posee menos de 1% de elementos de aleación lo que le otorga baja dureza, alta ductilidad y alta resistencia a la corrosión. [1]
- La serie 6000 posee silicio y magnesio como principales elementos de aleación. [1]

En función del uso previsto o la norma de aplicación, las mejoras de las propiedades iniciales como dureza, ductilidad o resistencia a la corrosión del material a trefilar, generalmente se alcanzan con el agregado de aleantes, trabajo en frío y/o tratamientos térmicos.

Los tratamientos térmicos pueden ser aplicados al alambón en forma previa al trefilado. Dependiendo del momento en el que se apliquen, las respuestas del proceso de deformación en frío y las propiedades finales del alambre conductor serán distintas. Por lo tanto, la combinación entre la composición química y tratamiento térmico provee una gama de procesos de fabricación y productos.

Por su bajo porcentaje de aleantes, a los materiales de la serie 1000 no se les realiza tratamientos térmicos y sólo se endurecen por deformación. Aquellos materiales que tengan estas características se los distingue con una H seguido de dos números que identifican específicas combinaciones de operaciones básicas. [1]

Las aleaciones de aluminio de la serie 6000, son aleaciones de aluminio termo-envejecibles que contienen silicio y magnesio como aleantes principales. Los átomos de silicio y magnesio (en una relación atómica 1:2) se combinan para formar el compuesto intermetálico  $Mg_2Si$  (siliciuro de magnesio). Una dispersión muy fina de este compuesto causa distorsiones en la red que dificultan el movimiento de las dislocaciones produciendo un aumento de la resistencia mecánica.

Como se observa en el diagrama pseudobinario Al- $Mg_2Si$  (figura 3), llevando la aleación por encima de la temperatura de solvus, se tiene la totalidad de Mg y el Si en solución sólida, y la única fase presente es  $\alpha$ . Si se realiza un temple al material desde esta temperatura, se retiene el Mg y Si en un estado metaestable de solución sólida sobresaturada. A temperatura ambiente comienza la precipitación de  $Mg_2Si$  (envejecimiento natural). Una vez alcanzada la deformación final se realiza un envejecimiento artificial para aumentar la cantidad de precipitados a 140-180°C.

Las aleaciones de la serie 6000 presentan una resistencia mecánica incrementada respecto a las mismas aleaciones sin aleantes debido a distorsiones de la red por los átomos que quedan en la solución (endurecimiento por solución sólida). La retención de los átomos ocurrirá en procesos en los cuales el enfriamiento es rápido, por ejemplo la colada en la rueda metálica. Probablemente en estos casos, también haya precipitados de siliciuro de magnesio constituyen otra contribución al incremento de resistencia. [6]

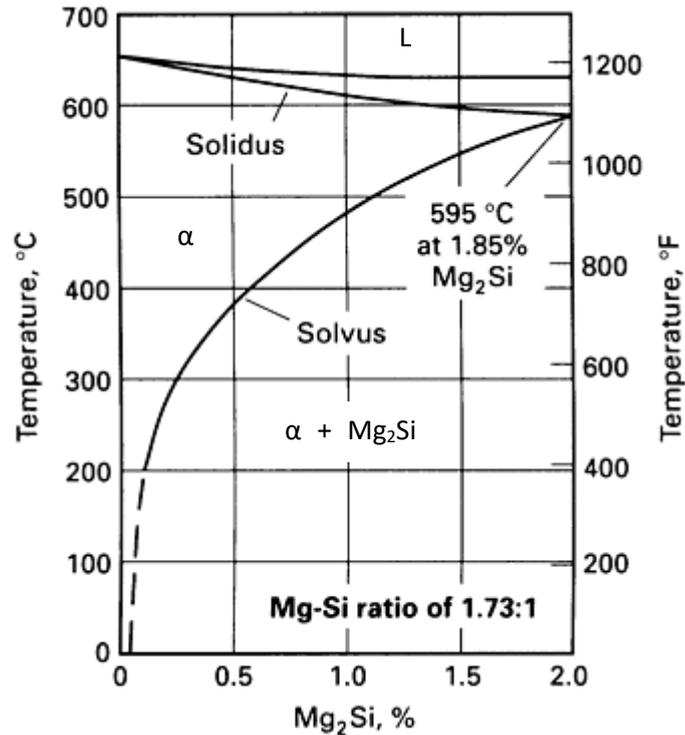


Figura 3. Diagrama de fases pseudobinario Al-Mg<sub>2</sub>Si

#### 1.4. Trefilado

A través del proceso de *trefilado* se busca reducir la sección transversal de un material haciéndolo pasar por un cabezal. En algunos casos, el trefilado también se utiliza para mejorar el acabado superficial o mejorar las propiedades mecánicas del material. Existen evidencias de que en el año 3000 A.C. se utilizaban alambres de oro en ornamentaciones de los faraones egipcios por lo que es probable que el desarrollo de esta técnica sea anterior a esta fecha. [7]

La figura 4 es una esquematización de la trefila (cabezal) y un material de sección circular maciza y resistencia constante. Al hacer pasar el material forzosamente por la trefila cónica se logra la reducción de la sección del cable de  $R_0$  (radio inicial) a  $R_f$  (radio final). La reducción que presenta el material se mide a través del área transversal del material a la entrada del cabezal ( $A_0$ ) y a la salida ( $A_f$ ). [8]

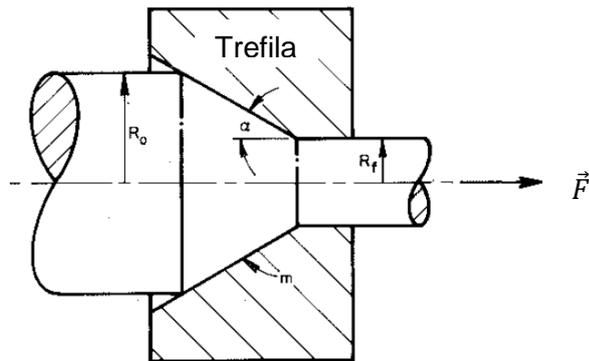


Figura 4. Esquema de la trefila y material de sección circular.

Existen tres variables principales que se pueden observar desde un principio en el proceso de reducción: la razón entre radios  $R_0/R_f$ ; el ángulo del semicono del trefila,  $\alpha$ ; y la fricción entre la trefila y el cable, debido a que una de las dos superficies se encuentra en movimiento. Se consideran variables independientes, por lo que existe cierta libertad en elegir los valores con los que se desea trabajar. Por lo tanto es importante que la fuerza de tirado, en caso de ser reportada, sea caracterizada en relación a estas tres variables. [8]

Cuando se observa desde lejos el trefilado de un material cualquiera, el cable se mueve como un cuerpo rígido en dirección axial. Sin embargo, el flujo cercano a la trefila se puede dividir en tres zonas. Las zonas I y III (figura 5) poseen flujos paralelos entre sí y las velocidades son uniformes con una sola componente en sentido axial. En la zona II sucede la deformación plástica y debido al ángulo de ingreso del material en la trefila, la velocidad del flujo en la superficie es menor respecto al centro. Esto se debe a que la velocidad en la zona II es el producto entre la velocidad original  $v_0$  y el  $\cos(\theta)$ . El ángulo  $\theta$  varía de cero grados, en la línea central donde sólo existe alargamiento, a un valor  $\alpha$  equivalente ángulo del cono. [8]

En la zona de deformación plástica, zona II, es donde ocurre el cambio de diámetro del material. La acción combinada de la tensión axial de tirado y la tensión indirecta de compresión generada por la trefila, son las responsables de la reducción del diámetro. Finalmente se consigue que el material reduzca su sección mientras que se estira. [7]

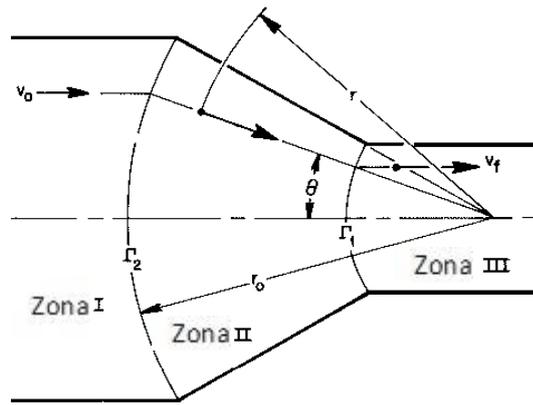


Figura 5. Líneas de flujo. [8]

### 1.5. Lubricación

Es esencial la lubricación adecuada en el trefilado para: reducir la fuerza de tirado al disminuir la fricción entre el alambión y la trefila, mejorar la vida de la trefila, la temperatura en el proceso y el acabado superficial de la pieza final. Es por esto que la selección del lubricante es un aspecto crítico del trefilado. A continuación se describen distintas formas de lubricación [9]:

- Trefilado en húmedo. Las trefilas y los alambres se sumergen por completo en el lubricante, que normalmente está formado por aceites y emulsiones con aditivos grasos o clorados.
- Trefilado en seco. La superficie de la varilla se recubre con un lubricante, como por ejemplo jabón, haciéndola pasar por una caja llena de éste (caja de aditivo).
- Recubrimiento. La varilla o el alambre se cubre con un metal que funciona como lubricante sólido, por ejemplo, cobre o estaño.
- Vibración ultrasónica de dados y mandriles. Esta técnica se ha usado con éxito para reducir la fricción al estirar secciones sólidas o huecas como también en otros procesos de trabajo con metales. Las vibraciones reducen las fuerzas, mejoran el acabado superficial, aumentan la vida del dado y permiten mayores reducciones por pase, sin fallas.

### 1.6. Trefila

Los materiales utilizados para las trefilas suelen ser acero, carburo de tungsteno o diamante, siendo estas últimas las más empleadas (figura 6). La tendencia es utilizar trefilas de diamante monocristalino o policristalino porque si bien es más caro, da mejor resultado [10]. Por su costo, falta de resistencia a la tracción y tenacidad, las matrices de carburo y de diamante se usan insertadas en una pieza de acero fundido.

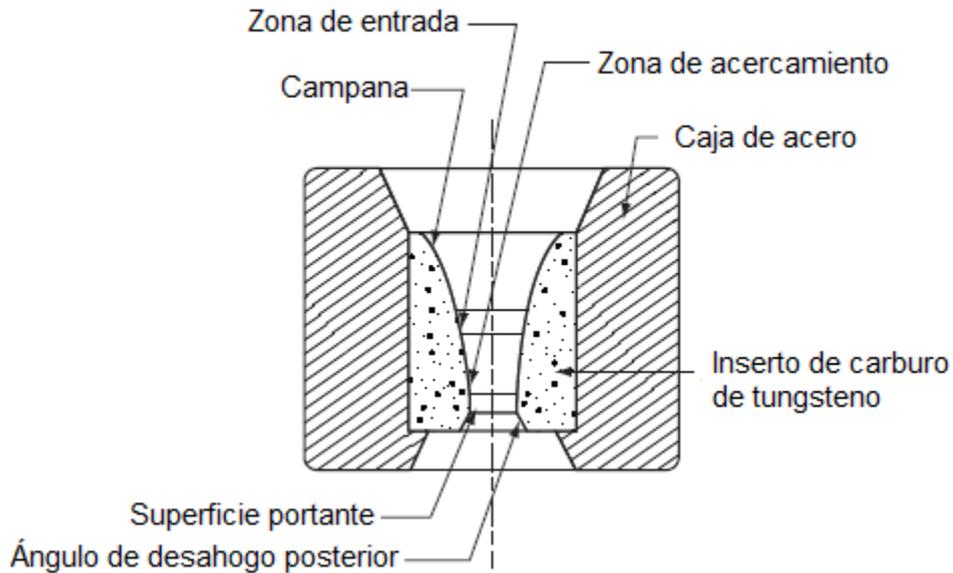


Figura 6. Corte transversal de una trefila. [7]

En la figura 6 se pueden observar las zonas presentes en la trefila:

- Campana y zona de entrada: la entrada tiene una forma que le permite al alambre ingresar a la trefila con una capa de lubricante. La zona de la campana genera presión hidrostática que promueve e incrementa el flujo de lubricante por la trefila.
- Zona de acercamiento: en esta etapa sucede la reducción de la sección circular del alambre. El largo de esta sección debe ser tal que permita generar la presión necesaria para generar buena lubricación. El ángulo interno del semicono se encuentra entre 6 y 20 grados.
- Superficie portante: ayuda a mantener la pieza alineada en la trefila y permite que el material se expanda ligeramente cuando el alambre sale de la trefila.
- Ángulo de desahogo posterior: control final de diámetro donde se controla la sección circular, linealidad y superficie lisa asegurando la estabilidad dimensional.

Yoshida, Norasethasopon, Shinohara e Ido (2003) recomiendan que la reducción por pasada no supere entre el 20 y 30% del área inicial [10]. En caso de querer obtener una reducción mayor se deberá realizar a través una secuencia de reducciones y así alcanzar un diámetro menor. Con una reducción superior al 30% las posibilidades de que el cable se rompa durante el trefilado son mayores.

### **1.7. Máquinas trefiladoras Industriales**

La velocidad del proceso de una planta trefiladora depende del material, el ángulo interno de la trefila a utilizar y del diámetro del alambre que se quiere alcanzar. En la industria puede ir desde 1 a 2,5 m/s para diámetros grandes hasta 25 m/s para alambres muy delgados

Debido a que la reducción de diámetro es parcial, las maquinas utilizadas poseen una serie de trefilas que van reduciendo el diámetro gradualmente. De esta forma se alcanza el diámetro final sin que el alambrón se rompa durante el trefilado.

### **1.8. Defectos**

La fractura de cables durante el trefilado es un hecho común que genera un aumento en el costo de procesamiento para las empresas [10]. A continuación se enumeran los principales defectos que se consideran como causales de la fractura de cables debido a que el material con el que se trefila no es la única variable a tener en cuenta [8]:

- Inclusiones: la rotura por inclusiones provenientes de la colada del alambrón puede ocurrir en cualquier diámetro desde el alambrón hasta los valores de diámetros más finos. Esto dependerá del tipo de geometría, la dureza, el lugar donde se encuentre la inclusión y de las propiedades mecánicas del aluminio que se esté trefilando.
- Macroporosidad: generada por la incorrecta desgasificación o contracción del material durante la solidificación.
- Fisuras: se pueden dar durante la solidificación, manipulación y/o transporte de los materiales.

## 2. Objetivos

El presente trabajo tiene como objetivo principal el estudio de la evolución de defectos durante el trefilado de alambre de aluminio utilizando una trefiladora de laboratorio. Estos defectos son aquellos relacionados al proceso de fabricación del alambre, la manipulación del mismo una vez formados los fardos o a problemas durante el trefilado. Para lograr el objetivo, se llevarán a cabo las siguientes tareas:

- Generar defectos de manera artificial sobre el alambre de aluminio.
- Evaluar y comparar la evolución de los defectos en los dos tipos de alambres comercializados por Aluar.
- Evaluar y comparar la evolución de defectos en distintas velocidades de operación
- Comparar resultados obtenidos con el historial de reclamos de Aluar y, si es posible, establecer una correlación.

### 3. Equipo y materiales utilizados

En esta sección se describirán los materiales, lubricante, trefilas y trefiladora utilizados en el trabajo.

#### 3.1. *Aluminio*

En el presente trabajo se utilizaron dos tipos de alambres producidos en Aluar., de diámetro inicial igual a 9,5 mm. Las especificaciones de los mismos se encuentran en la tabla 1.

**Tabla 1.** Composición química de los materiales

Alambrón		Contenido de aleantes - %wt		
Material	Colada	Fe	Si	Mg
1350 H11	7105O7	0,08	0,05	-
6101 T1	7011M7	0,20	0,59	0,47

- 1350 H11 posee una pureza mínima de 99,5%. Es uno de los materiales más usados para conductores eléctricos. No posee ningún tratamiento térmico adicional, su dureza depende de la deformación.
- 6101 T1 aleación de aluminio termoestabilizable con silicio y magnesio como aleantes principales. La fase endurecedora es el compuesto intermetálico  $Mg_2Si$ . Solubilizado en línea, enfriado desde altas temperaturas (550 °C) durante el proceso de conformado y envejecido natural (T1) [11]. Debido al favorable balance entre propiedades mecánicas y eléctricas las aleaciones son ampliamente utilizadas para conductores eléctricos y refuerzos internos en los tendidos eléctricos de alta y media tensión.

#### 3.2. *Lubricante*

El lubricante utilizado fue un aceite emulsionable, marca Emultrue, de la firma Química True. Posee una densidad de 0,96 g/cm<sup>3</sup> y es inflamable por fuerte calentamiento a temperaturas superiores de 75 °C. En la práctica se utilizó puro.

Luego de que el aceite es utilizado, queda con restos de partículas que provienen del proceso de trefilado. Es necesario después de un determinado número de pasadas, filtrar el aceite utilizado. La calidad del aceite filtrado es menor que la del aceite sin uso.

### 3.3. Trefilas

Las trefilas utilizadas son de carburo de tungsteno. Se realizaron 11 pasadas hasta obtener el diámetro más fino de 3,02 mm. A continuación se muestran las trefilas utilizadas y en la tabla 2 se puede observar características de cada paso, diámetros de las trefilas, la relación de diámetros entre trefilas y porcentaje de reducción de área por pasada obtenidas en los alambres trefilados.



Figura 7. Trefilas de carburo de tungsteno (WC) utilizadas en el trabajo.

**Tabla 2.** Número de pasada, diámetros de las trefilas, la relación de diámetros entre trefilas, porcentaje de reducción de área por pasada obtenidas en los alambres trefilados.

N° pasos	Diámetro (mm)	Relación de diámetros (%)	Reducción de área por pasada (%)
1	9,07	4	8
2	8,02	13	22
3	7,20	11	19
4	6,44	12	20
5	5,76	12	20
6	5,16	12	20
7	4,62	12	20
8	4,15	11	19
9	3,78	10	17
10	3,38	12	20
11	3,02	12	20

### 3.4. Trefiladora

La trefiladora de laboratorio utilizada es un desarrollo del departamento de Metalurgia de Aluar (figura 8). El mismo consiste de un motor de inducción, un reductor, un cable de acero trenzado que conecta el motor con la mordaza, una mordaza, una caja contención.

- El rango de velocidad del equipo piloto es de 0 a 85 mm/s. En este trabajo se considerará como velocidad mínima 15 mm/s y 85 mm/s como velocidad máxima.
- Caja de contención para el lubricante, con circulación manual.
- Largo de trefilación máximo: 2,2 m.



Figura 8. Trefiladora de laboratorio.

## 4. Métodos

En el siguiente apartado se describirán los ensayos realizados en las probetas caracterizando los defectos generados artificialmente en los alambrones y los pasos seguidos una vez terminado el proceso de trefilado.

Para el registro fotográfico se utilizó un microscopio estereoscópico, *Leica modelo DM-IRM* equipado con cámara OLYMPUS DP-25 y microscopio electrónico de barrido (SEM), *Jeol modelo LSM-6460LV*.

### 4.1. Caracterización del material

#### 4.1.1. Ensayo de Dureza

Para conocer la dureza del material se realizó el ensayo bajo norma ASTM E10/08: “*Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials*”. Se utilizó durómetro *marca Affri modelo 250 DRMC*, con punta esférica de 2.5 mm de diámetro y carga de 31,25 kgf (HB 2,5/31,25).

Se realizaron 2 improntas en cada muestra, en una de las caras facetadas del alambroón para evitar la posible distorsión de la impronta debido al radio de curvatura. Una vez realizada la impronta, se midió el diámetro de la misma. Con el valor de la fuerza y el valor de diámetro obtenido utilizando la expresión (1), establecida por la norma utilizada, se obtuvo el valor de dureza Brinell.

$$HBW = \frac{2F_{kgf}}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1)$$

Siendo:

- $F_{kgf}$  = Fuerza del ensayo en kgf
- $D$  = diámetro de la bola del indentador en mm
- $d$  = diámetro de la impronta medida en mm

Para calcular con precisión el diámetro de la impronta obtenida se utilizó el software de imágenes ImageJ.

#### 4.1.2. Ensayo de Tracción

Los ensayos de tracción uniaxial fueron llevados a cabo bajo norma IRAM 766/72 “*Productos de aluminio y sus aleaciones. Método de ensayo de tracción*”. Se realizaron en la máquina de ensayos *marca INSTRON modelo 3367* instrumentada con

extensómetro tipo “long travel” de la misma marca. Se utilizaron mordazas en “V” correspondientes a cada diámetro. Se empleó una velocidad de desplazamiento de cabezal de 1 mm/min hasta la rotura de la muestra

Se realizó sólo una repetición por diámetro ya que los valores fueron comparados con valores obtenidos por Aluar anteriormente.

Se adquirieron los registros carga-desplazamiento y se procedió a calcular la deformación y tensión ingenieril como se establece en la norma. Para ello, se determinó la deformación ingenieril como la razón entre el valor medido por el extensómetro y la longitud calibrada inicial, y a la tensión ingenieril como la fuerza dividida el área inicial. Una vez obtenido el gráfico deformación ingenieril vs tensión ingenieril se calcula la tensión de fluencia  $R_{p0,2}$ . Para ello se traslada la zona lineal a una deformación remanente de 0.2% y se determina la tensión de fluencia a la intersección de dicha recta con la curva obtenida.

#### **4.2. Flujo de material**

Como se mencionó anteriormente, de acuerdo a consideraciones teóricas, la velocidad del flujo de material en la superficie del alambre durante el trefilado es menor que la velocidad del centro. Para determinados ángulos internos, la velocidad superficial puede llegar a ser hasta dos veces menor que la velocidad del material en el centro del mismo [8].

Se realizó el seguimiento de flujo de alambrón durante el trefilado y de esta manera se obtuvo una verificación empírica sobre la diferencia de velocidad entre la superficie y el centro del alambrón. Para realizar el ensayo se frenteó la parte trasera de once alambres para obtener una sección transversal uniforme.

Una vez obtenidas las muestras, se utilizó la incluidora automática Struers ProntoPress-20 y se procedió a incluir los once extremos de las distintas muestras. El pulido sucesivo, se hizo con papel abrasivo de SiC 500, 1200 y luego se utilizó una suspensión de diamante de 6 $\mu$ m, 3 $\mu$ m y 1  $\mu$ m con pulidora automática Struers. Se buscó obtener una superficie lisa sin presencia de rayas para poder realizar un anodizado electroquímico, el cual consistió en colocar las distintas piezas 80 segundos en ácido fluorbórico ( $\text{HBF}_4$ ) al 1,8% y con un potencial de 20V. El anodizado es de gran utilidad para revelar la microestructura de la pieza, dado que al observarse la muestra con luz polarizada, cada grano toma un color en función a su orientación cristalográfica, lo que permite diferenciar los granos fácilmente.

Debido a que el comportamiento del flujo durante el trefilado depende de la geometría de la trefila, en este caso sólo se utilizó el alambón 1350 H11.

### 4.3. Fisuras

Las fisuras presentes en el alambón pueden estar relacionadas a algún problema durante la fabricación, manipulado durante el embalaje y transporte o durante el mismo trefilado por condiciones inadecuadas de proceso. Para poder analizar el defecto en detalle, se crearon artificialmente fisuras longitudinales y transversales al flujo.

Obtener el mínimo diámetro durante el proceso de trefilado solo permite afirmar que el defecto no genera complicaciones durante el proceso de trefilado. Por lo tanto, no podemos asegurar que el material se encuentre apto para su aplicación. Como se explicó anteriormente, para formar los conductores eléctricos los alambones de una misma capa poseen el mismo diámetro y una torsión opuesta a la capa anterior. Por lo tanto, para poder determinar si todas las muestras que se trefilaron con éxito son aptas para su aplicación posterior, se les realizó un ensayo de torsión el cual consistió en girar 5 vueltas en sentido horario y 5 vueltas en sentido anti horario.

#### 4.3.1 Fisura longitudinal

Se generaron fisuras longitudinales de sección rectangular (figura 9) a 4 alambones. En todos los casos, las fisuras presentan el mismo ancho igual a 2,96 mm. El largo de las fisuras fue de 100 mm. En la tabla 3 se puede observar en detalle los datos para las 4 muestras.

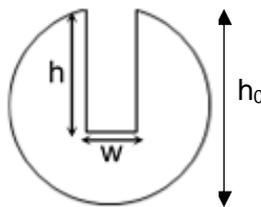


Figura 9. Esquema de la fisura vista de frente

**Tabla 3.** Material, muestra, ancho del defecto ( $w$ ), profundidad del defecto ( $h$ ) y profundidad relativa respecto al diámetro original ( $h/h_0$ ).

Material	Muestra	$w$ (mm)	$h$ (mm)	$h/h_0$
1350 H11	A	2,96	6,36	0,67
	B		4,82	0,51
6101 T1	C	2,96	6,60	0,69
	D		3,23	0,34

Esta prueba se hizo en base a lo reportado por *Magalhães et al* (2012) [12]. Su investigación se realizó en cobre con profundidades de fisura de 0.3, 0.6 y 0.9 mm. Los ensayos los realizaron en una INSTRON con un cabezal adaptado. Los autores hicieron una comparación numérica en un software libre.

#### 4.3.2 Fisura transversal en forma de “V”

Para realizar las fisuras transversales al flujo en forma de “V” se empleó un torno marca Turri, modelo T-190, con una fresa circular de sierra con un ángulo de inclinación de 45°. En la figura 10 se puede ver un esquema de la fisura y en la tabla se describe el ancho de la fisura, la profundidad de la fisura y la profundidad relativa de la fisura respecto al diámetro original. Para todos los casos el ángulo de apertura fue de 45°. Las fisuras se realizaron a 100 mm del extremo.

**Tabla 4.** Material, muestra, ancho de la fisura ( $w$ ), profundidad de la fisura ( $h$ ) y profundidad relativa de la fisura respecto al diámetro original ( $h/h_0$ ).

Material	Muestra	$w$ (mm)	$h$ (mm)	$h/h_0$
1350 H11	E	5,6	5,7	0,60
	F	4,3	4,6	0,48
	G	3,1	3	0,32
	H	1,1	0,9	0,09
6101 T1	I	3,7	3,7	0,39
	J	2,1	1,9	0,20

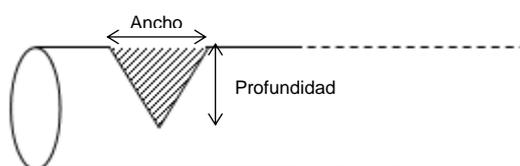


Figura 10. Esquema fisura transversal en “V”

#### 4.3.3 Fisura transversal estrecha

Para realizar las fisuras transversales estrechas se utilizó una sierra de precisión *Buehler Isomet™ 1000 series*. Al utilizar este tipo de sierra se corta el material con una deformación mínima utilizando sólo la fuerza de gravedad. Se utilizó un peso de 0,05 kg y contra peso de 0,33 kg.

Las fisuras poseen un ancho fijo de 0,6 mm y la profundidad varía dependiendo del tiempo que el material se encontró en contacto con la sierra. En la tabla 5 se puede observar las distintas profundidades alcanzadas.

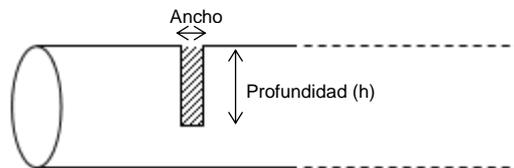


Figura 11. Esquema fisura transversal estrecha.

**Tabla 5.** Material, muestra, ancho de la fisura ( $w$ ), profundidad de la fisura ( $h$ ) y profundidad relativa de la fisura respecto al diámetro original ( $h/h_0$ ).

Material	Muestra	$w$ (mm)	$h$ (mm)	$h/h_0$
1350 H11	K	0,6	6,9	0,73
	L		3,7	0,39
	M		3,2	0,34
	N		1,9	0,20
6101 T1	O	0,6	3,9	0,41
	P		1,9	0,20

Ambas fisuras transversales al flujo se basaron en los artículos científicos publicado por Shinora y Yoshida [13] [14]. En ambos casos se utilizó acero inoxidable y se realizaron análisis experimentales y numéricos. Las profundidades de las fisuras en los artículos varían desde 0,15 a 2,5 mm y los anchos de 0,3 a 8,5 mm.

#### 4.4. Ovalización

Se define ovalización a la diferencia entre el diámetro mayor y el diámetro menor que posea una pieza de sección circular. De acuerdo a la especificación por la que se

rige la fabricación de alambón, se acepta una ovalización máxima de entre 0,5 mm y 1 mm.

En esta sección se quiso evaluar cómo afecta la ovalización al alambón durante el proceso de trefilado: si existe o no algún defecto superficial generado por la alta ovalización; o si se presenta alguna complicación relacionada. Para ello se generó *ad hoc* una ovalización de 2 mm para ambos materiales.

#### **4.5. Perforaciones**

Se realizaron dos tipos de perforaciones donde se mantuvo constante el diámetro y variable su profundidad: 4,5 mm y de 9,5 mm. Los defectos se realizaron todos sobre una misma muestra con una agujereadora de banco marca *Barbero* utilizando una mecha de 2,5 mm. Las perforaciones se realizaron con una distancia de 4 mm entre ellas para así evitar la interferencia de resultados entre los defectos.

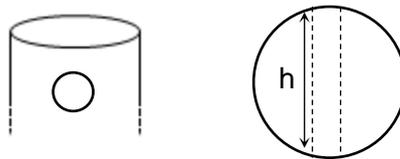


Figura 12. Esquema de las perforaciones realizadas, vista superior y anterior

Al igual que en las fisuras tanto transversales como en las longitudinales, en los casos que se alcanzó el diámetro final de 3,02 mm, se realizó un ensayo de torsión que consistió en girar 5 vueltas en sentido horario y 5 vueltas en sentido antihorario.

Las perforaciones lejos está de lo que puede pasar en la realidad y en caso de presencia del mismo se debe descartar la bobina completamente. El estudio de las perforaciones se llevó a cabo por que se consideró que era un defecto donde el daño que se realiza sobre el alambón es bajo y por la geometría que presenta es posible colocar las inclusiones que se estudiarán en la siguiente sección.

#### **4.6. Inclusiones**

En el proceso de trefilado de alambón de aluminio, es posible que existan inclusiones no metálicas provenientes de la colada, las cuales pueden generar quiebres durante el trefilado, principalmente en productos donde el diámetro final es menor que 1 mm.

En esta sección se buscó incluir distintos materiales de diferente dureza para entender el comportamiento del alambρόn durante el trefilado y cómo su presencia afecta el proceso y el material final.

Las inclusiones que se introdujeron en el alambρόn fueron:

- Acero
- Aluminosilicato
- Silicio

Se buscó realizar el menor daño posible sobre la muestra para agregar la inclusión y así considerar la inclusión como responsable en caso de fractura. Las inclusiones se agregaron al material a través de perforaciones transversales al flujo de material de 3 mm de diámetro y 4.5 mm de profundidad, de igual forma que en la sección 4.5. Asimismo, se realizó una perforación paralela al flujo de diámetro igual a 3 mm. En la figura 13, se observa el esquema del agujero realizado para esta última inclusión.

En la figura 14 se muestra la espectrometría de dispersión de energía de rayos X que se les realizó al aluminosilicato y al silicio. El análisis micro elemental SEM-EDS utiliza espectroscopía de rayos x de energía dispersa analiza los rayos x generado como producto de la interacción del haz de electrones de un microscopio electrónico de barrido con material sometido a análisis para la identificación y cuantificación de rayos x característicos de los 9 elementos.

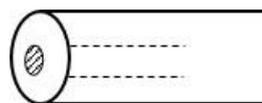


Figura 13. Esquema de agujero paralelo al flujo longitudinal

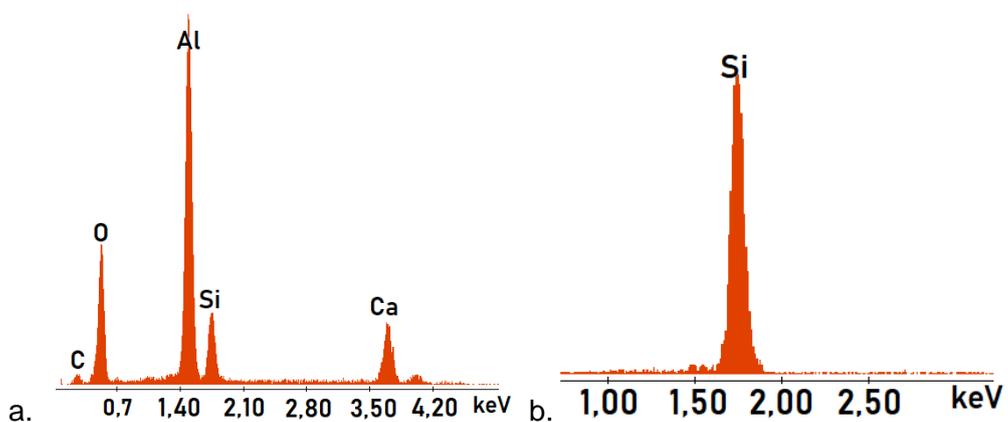


Figura 14. Espectro EDS correspondiente a las inclusiones utilizadas (a)  
Aluminosilicato (b) Silicio puro.

Las inclusiones de acero no son inclusiones acordes al proceso pero la utilización de estos materiales de alta dureza nos da una idea del comportamiento del flujo dentro del material en presencia de una inclusión. En cambio el silicio puro y los aluminosilicatos se encuentran presentes durante distintas parte del proceso, por ejemplo en herramientas de medición, las paredes de los hornos de fusión o en los canales de colada.

## 5. Resultados y discusión

En primer lugar se quiere destacar que el estado las trefilas y el lubricante afectan directamente al trefilado. Las trefilas rayadas no sólo generan una baja calidad superficial sino que producen una mala lubricación lo que genera dificultades a la hora de trefilar. Lo mismo sucede en el caso de presencia de finos en el lubricante. Debido al estado de las trefilas no se realizó un análisis de la superficie del material<sup>1</sup>.

### 5.1. Caracterización del material

#### 5.1.1 Dureza superficial

Los valores de dureza obtenidos (tabla 6) son los del alambón, debido a que una vez que sale de la Properzi posee caras facetadas por lo que la impronta se puede reportar sin un error significativo.

Como se explicó anteriormente, el alambón 6101 T1 no sólo presenta endurecimiento por deformación producido en las cajas de laminación de la Properzi sino que además presenta endurecimiento por la precipitación de  $Mg_2Si$ . Es por esto que la dureza inicial del alambón 6101T1 supera en 200% al alambón 1350 H11.

**Tabla 6.** Material, diámetro equivalente y dureza HBW

Alambón	Diámetro promedio (mm)	Dureza (HBW 2,5/31,25)
1350 H11	1,00	38
6101 T1	0,67	87

<sup>1</sup> Defectos típicos de superficie: cotrefilado, "crow's feet".

### 5.1.2 Ensayo de tracción

Una vez obtenidos los datos de carga desplazamiento se realizaron los gráficos tensión-deformación para ambos aluminios.

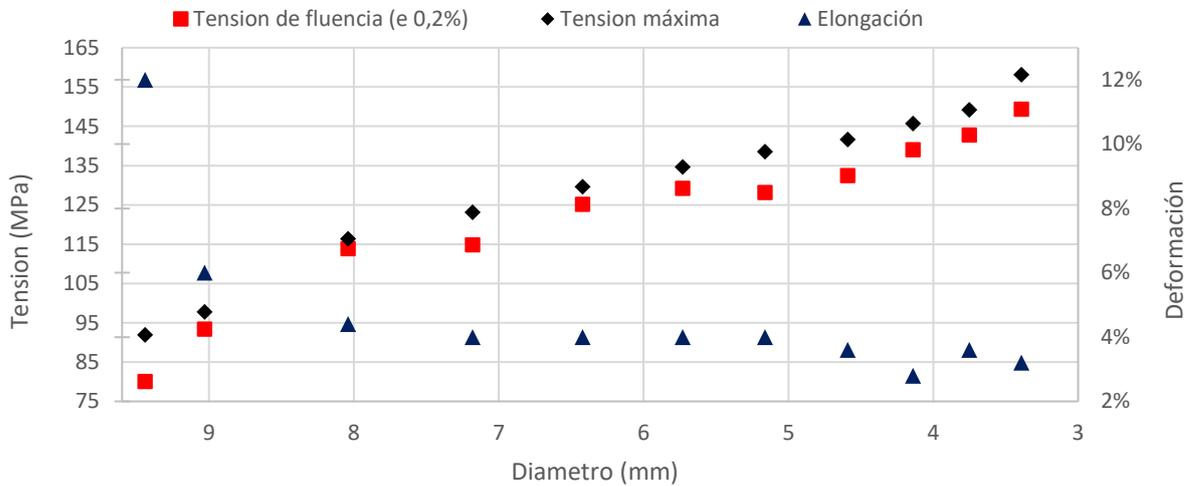


Gráfico 1. Tensión de fluencia, tensión máxima y elongación vs. diámetro para aluminio 1350 H11.

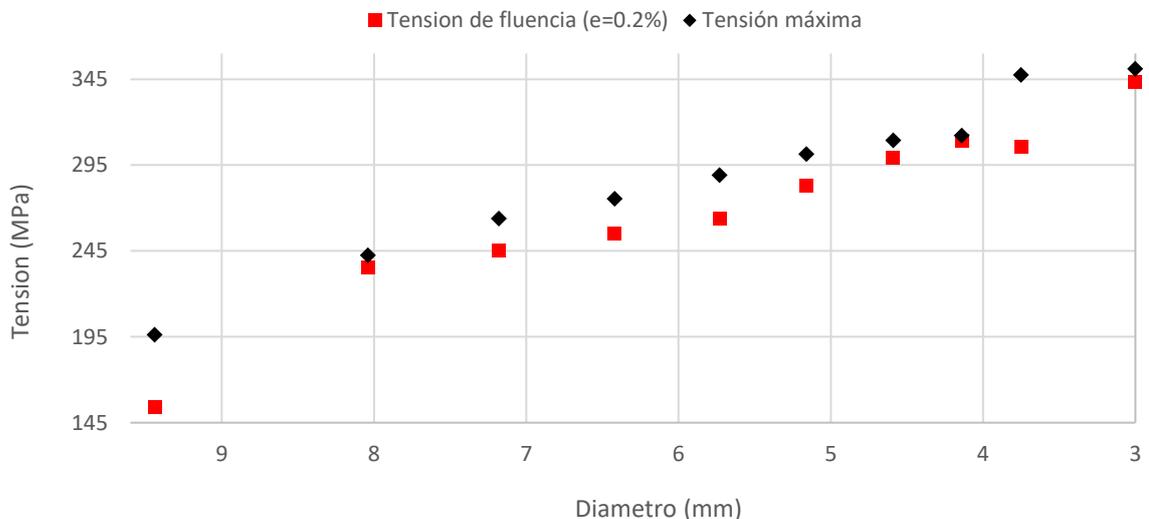


Gráfico 2. Tensión de fluencia, tensión máxima vs. diámetro para aluminio 6101 T1.

En los primeros puntos de ambos gráficos se observan claramente las mejoras en las propiedades mecánicas que generan los aleantes respecto al material base. La tensión máxima que soporta el aluminio 6101 T1 (195 MPa) supera en más de un 100% al alambroón 1350 H11 (95 MPa). Estos valores son superiores a los valores *as cast* debido a que ambos materiales poseen trabajo en frío previo al trefilado realizado en la Properzi en el momento de pasar de una barra trapezoidal al alambroón [15][16].

Por otro lado a medida que la sección del alambón disminuye, la tensión de fluencia y de rotura aumenta. Con el aumento de trabajo en frío, el número de dislocaciones se multiplica por lo tanto la densidad de dislocaciones presentes en el material aumenta. Esto lleva a que el movimiento relativo de las dislocaciones disminuya lo que se traduce en un aumento de la dureza del material. Este efecto se conoce como endurecimiento por deformación.

En el año 2010, Amado analizó la evolución de la resistencia mecánica media ( $R_m$ ) a 22°C que presenta el alambón 6101 con diferentes tratamientos térmicos [18]. El alambón utilizado por Amado solo presenta el trabajo en frío realizado por las máquinas de laminación en la Properzi, por lo que los puntos del gráfico 3 se deben comparar con el primer punto del gráfico 2, es decir, para el diámetro de 9,5 mm. Amado llega a la conclusión que antes de los 10 días el endurecimiento relacionado a los precipitados de  $Mg_2Si$  alcanza su máximo valor. Por lo tanto, por los valores obtenidos en el alambón 6101 T1 en el gráfico 2 el endurecimiento del material se encuentra relacionado principalmente al trabajo en frío y presentaría además endurecimiento por precipitación de  $Mg_2Si$ .

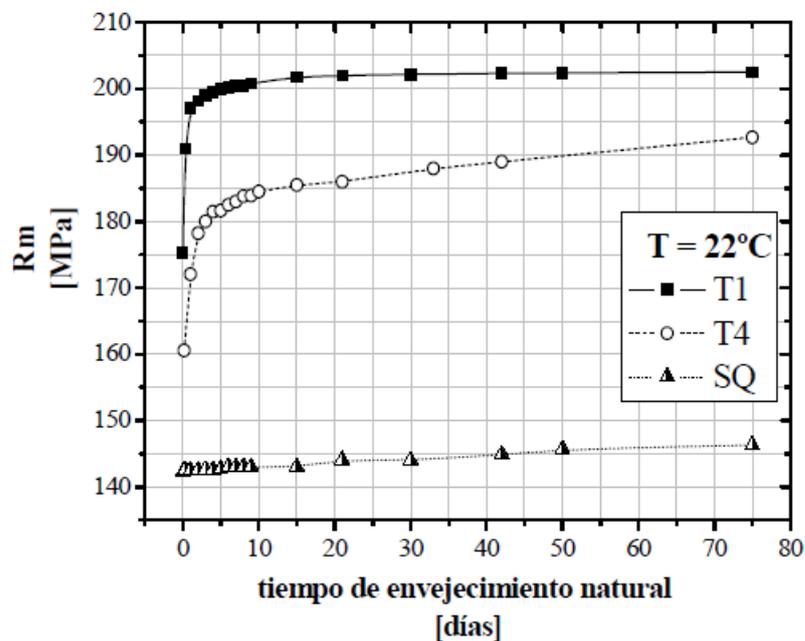


Gráfico 3. Evolución de  $R_m$  durante el envejecimiento natural a 22°C.

La elongación a la rotura en alambón de aluminio 1350 H11 disminuye al disminuir el diámetro de la muestra. Como se explicó anteriormente el paso de trefila genera endurecimiento en el material lo que se traduce en una disminución en la elongación. Los resultados de elongación obtenidos del alambón 6101 T1 difieren de

los resultados encontrados en bibliografía y debido a que no se obtuvo una tendencia lógica, se decidió no reportarlos.

## 5.2. Flujo de Material

En la siguiente figura se puede observar cómo varía el flujo de material en los diferentes pasos de trefilado comenzando desde el alambón frentado (figura 15.a) hasta el diámetro mínimo alcanzado 3.02 mm (figura 15.f). Se reportan también diámetros destacados, donde se observa claramente que la velocidad en la superficie es menor que la central.

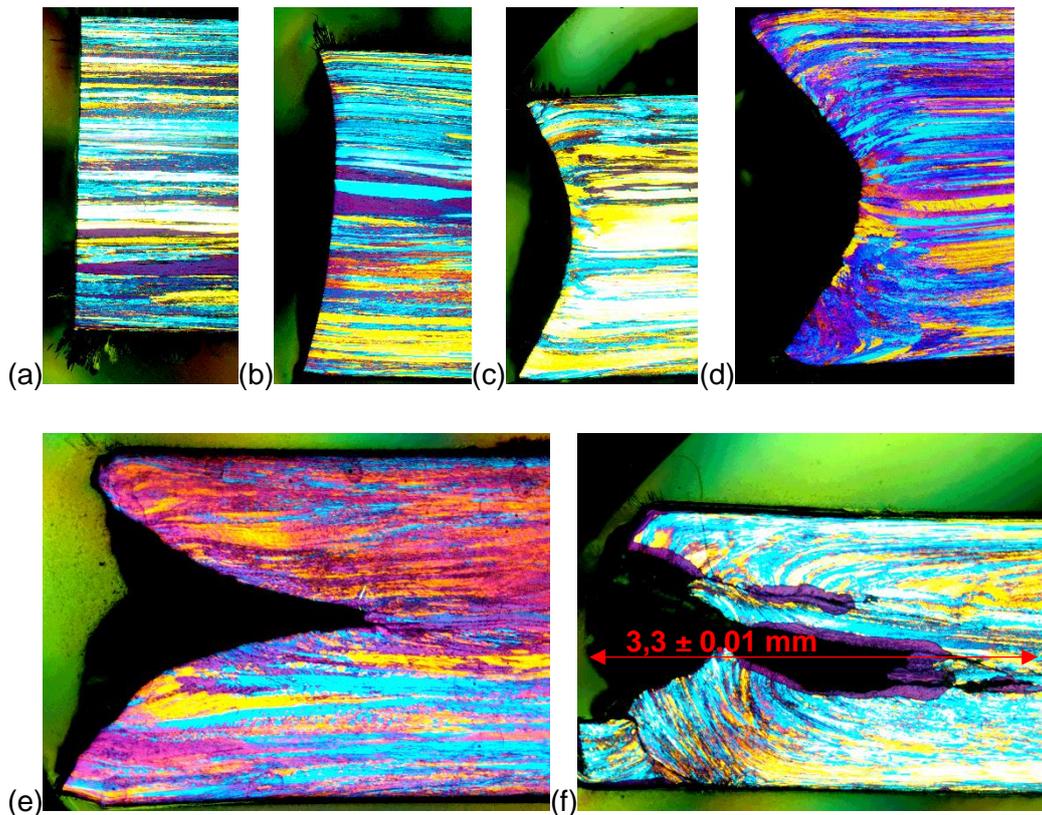


Figura 15. Flujo de la muestra (a)  $d= 9,5$  mm (b)  $d= 9,03$  mm (c)  $d= 8,04$  mm  
(d)  $d= 7,18$  mm (e)  $d= 3,75$  mm (f)  $d= 3,02$  mm.

Finalmente, se puede corroborar lo establecido en la teoría del trefilado donde el flujo en el centro del alambre es superior al de la superficie de la muestra. La diferencia de velocidades que sufre el material durante el trefilado dependerá de la reducción y el ángulo de la trefila y la fricción entre la trefila y el material.

### 5.3. Fisuras

#### 5.3.1 Fisura longitudinal

Las fisuras longitudinales, independientemente de su profundidad y velocidad de trefilado, no presentan problemas durante el proceso de trefilado. Se pudo corroborar en todas las muestras que debido a la presión en dirección circunferencial y radial producida por la trefila, la profundidad del defecto se reduce al igual que el diámetro (figuras 16 a 19). Se puede observar que las fisuras longitudinales de sección inicialmente rectangular generan lo que se conoce como un defecto de “Y” invertida [13]

En las imágenes 17 y 19 se puede observar como el área de la fisura tiende a desaparecer a simple vista. En ambos casos la profundidad relativa de la fisura es menor a 0,5. Utilizando un microscopio SEM (figura 20) se puede distinguir que la fisura no se cura, es decir, que la discontinuidad sigue presente en el material. Podemos observar que las paredes del defecto se acercan unas con otras rellenando la fisura. Debido a las conclusiones obtenidas con las imágenes de la figura 20, se decidió no continuar con el ensayo de torsión ya que la discontinuidad persiste.

En comparación a la simulación numérica realizada por Magalhães et al (2012) se observa una tendencia similar y se necesitan al menos siete pasadas para que el área del defecto tienda a cero lo que no significa que desaparece. [12]

La diferencia principal que se observó entre ambos materiales es la permanencia en la geometría de la “Y” invertida. En la figura 18 se marcó lo que el autor define como “Y” invertida. Debido a la ductilidad que presenta el alambre 1350 H11 se puede observar cómo la fisura que inicialmente rectangular tiende a redondearse media que la sección va disminuyendo (figura 16;  $d=4,16$  mm).

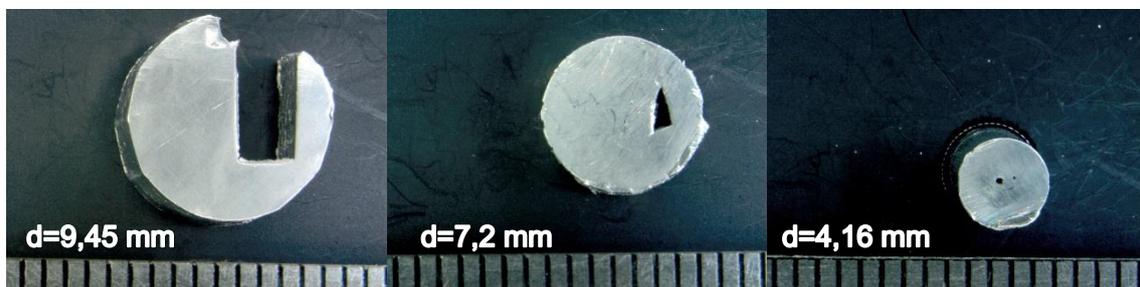


Figura 16. Aluminio 1350 H11, muestra A, con fisura longitudinal inicial de 6,36 mm de profundidad y 2,96 mm de ancho.

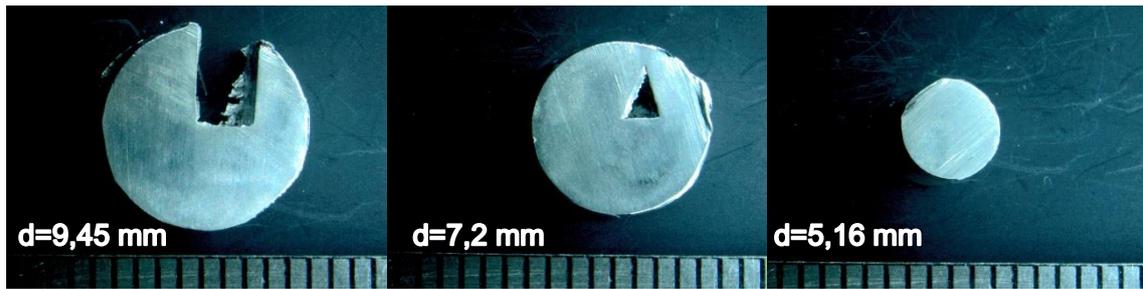


Figura 17. Aluminio 1350 H11, muestra B, con fisura longitudinal inicial de 4,82 mm de profundidad y 2,96 mm de ancho.

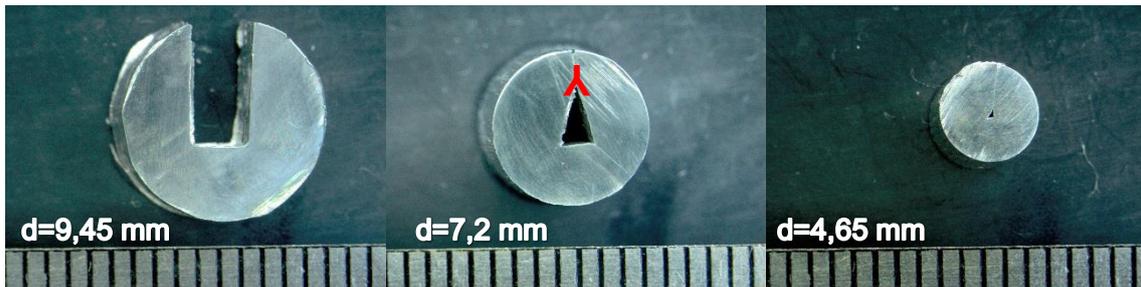


Figura 18. Aluminio 6101 T1, muestra C, con fisura longitudinal inicial de 6,60 mm de profundidad y 2,96 mm de ancho.

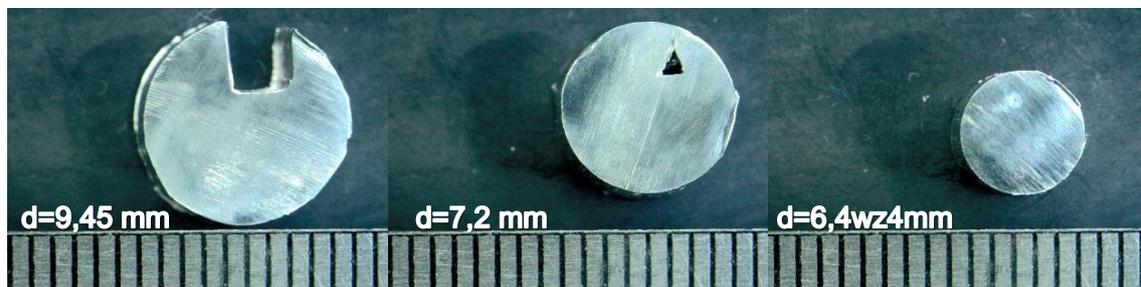


Figura 19. Aluminio 6101 T1, muestra D, con fisura longitudinal inicial de 3.23 mm de profundidad y 2,96 mm de ancho.

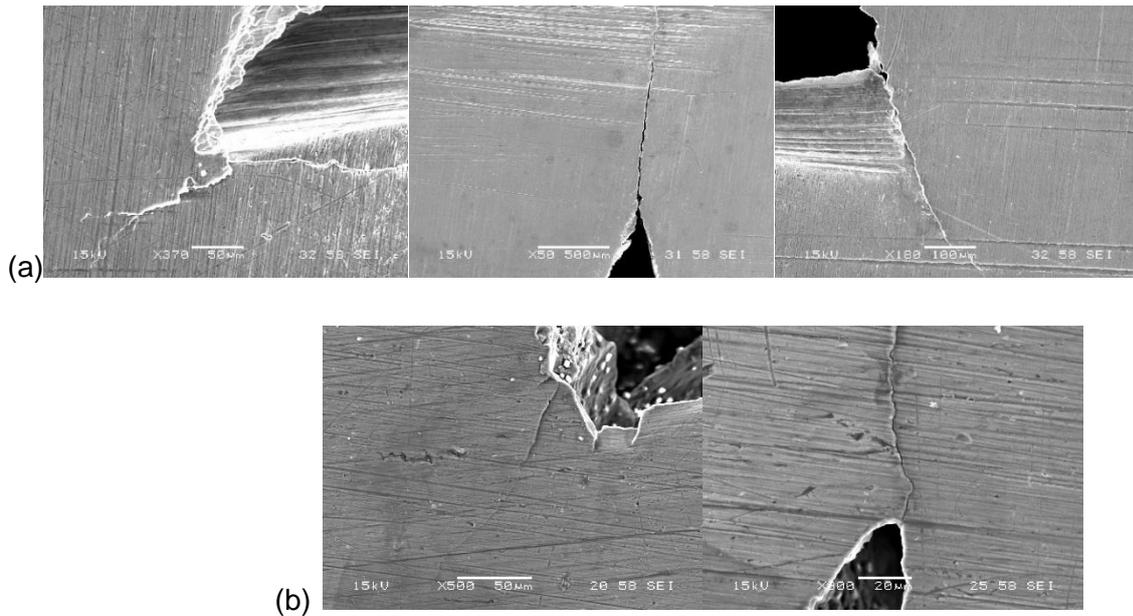
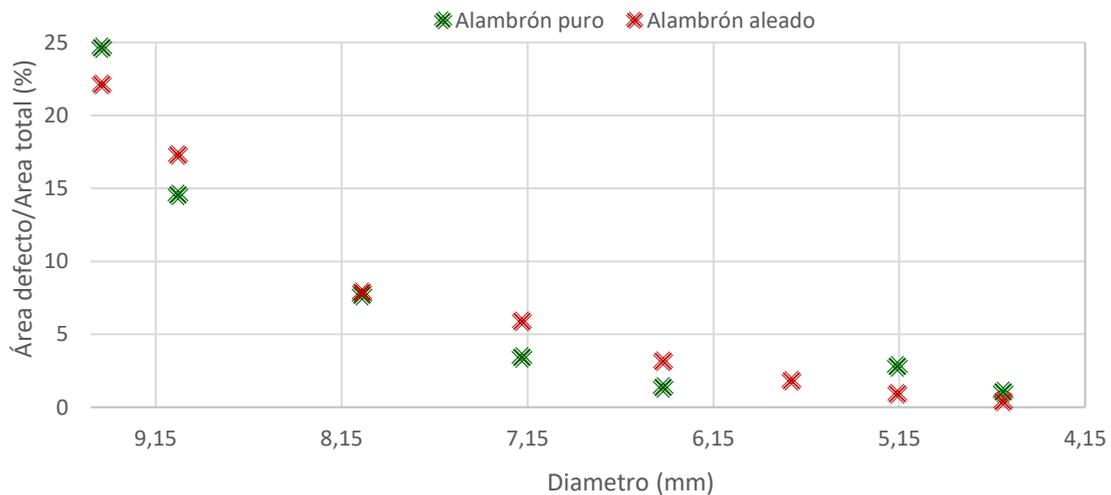


Figura 20. Alambrcn 6101 T1 (a) d=7,18 mm (b) d=3,02 mm

En el grfico 4 se muestra que la relacin que existe entre el rea total de la muestra y el rea de la fisura tiende a cero a medida que el diámetro del alambrcn se reduce. En este tipo de defecto no se realiz el ensayo de torsin debido a que las imgenes obtenidas en el SEM nos muestran que la fisura sigue presente.



Grfico 4. Porcentaje de rea del defecto respecto del rea vs. Diámetro

### 5.3.2 Fisura transversal en forma de "V"

En los materiales que poseen las fisuras de tipo "V" durante el trefilado la profundidad del defecto disminuye al elevarse el centro sin producirse solapamiento

entre las paredes. Se observó que las fisuras que presenten una profundidad relativa menor a 0,35 no presentan problemas durante el trefilado. En los casos donde la profundidad relativa del defecto es superior a 0,35, la tensión de tirado sumado a la tensión de compresión indirecta generada por la trefila son superiores a la tensión máxima soportada por alambón por lo tanto el alambón se fractura durante el trefilado.

La fractura de las muestras se dio en todos los casos cuando se quería pasar del diámetro 9,07mm al diámetro 8,02 mm. Las muestras que se trefilaron exitosamente fueron la G, H y J (Tabla 4)

Los tres alambones que fueron trefilados hasta el diámetro final se les realizó la prueba de torsión la cual pasaron exitosamente. Una vez terminado el ensayo se confirmó que las paredes del defecto no se solapan. Este resultado nos lleva a la conclusión de que el defecto inicial se “cura” y que el material se encuentra apto para su próxima aplicación.

La figura 21 muestra la geometría de la fisura inicial y la figura 22 muestra la apariencia final del alambón cuando rompe en la trefila. Se observa que no existen diferencias de comportamiento entre los materiales.

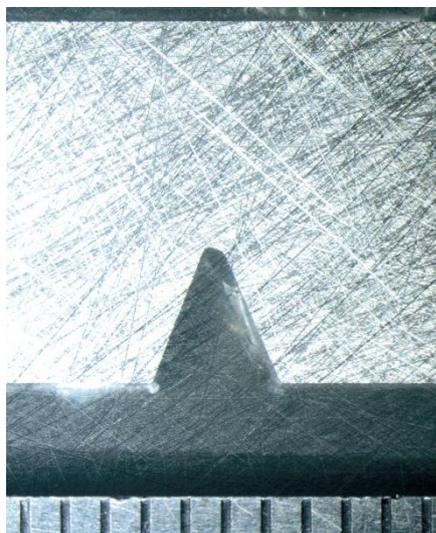


Figura 21. Geometría de la fisura inicial.

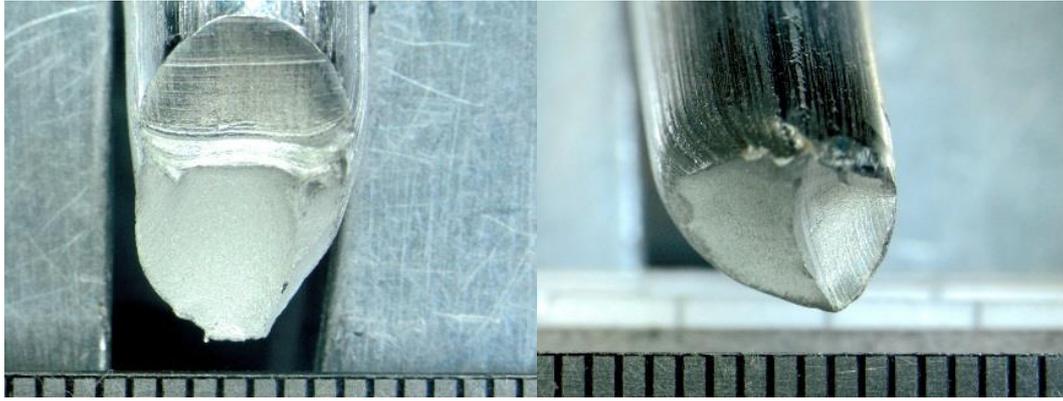


Figura 22. Area de fractura de la muestra I (Tabla 4)

### 5.3.3 Fisura transversal estrecha

En los alambrones que presentaban fisuras estrechas, se observó que para profundidades relativas superiores a 0,34 la suma de tensiones durante la reducción de la sección es superior a la tensión máxima soportada por alambraón por lo que alcanza la fractura. Las muestras que superaron exitosamente el proceso de trefilado fueron la M y N para el material 1350 H11 y la P para 6101 T1 (Tabla 5). Al igual que las fisuras transversales anchas la profundidad del defecto se reduce durante el trefilado. En la figura 23 se observa la fisura inicial.

Para determinar el estado final de la fisura se realizó un ensayo de torsión donde se concluyó que debido a la estrecha distancia inicial de las paredes del defecto, éstas se solapan como se ve en la figura 24. El solapamiento de las paredes hace que el material no sea útil para la siguiente aplicación.

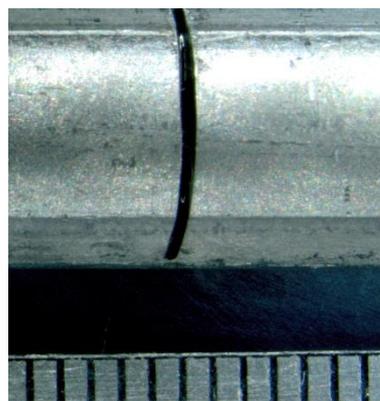


Figura 23. Alambraón 6101 T1, fisura estrecha.

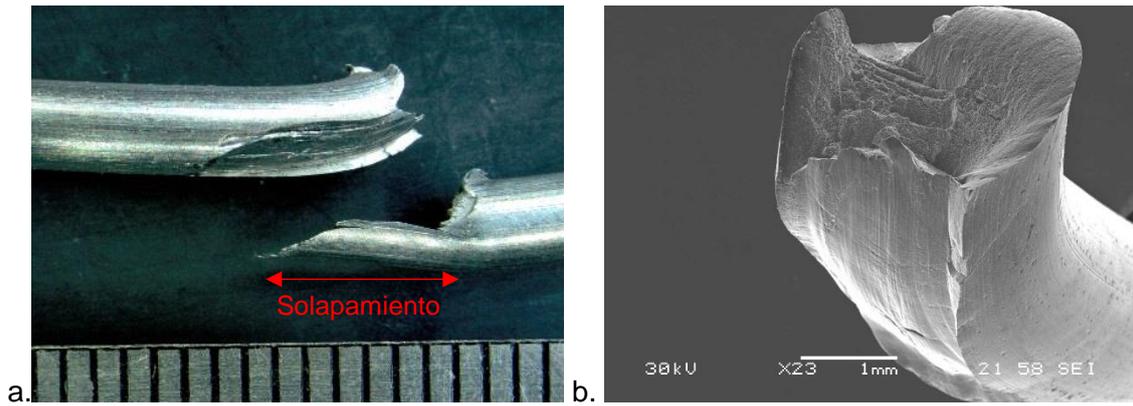


Figura 24. Alambrcn 6101 T1 muestra I, d= 3,02 mm.

#### 5.4. Ovalizaci3n

No se percibieron problemas a la hora de trefilar, ni se observaron defectos superficiales correspondientes o generados por la ovalizaci3n que presentaban las muestras iniciales. Como se observa en las figuras 25 y 26 para ambas muestras la ovalizaci3n es menor a 0,1 mm despu3s del cuarto paso de trefila.

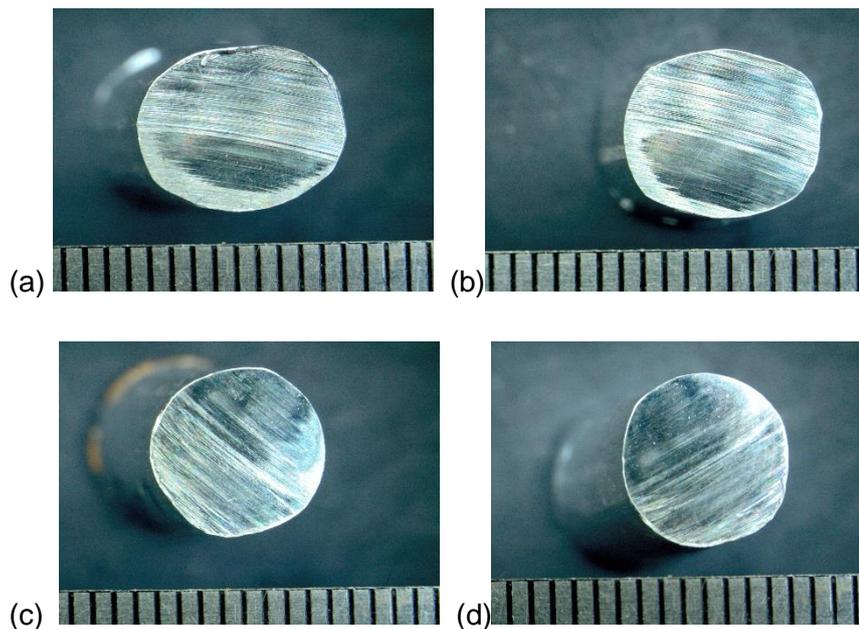


Figura 25. Ovalizaci3n alambrcn 1350 H11 (a) d=9,45 mm (b) d= 9,03 (c) d=8,04 mm (d) d=7,18 mm.

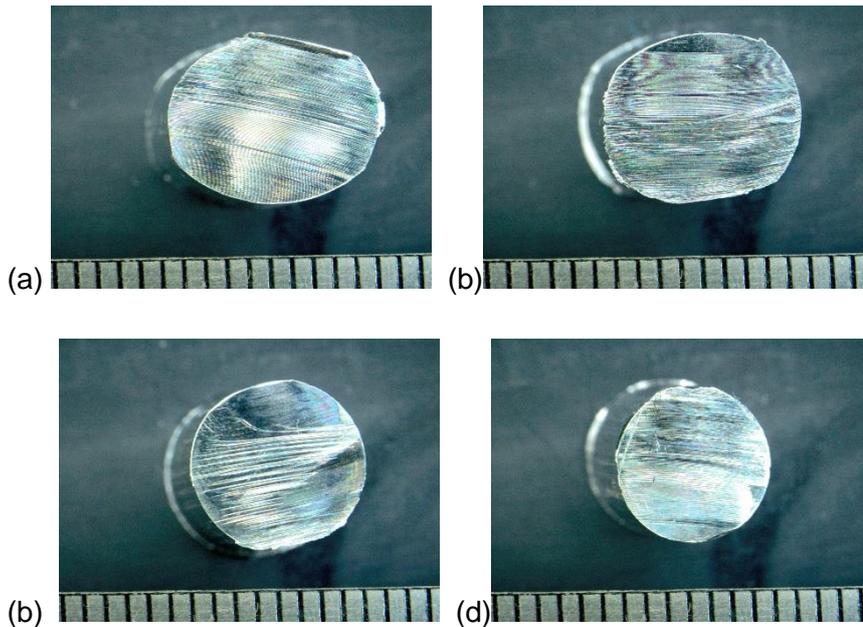


Figura 26. Ovalización alambión 6101 T1 (a)  $d=9,45$  mm (b)  $d= 9,03$  (c)  $d=8,04$  mm (d)  $d=7,18$  mm.

### 5.5. Perforaciones

Se logró trefilar exitosamente los alambiones con perforaciones de profundidad relativa 0.5 para ambos materiales y a distintas velocidades.

El alambión 6101 T1 que presentaba una perforación inicial de 9,5 mm no se logró trefilar independientemente de la velocidad utilizada. En la figura 27 se observa el tipo de fractura que presenta el alambión cuando se buscó reducir el diámetro de 9,07 mm a 8,02 mm.

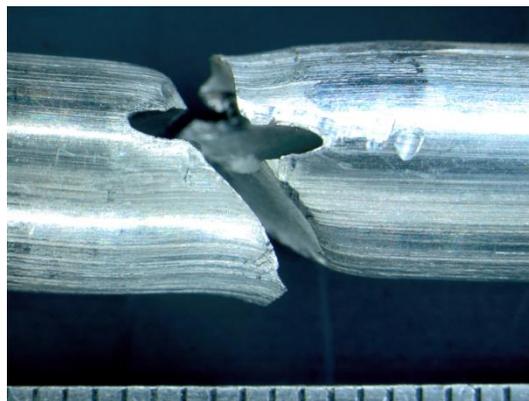


Figura 27. Alambión 6101 T1 con agujero pasante con fractura frágil a  $45^\circ$ .

El comportamiento del material 1350 H11 se modificó con el aumento de la velocidad de trefilado para las perforaciones iniciales de 9,5 mm de profundidad. A altas

velocidades de trefilado, las tensiones generadas sobre el defecto y sus alrededores fueron superiores a la tensión máxima admisible del alambrión lo que llevó a la fractura del material. Con bajas velocidades de trefilado se logró trefilar el material alcanzando los 3,02 mm de diámetro final. En la figura 28 se observa cómo la geometría del defecto generado con la agujereadora de banco tiende a ovalizarse hasta transformarse en una fisura longitudinal paralela al flujo, sobre la cual se concluyó anteriormente que no afecta a este proceso. En la misma figura se puede ver cómo las líneas superficiales acompañan la deformación de perforación. A los alambrones que alcanzaron un diámetro de 3,02 mm se les realizó un ensayo de torsión en el cual se observó que el defecto inducido por el material permanece, aunque las fotos obtenidas por el SEM muestren que la apariencia del defecto tiende a relacionarse a una fisura longitudinal superficial (figura 29). Este tipo de fisuras no genera ninguna dificultad a la hora de trefilar; sin embargo, hacen que el material no sea propicio para posteriores aplicaciones.

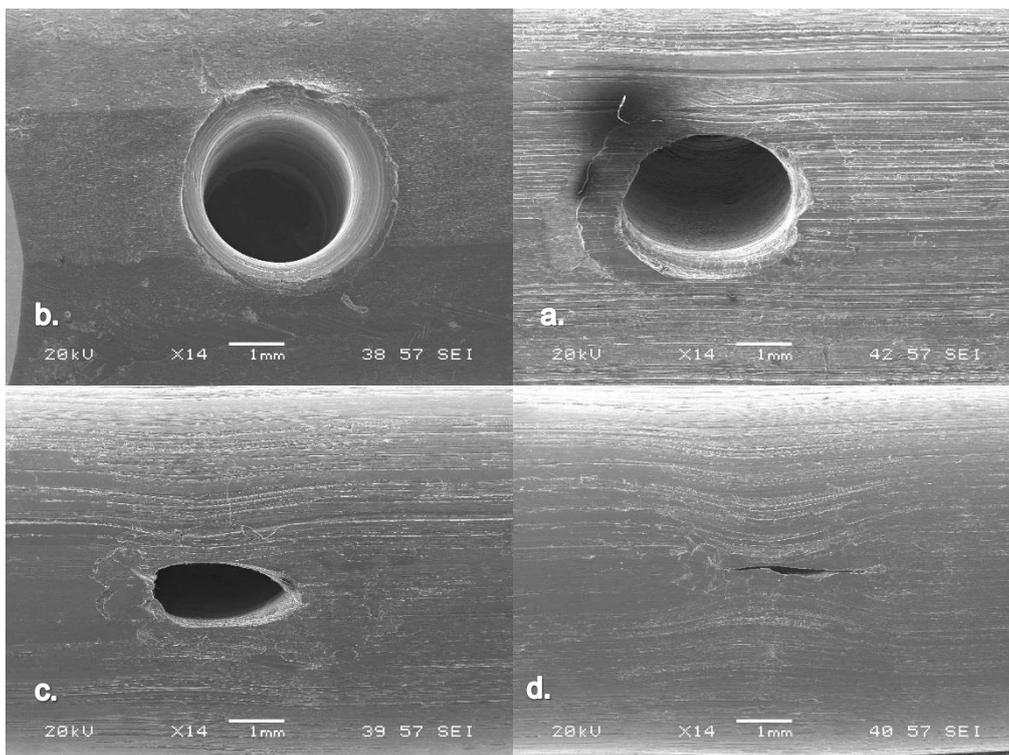


Figura 28. Alambrión 1350 H11 con agujero pasante de 2.43 mm de diámetro

(a)  $d= 9,44$  (b)  $d= 9,03$  mm (c)  $d= 8,04$  mm (d)  $d= 7,18$  mm.



Figura 29. Alambroón 1350 H11 con agujero pasante luego del ensayo de torsión

Sabiendo que los defectos de menor profundidad se logran trefilar sin inconvenientes para ambos materiales y a todas las velocidades, se decidió que para colocar las inclusiones en el alambroón (sección 5.6) se utilizara este tipo de geometría.

### 5.6. Inclusiones

Por el resultado favorable que se obtuvo a partir del trefilado de las perforaciones de una profundidad menor a 4,5 mm en ambos materiales, 1350 H11 y 6101 T1, las inclusiones se colocaron en el alambroón utilizando este defecto inicial.

En la figura 30 se puede observar el resultado final del trefilado cuando se utilizó una inclusión de acero de 3,5 mm de diámetro y espesor de 1,5 mm en un alambroón de aluminio 1350 H11. El alambroón se fracturó durante el trefilado cuando se buscaba reducir el diámetro de la sección de 3,78 mm a 3,38 mm. La inclusión no afecta al trefilado hasta que el área de la inclusión representa un 85% del área total.

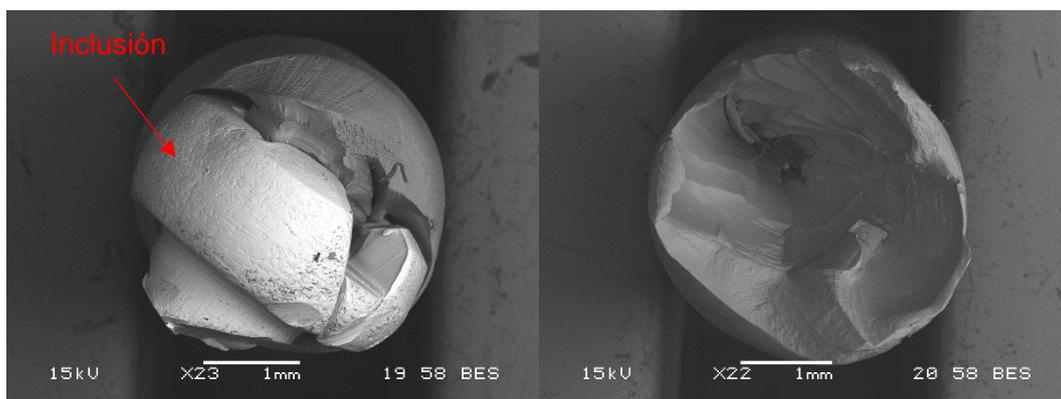


Figura 30. Aluminio 1350 H11 con inclusión de acero redondeado,  $d=3.78$  mm.

El resultado obtenido con el alambroón 6101 T1 al utilizar la misma inclusión, acero de geometría circular, fue opuesto. El alambroón alcanzó la fractura en la tercera

pasada y esto se puede relacionar con la baja ductilidad que presenta el material sumado a la acción combinada de la tensión axial de tirado y la tensión indirecta de compresión y con la geometría y dureza de la inclusión. En la figura 31 se muestra una parte del alambón fracturado, donde se distingue que la fractura comienza en el momento donde se produce la reducción de diámetro en la zona de acercamiento de la trefila.

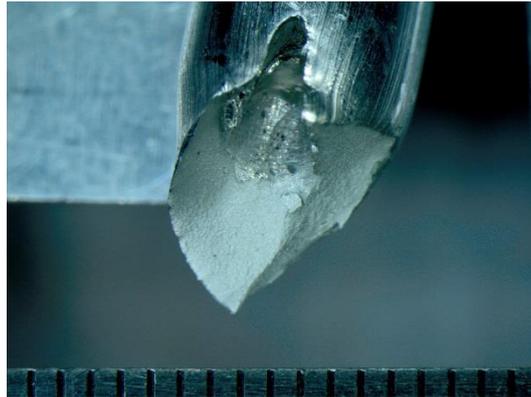


Figura 31. Fractura frágil de alambón de aluminio 6101 T1 en presencia de inclusión de acero

En la figura 32 se observa el resultado final de introducir una inclusión de acero de 22 mm de largo y 2 mm de diámetro en un alambón 1350 H11. Para este caso se realizó una perforación paralela al flujo donde se agregó la inclusión. La muestra alcanzó un diámetro final de 3,39 mm ya que se fracturó durante el trefilado al querer alcanzar un diámetro de final de 3,02 mm. Por ser una inclusión larga y esbelta, se concluye que ésta no afecta al trefilado hasta que el área de la inclusión representa un 44% del área total.

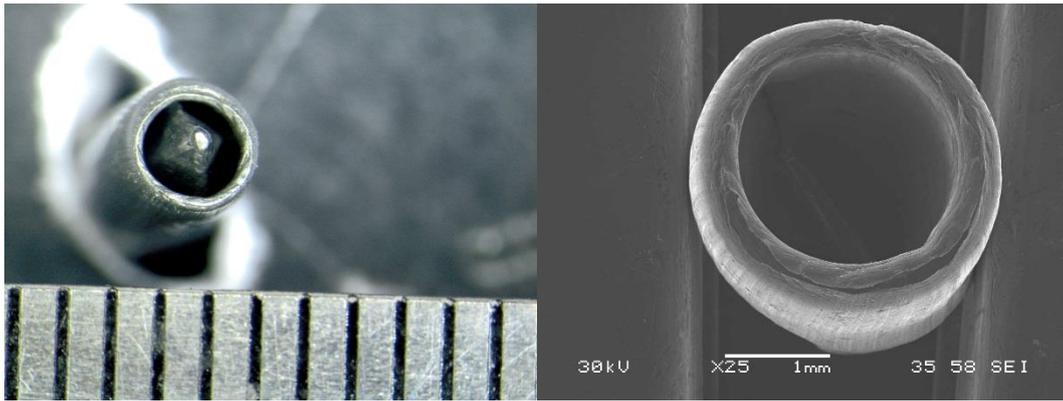


Figura 32. Aluminio 1350 H11 incluido con acero de 22 mm de largo y 2 mm de diámetro.

Las inclusiones acero utilizadas son inclusiones de alta dureza, difícilmente deformables y no relacionadas con el proceso de obtención del alambroón de aluminio, sin embargo, nos dieron una idea de cómo se comporta el alambroón en presencia de una inclusión de alta dureza.

El aluminosilicato es un material que se encuentra en los canales de colada del aluminio. En caso de que haya algún problema en el mantenimiento general de los hornos o los canales de colada es probable que parte del material contamine el aluminio fundido. Al ser un material de estructura granulada, se alcanzó trefilar ambos alambrones hasta alcanzar 3,02 mm de diámetro sin observar ningún problema en el trefilado. En la figura 33 se puede observar cómo la deformación que sufre el alambroón en trefila es acompañada con el material granulado.

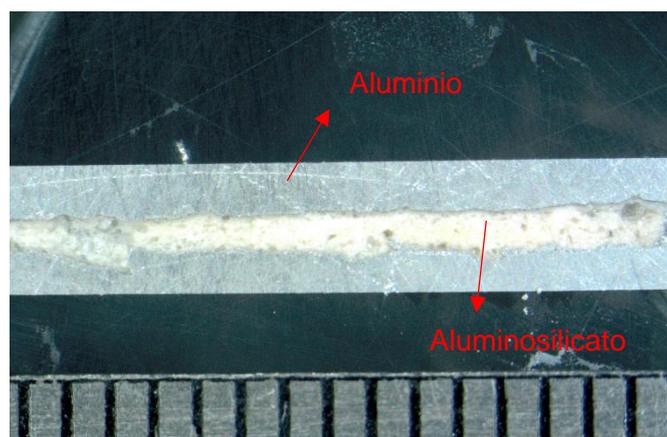


Figura 33. Alambroón de 3,02 mm de diametro incluido con aluminosilicato en polvo.

Por último, se utilizó una inclusión de silicio de alta dureza. Ambos materiales, 1350 H11 o 6101 T1, alcanzaron el diámetro final de 3,02 mm. Por ser un material frágil el silicio se fragmentó en trozos más pequeños durante el trefilado. En las figuras 34 y 35 se observa el resultado final de ambos materiales.

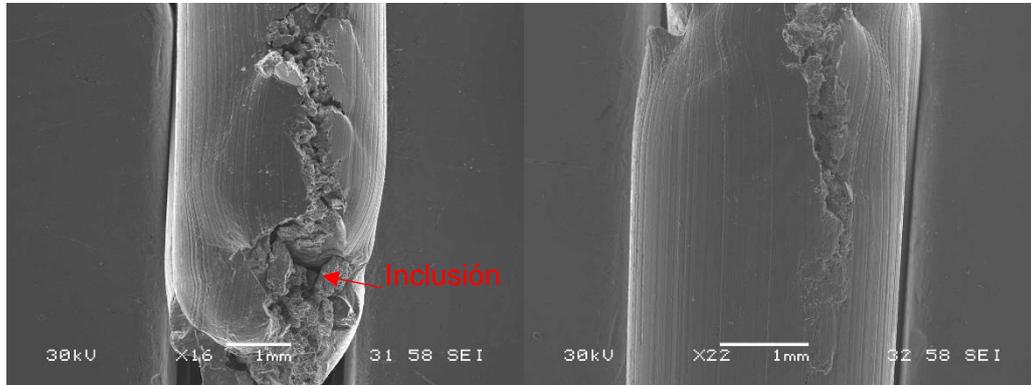


Figura 34. Aluminio 1350H11 incluido con silicio.

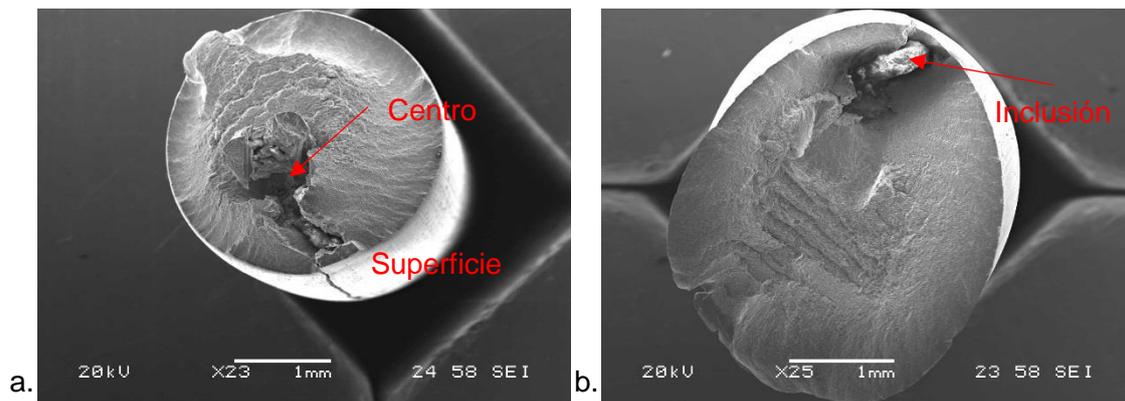


Figura 35. Aluminio 6101 T1 con inclusión de silicio. Vista: área transversal.

En todos los casos en los que la inclusión no era deformable, acero y silicio, se observó que ésta actúa como una barrera del flujo y lo que se ve del otro lado de la inclusión es algo similar a un túnel. En la figura 35.a. se observa una característica distintiva del proceso: la diferencia en la velocidad entre la superficie y el centro, verificado en la sección 5.2. En la figura 35.b. se marcó la inclusión que queda en el alambón.

En la figura 36 se pueden observar cuatro ejemplos de roturas de alambre durante el proceso de trefilado. En su mayoría, las roturas en el trefilado se deben a deficiencias en la lubricación, trefilas en mal estado, secuencia de trefilado incorrecto (i.e. deformación excesiva entre trefilas) o inclusiones en el alambón.

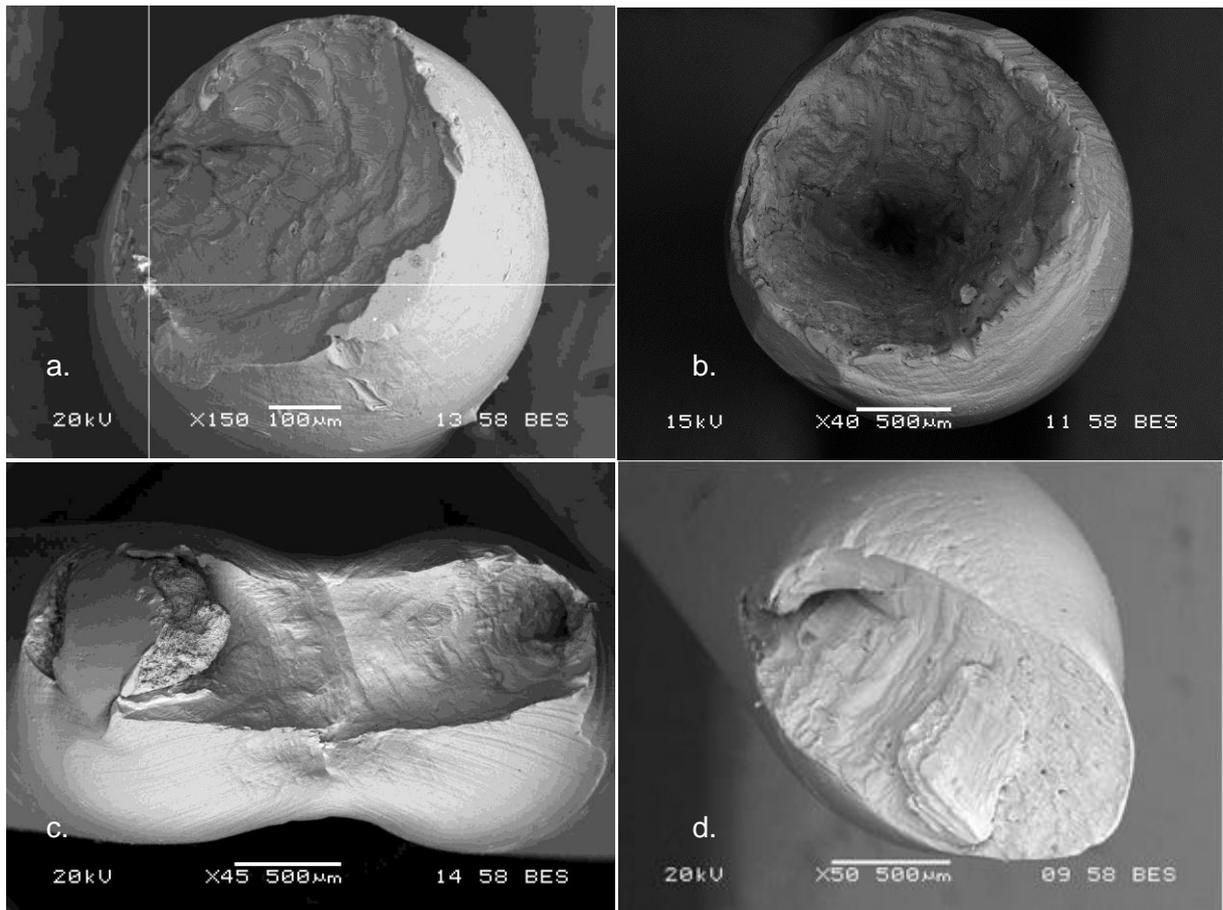


Figura 36. Imágenes obtenidas de distintos eventos de rotura de alambre durante el trefilado.

Los resultados obtenidos en el trabajo son análogos a los observados en base a la experiencia de Aluar con sus clientes de alambón, por lo tanto lo relevado en este trabajo resulta extrapolable a casos que tengan lugar con clientes que trefilen en el alambón de Aluar.

## 6. Conclusiones

En primer lugar, se generaron exitosamente defectos artificiales en ambos materiales, aleación de aluminio 1350 H11 y 6101 T1, que permitieron caracterizar su evolución en el proceso de trefilado y comparar la respuesta de las distintas aleaciones.

En cuanto a la caracterización del material utilizado, se destaca el aumento de la tensión de fluencia y de rotura a medida que la sección disminuye. Este aumento está relacionado al endurecimiento por deformación que presentan ambos materiales durante el trefilado. El alambre 6101 T1 presenta además endurecimiento por precipitación de  $Mg_2Si$ .

A través del análisis de flujo se verificó que la velocidad del flujo durante el trefilado del alambre en la parte central es superior al flujo de material en la periferia del alambre.

Respecto a las fisuras longitudinales no se observaron problemas durante el trefilado, independientemente de la profundidad de la fisura. Sin embargo, a través de las fotografías obtenidas con el microscopio SEM se puede afirmar que el material no es apto para próximas aplicaciones debido a que el defecto se mantiene.

En el caso de las fisuras transversales se concluyó que, sin importar el tipo de geometría que presentara la fisura, estrecha o tipo "V", si la profundidad relativa del defecto es menor o igual 0,35 no afecta al proceso del trefilado. En las fisuras estrechas se observa que por la proximidad de las paredes existe un solapamiento que, cuando se alcanza una reducción del 70%, el defecto se mantiene en la pieza, por lo que no lo hace apto para una siguiente aplicación. En las fisuras de tipo "V", aquellas muestras que alcanzaron un 70% de reducción respecto al diámetro inicial, pasaron exitosamente la prueba de torsión, por lo que se determina que el material es apto para una siguiente aplicación.

La ovalización del alambre, independientemente del material o la velocidad de trefilado utilizada, no genera problemas para el proceso de trefilado. Se observó que la ovalización es menor a 0,1 mm cuando se reduce un 20% el diámetro inicial.

Respecto de las perforaciones, se observó que para ambos materiales, cuando la profundidad de las perforaciones es menor a 4,5 mm, el material se logra trefilar con éxito y el defecto que inicialmente era circular tiende a alargarse, asemejándose a una fisura longitudinal. En el caso de los defectos que presentan inicialmente una profundidad de 9,5 mm se observó que para la aleación 6101 T1 no es posible trefilar el

material. Por el contrario, en la aleación 1350 H11 sólo se puede trefilar a bajas velocidades. Se vuelve a mencionar que en presencia de este defecto el material no es apto para su uso final.

En el proceso de trefilado de alambón de aluminio, las fracturas del alambón se dan, principalmente, por la presencia de inclusiones. La única diferencia que se observó entre las aleaciones fue cuando se utilizó como inclusión acero, material de alta dureza y poco deformable, en donde la aleación 1350 H11 se trefiló hasta que la inclusión representaba un 85% del área total. En el caso de la aleación 6101 T1, la misma alcanzó una reducción final de 3% antes de que fracture durante el trefilado. La respuesta que se obtuvo utilizando aluminosilicatos o silicio fue igual en ambos materiales. Se obtuvo una reducción del 70% en ambos materiales, 6101 T1 y 1350 H11; sin embargo el alambre final no se encuentra apto para una próxima utilización.

Al utilizar inclusiones no deformables, como el acero y el silicio, se puede ver como la inclusión actúa como una barrera de flujo de material en la trefila, lo que nos permite ver una diferencia de flujo entre la superficie y el centro una vez que el material rompe. Especialmente en lo que respecta a la comprensión de esta problemática, es importante esta característica ya que da una primera aproximación de por qué el material no se logró trefilar debido a inclusiones relacionadas con la fabricación.

## 7. Trabajo futuro

- Realizar los ensayos de tracción con probetas normalizadas y repetir cada diámetro al menos tres veces. Si la deformación del alambre 6101 T1 se mantiene igual, realizar un estudio detallado para determinar el por qué; evaluando diferentes concentraciones, superficies de fractura y fases presentes.
- Se determinó que la ovalización y las fisuras transversales en forma de “V” no generan problemas a la hora de trefilar y que el material final se encuentra apto para la próxima aplicación por lo tanto se propone investigar si estos defectos generan problemas en la conductividad del material, aunque es de esperar que no influyan.
- Estudiar si existen defectos superficiales relacionados a la presencia de ovalización o fisura transversal tipo “V”, para determinar si pueden ser posibles puntos críticos para el inicio de la corrosión localizada.
- Repetir los ensayos para la aleación de aluminio 6201 (aleación utilizada también como conductor eléctrico) y comparar los resultados con los obtenidos para la aleación 6101 T1.
- Obtener un diámetro final inferior para determinar que sucede con el solapamiento de las paredes en el caso de presentar fisuras transversales estrechas.

## 8. Bibliografía

1. Aluminum Association (1989) Aluminium Electrical Conductor Handbook (sección 1;3), Aluminum Association.
2. Portal Minero. (2018). Bolsa de Metales. Recuperado de <http://www.portalminero.com/display/bols/Bolsa+de+Metales>
3. Sergey, L., Abdrakhman, N., Andrey, V., & Irina, V. (2014). New Combined Process “Pressing-drawing” and Impact on Properties of Deformable Aluminum Wire. *Procedia Engineering*, 81, 1505-1510. doi: 10.1016/j.proeng.2014.10.181
4. Conductor, Products, Zhengzhou Jinhang High-tech Co Ltd. (2017). Recuperado de [http://www.zzjscable.com/products\\_list/pmcl=22.html](http://www.zzjscable.com/products_list/pmcl=22.html)
5. Preckel, A., Varayud, M., Canullo, M.V., (2008) “Producción de alambión eléctrico serie 6000 en Aluar. Aluar S.A.I.C.
6. Altenpohl, D., y Kaufman, J. (1998). Aluminum: technology, applications, and environment (6th ed.). Washington, DC: Aluminum Association.
7. Wright, R. (2011) Wire Technology Process engineering and Metallurgy. Amsterdam: Elsevier.
8. Tassi, O. (1981) Nonferrous Wire Handbook, Vol. 2: Bare Wire Processing (ch 1). Connecticut: The Wire Association International, INC.
9. Kalpakjian, S., Schmid, S., & Espinoza Limón, J. (2008). Manufactura, ingeniería y tecnología (pp. 418-419). México, D.F.: Pearson Educación.
10. YOSHIDA, K., NORASETHASOPON, S., SHINOHARA, T., & IDO, R. (2003). Influence of Flaws of Wire Rod Surface, Inclusions and Voids on Wire Breaks in Superfine Wire Drawing. *JSME International Journal Series A*, 46(3), 365-370. doi: 10.1299/jsmea.46.365
11. ASM International Handbook Committee. (1991). *ASM Handbook, Volume 04 - Heat Treating* (pp. 1861-1960). ASM International.
12. Magalhães, F., Pertence, A., Campos, H., Aguilar, M., & Cetlin, P. (2012). Defects in axisymmetrically drawn bars caused by longitudinal superficial imperfections in the initial material. *Journal Of Materials Processing Technology*, 212(1), 237-248. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2011.09.009
13. Shinohara, T., & Yoshida, K. (2004). Deformation Analysis of Surface Defects in Wire Drawing. *AIP Conference Proceedings*, 712(1), 594-597. doi: 10.1063/1.1766591
14. Shinohara, T., y Yoshida, K. (2005). Deformation analysis of surface flaws in stainless steel wire drawing. *Journal Of Materials Processing Technology*, 162-163, 579-584. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.125

15. Aluminium / Aluminum1350 Alloy (UNS A91350). (2019). Retrieved from <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6591>
16. Aluminium / Aluminum 6101 Alloy (UNS A96101). (2018). Recuperado de <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=663927/11>
17. ASM International Handbook Committee. (1990). *ASM Handbook, Volume 02 - Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials* (10th ed.). ASM International.
18. Amado, M. (2010). Comparación de las propiedades obtenidas en alambrón de aleación de aluminio AA6201 producidos con diferentes tratamientos térmicos (p. 27).

## 9. Anexo

En las siguientes tablas se muestran los valores obtenidos para generar los gráficos 1 y 2 respectivamente.

Tabla 7. Aleación de aluminio 1350 H11 (Gráfico 1).

	Diámetro	Tensión de fluencia (Rp 0,2%)	Tensión máxima	Elongación
Alambrón	9,44	80,07	91,92	0,12
907	9,03	93,37	97,74	0,06
802	8,04	113,86	116,36	0,044
720	7,18	114,78	123,08	0,04
644	6,42	125,17	129,61	0,04
576	5,73	129,18	134,61	0,04
516	5,16	128,1	138,55	0,04
462	4,59	132,45	141,65	0,036
415	4,14	139,05	145,73	0,028
378	3,75	142,8	149,19	0,036
338	3,39	149,34	158,13	0,032
302	3	154,08	161,35	

Tabla 8. Aleación de aluminio 6101 T1 (Gráfico 2).

	Diámetro	Tensión de fluencia (Rp 0,2%)	Tensión máxima
Alambrón	9,44	154,00	196,21
907*	9,03		
802	8,04	235,29	242,38
720	7,18	245,53	263,78
644	6,42	254,91	275,34
576	5,73	263,99	289,10
516	5,16	282,96	301,48
462	4,59	299,27	309,43
415	4,14	309,23	312,17
378	3,75	305,87	347,60
338*	3,39		
302	3	343,66	350,98

\* Durante el ensayo, la probeta rompió en las mordazas por lo que no se tomó como una medición válida.



UNIVERSIDAD NACIONAL  
*de* MAR DEL PLATA  
.....

