

# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

## FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DE TREFILADO DE ALAMBRE DE COBRE, EN DIFERENTES CONDICIONES DE LUBRICACIÓN, BAJO CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD**

**COMPONENTE: TREFILADO DE ALAMBRE DE COBRE PARA CONDUCTORES ELÉCTRICOS, CON LUBRICACIÓN.**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**MARTIN TADEO MONAR TORRES**

[martin.monar@epn.edu.ec](mailto:martin.monar@epn.edu.ec)

**DIRECTOR: ING. WILLAN LEOPOLDO MONAR MONAR M.Sc.**

[william.monar@epn.edu.ec](mailto:william.monar@epn.edu.ec)

**DMQ, febrero 2023**

## **CERTIFICACIONES**

Yo, declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

---

**MARTIN TADEO MONAR TORRES**

MARTIN TADEO MONAR TORRES

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por MARTIN TADEO MONAR TORRES, bajo mi supervisión.

---

**ING. WILLAN MONAR M.Sc.**

Certificamos que revisamos el presente trabajo de integración curricular.

---

**MARIA SOTOMAYOR M. Sc.  
REVISOR1 DEL TRABAJO DE  
INTEGRACIÓN CURRICULAR**

---

**PATRICIA RODRIGUEZ PhD.  
REVISOR2 DEL TRABAJO DE  
INTEGRACIÓN CURRICULAR**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

MARTIN TADEO MONAR TORRES

ING. WILLAN MONAR M.Sc.

## DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo de titulación a mi padre y madre que con su esfuerzo, paciencia, apoyo y amor incondicional me ayudaron a culminar con éxito mi sueño de niño.



## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco, en primer lugar, a mi familia por todo su esfuerzo y paciencia. A mi padre por su apoyo incondicional y ser un ejemplo por seguir y a mi madre por su amor incondicional.

A todos mis amigos por los buenos y malos momentos que superamos juntos. A Víctor, Danny y Santiago futuros colegas que estuvieron a mi lado en mi camino a ser ingeniero.

A aquellas personas que me ayudaron a salir adelante y que con sus enseñanzas y saberes me extendieron una mano.

Agradezco a mis docentes por haber compartido sus conocimientos y experiencias.

Finalmente quiero agradecer a mi mentor y amigo Luis Nájera por sus innumerables enseñanzas y consejos.

# ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VI
ÍNDICE DE TABLAS .....	VII
RESUMEN .....	VIII
ABSTRACT .....	IX
1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1 Objetivo general.....	1
1.2 Objetivos específicos.....	1
1.3 Alcance .....	2
1.4 Marco teórico.....	3
1.4.1 Aleaciones de cobre .....	3
1.4.2 Trefilado de alambre.....	4
1.4.3 Lubricación en el trefilado.....	5
1.4.4 Máquinas de trefilar.....	6
1.5 Variables del proceso de trefilado .....	9
1.5.1 Tensión .....	9
1.5.2 Temperatura.....	9
1.5.3 Velocidad de avance.....	9
2. METODOLOGÍA.....	11
2.1 Caracterización del material base .....	11
2.2 Determinación del lubricante.....	11
2.3 Variables del proceso de trefilado .....	12
2.4 Caracterización del alambre trefilado.....	13
2.4.1 Ejecución del proceso de trefilado.....	13
2.4.2 Obtención de probetas .....	14
2.5 Ensayos.....	15
2.5.1 Inspección visual .....	15
2.5.2 Ensayo de espectrometría de chispa.....	16

2.5.3	Ensayo Metalográfico – Microscopia Óptica.....	17
2.5.4	Ensayo de Microdureza.....	21
2.5.5	Criterios de sostenibilidad.....	22
3.	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	23
3.1	Resultados.....	23
3.1.1	Inspección visual .....	23
3.1.2	Ensayo de Microscopia Óptica .....	24
3.1.3	Ensayo de Microdureza.....	29
3.1.4	Ensayo de espectrometría de chispa.....	34
3.2	Conclusiones.....	35
3.3	Recomendaciones .....	36
4.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	37
5.	ANEXOS .....	38
	ANEXO I. Informe de resultado: Microdureza y Metalográficos .....	38
	ANEXO II. Metalografías del alambre trefilado sin ataque químico.....	41
	ANEXO III. Metalografías del alambre de cobre trefilado lubricado con aceite y grasa automotrices con ataque químico.....	46
	ANEXO IV. Microdurezas del del alambre de cobre trefilado lubricado con aceite y grasa automotrices.....	55
	ANEXO V. Informe del ensayo de espectrometría de chispa.....	63

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Trefilado de varilla o alambre.....	5
Figura 1.2	Formación de película de lubricante durante el trefilado .....	6
Figura 1.3	Trefiladora con acumulación y torsión [6].....	7
Figura 1.4	Trefiladora con acumulación sin torsión [3].....	7
Figura 1.5	Máquina trefiladora del Laboratorio de Conformado <i>de la FIM</i> .....	8
Figura 1.6	Trefila de carburo de tungsteno .....	8
Figura 2.1	Lubricante de motor para automóvil y grasa automotriz.....	12
Figura 2.2	Ahusado del alambre de cobre .....	13
Figura 2.3	Lubricación del alambre de cobre .....	13
Figura 2.4	Esquema de probeta.....	14
Figura 2.5	Elaboración de probetas .....	14

Figura 2.6 Medición del alambre trefilado y fotografía del alambre trefilado .....	15
Figura 2.7 Probeta para ensayo de espectrometría .....	17
Figura 2.8 Desbaste y pulido de probetas .....	18
Figura 2.9 Ácido y probeta atacada químicamente .....	19
Figura 2.10 Microscopio metalográfico Olympus.....	19
Figura 2.11 Micrografías de alambre de 1.5 y 2.1 en diámetro trefilados con grasa.....	20
Figura 2.12 Micrografía de alambre de 1.5 en diámetro lubricado con aceite luego del ataque químico .....	20
Figura 2.13 Micro durómetro DUROLINE-M .....	21
Figura 2.14 Micro Indentación.....	22
Figura 3.1 Micrografía de cobre electrolítico 10100 [3].....	24
Figura 3.2 Aleación C17200 antes y después de ser laminada en frío [3].....	27
Figura 3.3 Micrografías en el borde del alambre de $\varnothing$ 1.5 lubricado con grasa y aceite respectivamente .....	29
Figura 3.4 Resultados de microdureza medidos en el centro del alambre trefilado .....	31
Figura 3.5 Resultados de microdureza medidos en el borde del alambre trefilado.....	31
Figura 3.6 Influencia del trabajo en frío del cobre sobre el límite elástico y la resistencia a la tracción [2] .....	32
Figura 3.7 Influencia del trabajo en frío del cobre sobre la ductilidad [2] .....	33

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Conductividad eléctrica de los principales metales [2].....	4
Tabla 2.1 Variación en el diámetro del alambre trefilado.....	12
Tabla 2.2 Especificaciones técnicas del equipo de espectrometría.....	16
Tabla 3.1 Diámetros del alambre trefilado.....	23
Tabla 3.2 Micrografías del alambre sin trefilar.....	24
Tabla 3.3 Micrografías de alambre trefilado lubricado con grasa con aumento de 100x ..	25
Tabla 3.4 Micrografías de alambre trefilado lubricado con grasa con aumento de 100x ..	26
Tabla 3.5 Micrografías de alambre trefilado lubricado con grasa .....	27
Tabla 3.6 Micrografías de alambre trefilado lubricado con aceite.....	28
Tabla 3.7 Microdureza del alambre lubricado con grasa y aceite respectivamente .....	30
Tabla 3.8 Microdureza del alambre sin lubricación .....	30
Tabla 3.9 Resultados del ensayo de espectrometría de chispa .....	34

## RESUMEN

El presente proyecto de integración curricular tiene como objetivo la caracterización de alambre de cobre inicialmente de 2.2 mm de diámetro y mediante el proceso de trefilado reducirlo a 1.5 mm de diámetro bajo dos condiciones de lubricación, aceite y grasa automotrices. El trabajo consta principalmente de la comparación en el uso de lubricante para finalmente concluir con que lubricante se tienen mejores resultados en el proceso de trefilado. Se muestra la microestructura presente en el alambre trefilado tanto en el centro como en el borde y para analizar la variación de la microestructura se muestra la metalografía del alambre sin ningún proceso de trefilado. Para el análisis de la dureza se presenta la dureza en el centro y en el borde, con los datos obtenidos se realiza un diagrama que permite conocer la variación de dureza ocurrida durante el proceso de trefilado. En la parte final se describen criterios de sostenibilidad que permiten optimizar este proceso de fabricación y a su vez reducir los desperdicios generados.

**PALABRAS CLAVE:** cobre electrolítico, trefila, trefilado con lubricante, deformación plástica.

## **ABSTRACT**

The present curricular integration project has as objective the characterization of copper wire initially of 2.2 mm in diameter and through the drawing process to reduce it to 1.5 mm in diameter under two conditions of lubrication, automotive oil, and grease. The work consists mainly of the comparison in the use of lubricant to finally conclude with which lubricant has better results in the drawing process. The microstructure present in the drawn wire is shown both in the center and on the edge and to analyze the variation of the microstructure, the metallography of the wire without any drawing process is shown. For the analysis of hardness, the hardness in the center and on the edge is presented, with the data obtained a diagram is made that allows knowing the variation in hardness that occurred during the drawing process. In the final part, sustainability criteria are described that allow optimizing this manufacturing process and, in turn, reducing the waste generated.

**KEYWORDS:** electrolytic copper, drawing, drawing with lubricant, plastic deformation.

# **1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO**

Por medio del presente estudio se busca analizar, los parámetros óptimos de trefilado de alambre de cobre para conexiones eléctricas, bajo diferentes condiciones de lubricación, así como la variación del parámetro que influye directamente en el proceso de trefilado, tal como es el porcentaje de reducción. El trefilado del alambre se realiza en una máquina trefiladora de alambre del laboratorio de Conformado Mecánico de la Facultad de Ingeniería Mecánica. Para cuantificar estos valores se realizarán pruebas y ensayos de laboratorio de espectrometría de chispa, microdureza, y metalografía, que permitirán caracterizar el alambre de cobre antes y después de ser trefilado.

Nuevos estudios permiten definir la cantidad óptima de lubricante a utilizar en cada pasada del alambre a través de los diferentes calibres, bajo criterios de sostenibilidad, siendo esta una excelente opción para diferentes aplicaciones industriales. El uso de lubricantes en el proceso de trefilado permite optimizarlo, puesto que ayuda a minimizar el consumo de energía, maximiza la vida de las herramientas e insumos, minimiza el desgaste de los materiales e impacto ambiental. Además, se precautelará el cuidado del operador respecto al uso y consumo de lubricante-refrigerante.

## **1.1 Objetivo general**

Analizar los parámetros de trefilado de alambre de cobre para conexiones eléctricas, en diferentes condiciones de lubricación y bajo criterios de sostenibilidad.

## **1.2 Objetivos específicos**

1. Recopilar información bibliográfica referida al proceso de trefilado de alambre de cobre bajo condiciones de lubricación.
2. Determinar la composición química y la microestructura presente en el alambre de cobre previamente a ser trefilado.
3. Llevar a cabo el proceso de trefilado de alambre de cobre bajo diferentes condiciones de lubricación.
4. Determinar la dureza del alambre trefilado de cobre de acuerdo con la variación de su diámetro.
5. Medir los diámetros del alambre trefilado de cobre bajo diferentes condiciones de lubricación.

### **1.3 Alcance**

En el presente proyecto se busca evaluar los distintos parámetros presentes en el proceso de trefilado de cobre, el cual se obtiene al usar la máquina de trefilado del Laboratorio de Conformado Mecánico de la FIM. El proceso de fabricación influye directamente en el costo final del producto, es indispensable conocer las condiciones óptimas de trefilado de acuerdo con el material a utilizar; entre estos parámetros se consideran el acabado superficial y la exactitud del calibre.

Para este proyecto de integración curricular, se inicia con una recopilación bibliográfica del estado del arte del proceso de trefilado. Luego se realizan pruebas experimentales para con esto poder evaluar los distintos parámetros, considerando distintas formas de lubricación, lo que ayudará en reducir el tiempo de producción, el gasto de energía permitiendo con esto maximizar la productividad y sostenibilidad del proceso.

Se realizarán pruebas de laboratorio para evaluar la microestructura y calidad superficial del alambre trefilado, para finalmente cuantificar los parámetros óptimos de trefilado del alambre de cobre.



## **1.4 Marco teórico**

En este apartado se expone las propiedades del cobre, sus aleaciones más comunes y su uso en las conexiones eléctricas; se describe el proceso de trefilado, así como sus principales características y aplicaciones en la industria moderna, de igual modo la influencia que tiene el uso de lubricante en este tipo de proceso, los lubricantes húmedos más utilizados y sus veneficios de uso. Se realiza la descripción de las máquinas más utilizadas en la fabricación de alambre y al igual que de la máquina empleada para el trefilado de alambre de cobre, presente en el laboratorio de Conformado Mecánico de la FIM.

### **1.4.1 Aleaciones de cobre**

El cobre es uno de los primeros materiales en ser extraídos a partir de minerales, este se presenta en la naturaleza como cobre elemental. Para su producción por lo general se usa un proceso pirometalúrgico, el cual se lo lleva a cabo en un horno de fusión rápida. Las aleaciones con base de cobre presentan densidades mucho más altas que la de los aceros, tienen buena resistencia a la fluencia, resistencia a la fatiga, a la termofluencia, una excelente ductilidad, resistencia a la corrosión y excelente conductividad eléctrica y térmica. Para aplicaciones eléctricas y microelectrónicas se usa cobre con un contenido menor al 0.2% de impurezas. Para este tipo de aplicaciones se añade una pequeña cantidad de cadmio, plata y alúmina, lo que mejora sus propiedades mecánicas como la dureza sin afectar su conductividad eléctrica. [1].

La mayoría de los metales son buenos conductores eléctricos, en la Tabla 1.1 se muestra la conductividad eléctrica de los principales metales, esto debido al gran número de electrones libres que poseen, el cobre debido a su elevada conductividad eléctrica es uno de los materiales más idóneos para conducir electricidad. Es importante denotar que la presencia de defectos cristalinos en los metales reduce su capacidad de conducir electricidad ya que estos actúan como centros de dispersión de electrones de conducción.[2] El cobre electrolítico usado para conductores eléctricos tiene una codificación de C10100 y para ser usado como conductor eléctrico este debe tener un contenido mínimo de 99.8% de Cu. [3]

**Tabla 1.1** Conductividad eléctrica de los principales metales [2]

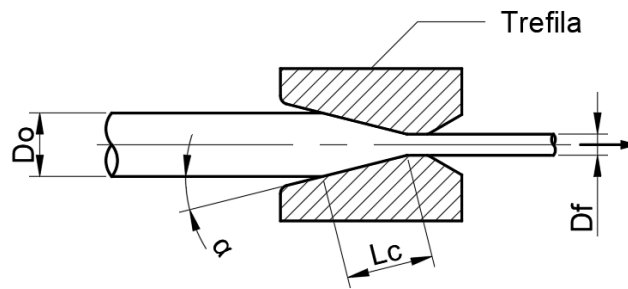
<b>Metal</b>	<b>Conductividad eléctrica <math>[(\Omega \text{ m}) \times 10^{-7}]</math></b>
Plata	6.8
Cobre	6.0
Oro	4.3
Aluminio	3.8
Latón	1.6
Hierro	1.0
Platino	0.94
Acero al carbono	0.6
Acero inoxidable	0.2

### 1.4.2 Trefilado de alambre

El trefilado es un proceso de deformación volumétrica, donde al halar el material a través de un dado de trefilado como se muestra en la Figura 1.1 donde en el trefilado de alambre y varilla la sección transversal se reduce en cada pasada. Si bien al realizar este proceso, se tiene la presencia de esfuerzos de tensión importantes, la compresión del material juega un papel muy importante, ya que cuando el material pasa a través de la matriz de trefilado, este se comprime, por esta razón, la deformación que tiene lugar en el estirado se denomina muchas veces como compresión indirecta. [2]

Mediante el proceso de trefilado se pueden obtener tanto barras como alambre, siendo el diámetro la principal diferencia entre estos dos elementos mecánicos. Para la fabricación de barras se realiza generalmente una operación de trefilado simple, donde el material se jala a través del dado de trefilado, la longitud de la barra es relativamente pequeña, ya que debido a su diámetro estas no pueden ser enrolladas y más bien permite obtener piezas rectas que posteriormente serán calibradas mediante rodillos abrasivos.

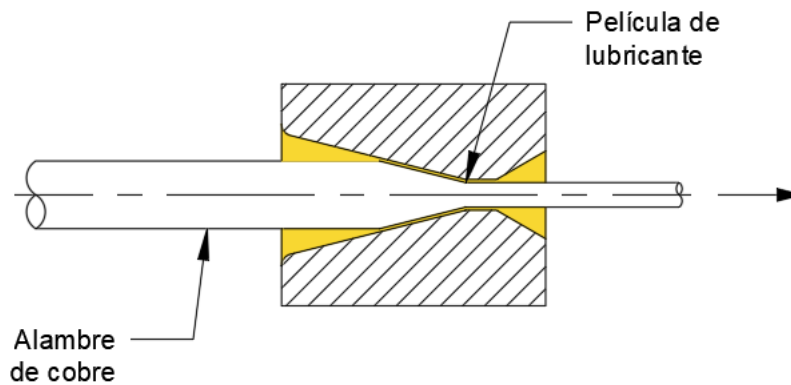
Por otro lado, la operación que se emplea para la fabricación de alambre es el trefilado continuo, su bajo diámetro permite obtener grandes extensiones de alambre que pueden ser deformados y almacenados en rollos. Estas dos operaciones indicadas anteriormente tienen el mismo principio, que consiste en la reducción de su área transversal, como se indica en la Figura 1.1 [2]



**Figura 1.1** Trefilado de varilla o alambre

### 1.4.3 Lubricación en el trefilado

Durante el proceso de trefilado el alambre pasa a través de diferentes dados de trefilación, aquí la fricción siempre está presente debido al estrecho contacto que existe entre la superficie del dado de trefilar y la del material de trabajo, debido a las elevadas presiones que soportan ambas superficies durante el proceso de fabricación tanto el material de trabajo y la trefila incrementan su temperatura. La presencia de fricción en la mayoría de los procesos de conformado es indeseable ya que ocasiona una serie de problemas tales como: retardar el flujo del material de trabajo, ocasiona la formación de esfuerzos residuales e incluso defectos en el material, requiere de incremento en la fuerza y potencia para el proceso de deformación, se produce un mayor desgaste en los dados de trefilación lo que causa pérdidas de precisión en el producto final. Algo muy importante para tener en cuenta es que los dados de trefilado presentan costos elevados de fabricación, donde su desgaste juega un papel muy importante en la producción, de aquí la necesidad del uso de lubricación durante todo el proceso y con esto generar una película fina de lubricante que evita el contacto directo entre el material de trabajo y el dado de trefilar, como se muestra en la Figura 1.2. Es muy importante utilizar un lubricante adecuado para cada tipo de material, sabiendo que cada determinado material puede generar mayor o menor desgaste sobre los dados de trefilación. [2] Otra de las principales ventajas del uso de lubricante es que también funciona como refrigerante durante el proceso de trefilado, esto evita que el material cambie drásticamente su microestructura a causa del incremento de temperatura y a su vez mejora la calidad superficial del alambre fabricado.



**Figura 1.2** Formación de película de lubricante durante el trefilado

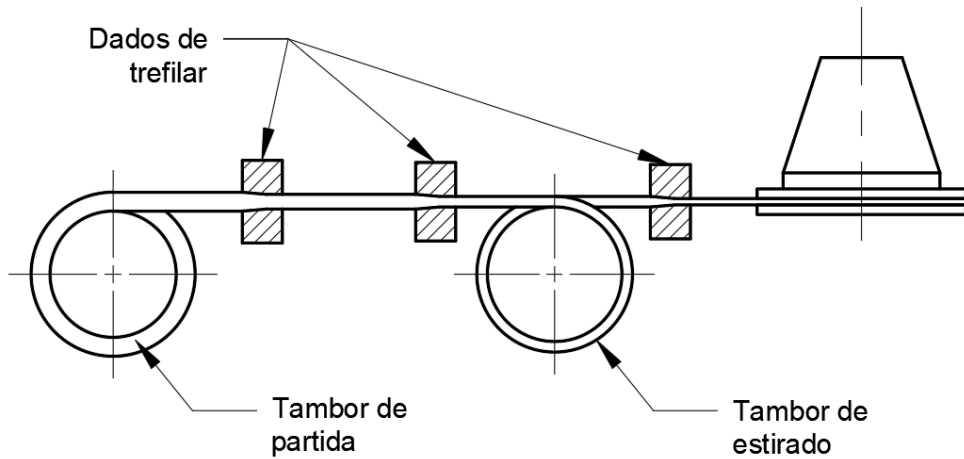
Entre los lubricantes húmedos más usados en el proceso de trefilado de cobre se tienen los aceites minerales, donde su principal aplicación es en operaciones difíciles de estampado y trefilado de metales no ferrosos. Las principales ventajas de este tipo de lubricante es que se obtiene una superficie más brillante, permite incrementar la velocidad de trefilado, evita que el dado se caliente drásticamente y prolonga su vida útil. [3]

Los lubricantes sintéticos son muy utilizados en el trefilado de cobre y aluminio, este tipo de lubricante tiene un bajo valor ácido lo que permite obtener un mejor acabado superficial y una superficie mucho más brillante, este lubricante es soluble en agua, lo que permite usarlo tanto como lubricante y como refrigerante, esto maximiza la producción de alambre permitiendo incrementar la velocidad de trefilado y usarlo en máquinas multihilos. [3]

#### 1.4.4 Máquinas de trefilar

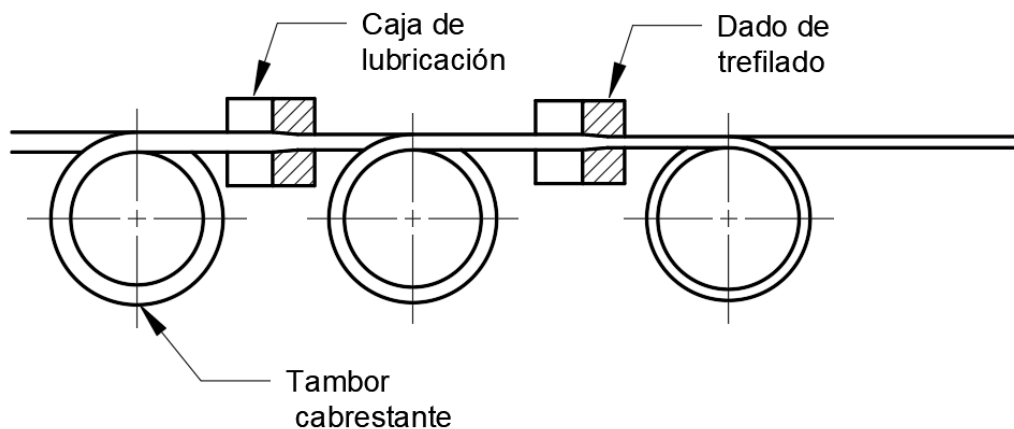
Para el proceso de fabricación de alambre se han desarrollado diferentes tipos de máquinas que permiten maximizar su producción. A continuación, se presentan los métodos más usados en la industria y las características de la máquina usada para el presente trabajo existente en el Laboratorio de Conformado.

La trefiladora con acumulación y torsión permite colocar dados de trefilar en serie agilizando la fabricación de alambre, logrando que en cada pasada se tenga mayor reducción de su diámetro, debido al diseño de la máquina trefiladora con acumulación y torsión mostrada en la Figura 1.3, el alambre se torsiona por sí solo sin necesidad de un método externo. [6]



**Figura 1.3** Trefiladora con acumulación y torsión [6]

Por otro lado, la trefiladora con acumulación sin torsión está conformada por dos carretes uno inferior que sale del dato de trefilado y uno superior giratorio que evita que el alambre se torsione en su proceso de fabricación, en cada dado de trefilación se colocan almacenadores de lubricante lo que permite dosificarlo progresivamente durante todo el proceso de trefilación, en la Figura 1.4 se muestra la máquina trefiladora con acumulación sin torsión. El carrete de entrada acumula el alambre varios giros, con esto se logra un trefilado continuo, pero, a causa del desgaste en las bandas este tipo de máquina requiere de mayor mantenimiento. [6]

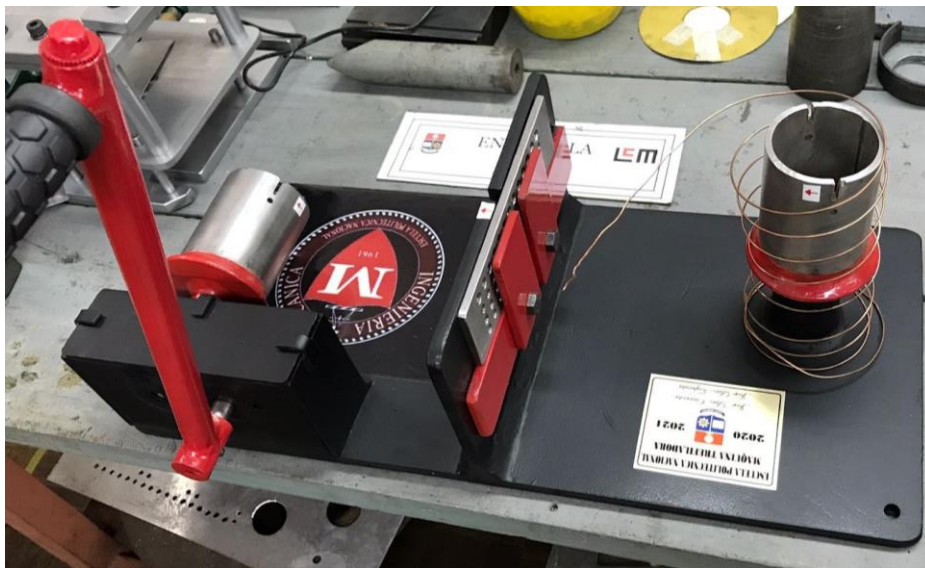


**Figura 1.4** Trefiladora con acumulación sin torsión [3]

La máquina trefiladora del laboratorio de conformado fue diseñada como trabajo de titulación con fines netamente académicos. Esta máquina permite trefilar alambre de forma manual, esto es posible ya que cuenta con una caja de engranajes accionada mediante

una manivela que permite transformar la fuerza ejercida por el brazo humano en fuerza mecánica. [7]

Ya que su uso es netamente dentro del laboratorio de uso académico, esta máquina no está diseñada para trefilar grandes extensiones de alambre, pero esto lo compensa con su gran versatilidad ya que al ser compacta permite trefilar en lugares muy reducidos, en la Figura 1.5 se muestra una fotografía de la máquina trefiladora del Laboratorio de Conformado de la FIM. La trefila con la que cuenta la máquina permite fabricar una gran variedad de diámetros de alambre.



**Figura 1.5** Máquina trefiladora del Laboratorio de Conformado de la FIM

Al ser una máquina manual, esta no permite trefilar materiales demasiado duros como el acero, por esta razón se trefila metales no ferrosos como el aluminio y cobre, también puede ser muy útil para la fabricación de joyería al no usar materiales con dureza muy elevada, ni diámetros mayores a 4.1 mm, en la Figura 1.6 se muestra una fotografía de la trefila de carburo de tungsteno. [7]



**Figura 1.6** Trefila de carburo de tungsteno

## **1.5 Variables del proceso de trefilado**

El proceso de trefilado de alambre cuenta con variables que deben ser controladas para obtener alambre de buena calidad. A continuación, se presentan las principales variables del proceso de trefilado de alambre.

### **1.5.1 Tensión**

Debido al proceso de fabricación de alambre, la zona de deformación está limitada por una tensión de tracción en la dirección del cable y una de cizallamiento causada por la fricción y tensión de compresión que se genera entre el dado de trefilar y el alambre. La tensión media en el eje del alambre es mucho menor que la que se presenta en las paredes del alambre. [9] en el proceso de trefilado es muy importante controlar la tensión con la que es estirado el alambre a través de los dados de trefilar debido a que puede ocasionar roturas o fisuras tanto internas o externas en el material conformado.

### **1.5.2 Temperatura**

Durante el proceso de trefilado la fricción que se produce entre el alambre y el dado de trefilar genera un incremento en la temperatura del alambre. Durante las sucesivas pasadas del alambre por los dados de trefilación la temperatura se incrementa considerablemente. Casi toda la energía suministrada durante el estirado del alambre se transforma en calor, la porción resultante de esta energía es la que produce dislocaciones y vacantes dentro del material. Mediante diferentes experimentaciones se ha demostrado que el flujo de calor desde el cable hacia la matriz es mínimo. A medida que el cable sale del dado se tendrá un gradiente térmico ocasionado por la fricción, es decir que el cable se encontrara con mayor temperatura en su superficie que en su centro, conforme el proceso se desarrolla, la temperatura se reduce hasta equilibrarse en un valor moderado. [9].

### **1.5.3 Velocidad de avance**

La velocidad de deformación aumenta linealmente con el estirado del cable, variaciones grandes en la velocidad pueden causar esfuerzos residuales en el cable conformado. Es conveniente notar que a mayor velocidad de trefilado mayor será el incremento de temperatura que se produce durante el conformado. En los procesos de trefilado que usan máquinas con dados en serie es común que el alambre se caliente de una pasada a otra, esto puede verse agravado con un incremento significativo en la velocidad de avance, por

esta razón el uso de lubricante es indispensable, ya que actúa como lubricante y refrigerante al mismo tiempo. [9]



## **2. METODOLOGÍA**

En el presente capítulo se detalla la metodología desarrollada para el proceso de trefilado de alambre de cobre bajo distintas condiciones de lubricación. Se presenta en una secuencia lógica de acuerdo como se ha llevado tanto el proceso de pruebas como el de investigación y análisis del proceso de trefilado.

Todo esto bajo criterios de sostenibilidad enfocado en la reutilización de materiales como parte de minimizar los desperdicios tirados al medio ambiente, la transmisión de conocimiento, la promoción de condiciones de trabajo favorables y la economización de recursos durante el proceso de fabricación de alambre de cobre.

### **2.1 Caracterización del material base**

Para conocer las características del material base, que en este caso es cable entorchado de cobre usado para conexiones eléctricas, realizamos un ensayo de espectrometría de chispa, con el objetivo de conocer la composición química del material y en concreto determinar el porcentaje de cobre presente en el mismo.

Para la caracterización del material base también se realizan ensayos para determinar su microdureza, con el objetivo de poder realizar una correcta comparación de sus propiedades antes y después del proceso de trefilado bajo condiciones de lubricación. Para contrastar los resultados obtenidos de dureza antes y después del proceso de trefilado se analiza el material sin ser conformado, se realiza tanto el ensayo de microdureza como el metalográfico.

### **2.2 Determinación del lubricante**

Durante el proceso de trefilado, el alambre está en constante contacto con la trefila, esto genera que el alambre eleve su temperatura, necesite mayor fuerza que la requerida para ser deformado y con esto un mayor desgaste de la trefila. Con el objetivo de optimizar el proceso de trefilado y reducir los factores antes mencionados al máximo, la selección adecuada del tipo de lubricante es muy importante. Debido a que el presente trabajo es de tipo experimental y con el objetivo de evaluar el comportamiento del material bajo diferentes condiciones de lubricación se han seleccionado varios lubricantes que buscan optimizar el proceso de trefilado, estos lubricantes son: aceite para motor de auto 20W50 y grasa automotriz grado NLGI 2 LB mostrados en la Figura 2.1.



**Figura 2.1** Lubricante de motor para automóvil y grasa automotriz

### 2.3 Variables del proceso de trefilado

En el proceso de trefilado de alambre a gran escala controlar las variables de trefilado es indispensable para garantizar la calidad del cable y a su vez minimizar al máximo sus costos de producción. Para la obtención de las probetas del presente trabajo, no es posible controlar la velocidad de avance ni la temperatura, esto debido a las limitaciones tecnológicas que presenta la máquina y al origen de la fuerza motriz que acciona la máquina.

La variación del diámetro es una variable que podemos controlar, al realizar pasadas sucesivas con variaciones de 0.2 mm al diámetro. Inicialmente se parte de alambre de cobre de 2.2 mm de diámetro, con sucesivas pasadas a través de la trefila y bajo constante estado de lubricación se llega finalmente a 1.5mm de diámetro, en la Tabla 2.1 se presenta la variación en el diámetro del alambre trefilado.

**Tabla 2.1** Variación en el diámetro del alambre trefilado

Número de pasada	Diámetro de la trefila [mm]
0	2.2
1	2.1
3	1.9
5	1.7
7	1.5

## 2.4 Caracterización del alambre trefilado

En esta sección se muestra el proceso de obtención de las probetas de alambre de cobre trefilado bajo diferentes condiciones de lubricación, además se presentan los métodos utilizados en la obtención de datos experimentales necesarios para su análisis.

### 2.4.1 Ejecución del proceso de trefilado

El proceso de trefilado se llevó a cabo en la máquina de trefilado existente en el Laboratorio de Conformado. Para empezar, se cortó un tramo de 1.5m de alambre de cobre, esto ya que posterior a cada pasada se cortarán tramos de 125mm para la elaboración de las probetas. Para lograr que el alambre de cobre pase por los correspondientes dados de la trefila es necesario ahusar uno de los extremos del alambre de cobre, esto lo logramos con la ayuda de una lima y una mordaza para su sujeción, en la Figura 2.2 se muestra una fotografía del ahusado del alambre de cobre.



**Figura 2.2** Ahusado del alambre de cobre

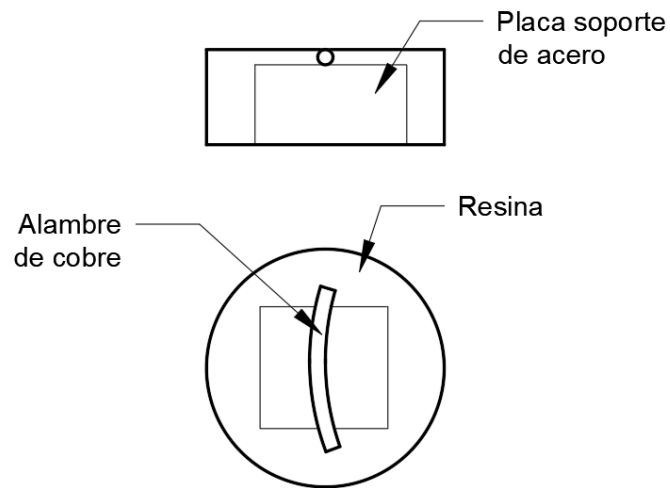
Posterior a esto se coloca lubricante en todo el alambre y con ayuda de unas pinzas se hace pasar el alambre por la trefila, luego empieza el proceso de trefilado con un suave movimiento de la palanca principal, en la Figura 2.3 se muestra una fotografía de la lubricación del alambre de cobre.



**Figura 2.3** Lubricación del alambre de cobre

## 2.4.2 Obtención de probetas

Para la obtención de las probetas, el alambre de cobre trefilado se cortará en tramos de 25mm como se muestra en la Figura 2.4 en la cual se presenta un esquema de la probeta y se los coloca sobre una placa de acero para hacer posible su caracterización, estas probetas de cobre son fijadas con pegamento especial para evitar su movimiento durante el vertido de la resina en el molde y lograr generar una cara homogénea que posibilite su caracterización, en la Figura 2.5 se muestra una fotografía de la elaboración de las probetas.



**Figura 2.4** Esquema de probeta



**Figura 2.5** Elaboración de probetas

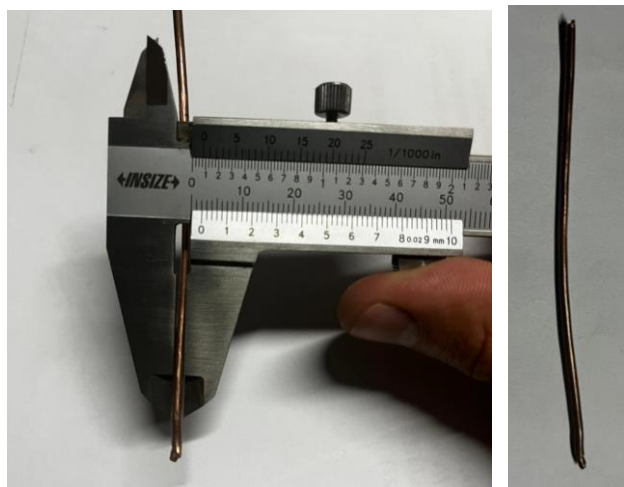
## 2.5 Ensayos

Para el correcto análisis del alambre de cobre trefilado es necesario realizar diferentes tipos de ensayos, entre estos esta la inspección visual, ensayo de espectrometría, microdureza y metalografía, este tipo de ensayos permiten conocer y comparar los cambios generados por la deformación del alambre de cobre existente durante el proceso de trefilado.

### 2.5.1 Inspección visual

Este ensayo tiene como objetivo identificar fallas y defectos en el material producidos por el proceso de trefilado. Se lo realiza previo a cualquier otro ensayo y es pertinente realizar este ensayo tanto en el material base como en el conformado. El ensayo consta de dos partes muy importantes, visualizar e identificar posibles defectos superficiales, esto acompañado con la experiencia permite interpretar los resultados observados. Durante el ensayo es conveniente ayudarse de accesorios e instrumentos de apoyo, como fotografías, en el caso de visualización directa e instrumentos para determinar las características dimensionales del elemento.

Para la medición del alambre trefilado usamos un calibrador pie de rey, para lo cual se toman tres medidas y las promediamos. Para identificar la calidad superficial del alambre trefilado usamos fotografías de alta calidad que permitan identificar posibles defectos superficiales, esto se muestra en la Figura 2.6 donde se muestran dos fotografías, la medición del alambre trefilado y el alambre trefilado de la cual nos servimos para estimar la calidad superficial.



**Figura 2.6** Medición del alambre trefilado y fotografía del alambre trefilado

## 2.5.2 Ensayo de espectrometría de chispa

Este ensayo es usado para determinar el espectro de composición de un material en específico, en otras palabras, con este ensayo conoceremos los componentes reales presente en el alambre de cobre de conexiones eléctricas a usarse en el presente trabajo.

Para el ensayo se usará el espectrómetro de emisión óptica de chispa del Departamento de Metalurgia Extractiva (Demex), este tipo de espectrómetro usa una chispa o arco eléctrico con el que logra excitar los átomos contenidos en la pieza metálica, ya que los metales son buenos conductores eléctricos este ensayo es el más adecuado. Luego de que se haya aplicado el haz eléctrico a la probeta de cobre, los átomos de esta se excitarán y des excitarán, en este proceso se emiten fotones de longitud definida, los cuales mediante un análisis óptico a través de una rejilla de difracción permite conocer los elementos específicos que la probeta contenga. Para este ensayo se usó la norma ASTM E415-17 y el equipo utilizado fue el espectrómetro BRUKER Q4TASMAN cuyas especificaciones técnicas del equipo de espectrometría se indican en la Tabla 2.2.

**Tabla 2.2** Especificaciones técnicas del equipo de espectrometría.

<b>Alimentación</b>	100 V – 240V
<b>Frecuencia</b>	50/60 Hz
<b>Fuente generadora de la chispa</b>	Arco de 0.01 ms a 2 ms por chispa
	Frecuencia de 50 a 100 Hz
<b>Sistema óptico</b>	Mejora de proyección con purga de argón
	Tecnología de espectro claro
<b>Software</b>	Paquete de solución analítica (PSA) y calibración de matrices personalizadas.
<b>Equipo</b>	

Con el ensayo de espectrometría se busca analizar la composición del alambre de cobre usado para conductores eléctricos, este alambre debe tener una pureza del 99.8 % [10], con este antecedente se realiza el ensayo de espectrometría con la finalidad de conocer el contenido de cobre y que impurezas presenta. Para obtener la probeta a ser ensayada se parte del cable de cobre que existe en el laboratorio de conformado, de donde se extrae una muestra de cable multifilar entorchado de 19 alambres de 2.2mm de diámetro cada uno formando un cable conductor de 12 mm de diámetro, para obtener una superficie plana y regular se laminó uno de estos cables hasta dejarlo con un espesor de 0.4 mm, en la Figura 2.7 se muestra una fotografía de la probeta.



**Figura 2.7** Probeta para ensayo de espectrometría

### **2.5.3 Ensayo Metalográfico – Microscopia Óptica**

Según con la ASM International, la metalografía se define como la disciplina científica encargada en analizar la estructura subyacente de los diferentes tipos de metales y sus aleaciones, así como de materiales no metálicos. En la microscopia óptica la reflectividad de las diferentes regiones existentes de la microestructura permite observar una imagen clara, esto con ayuda de un reactivo químico apropiado para cada tipo de material y una superficie preparada previamente a través del desbaste y pulido, esto nos permite identificar las diferentes zonas y características que presenta la microestructura del material analizado. En la ASM se especifica que antes de realizar el análisis metalográfico es conveniente realizar una inspección macroscópica de la muestra, esto con el fin de revelar información importante como discontinuidades causadas durante el proceso de fabricación o algún tipo de recubrimiento que impida su análisis posterior. [4]

Para que la muestra pueda ser analizada se debe seguir un proceso que consta de varios pasos muy importantes que se deben realizar progresivamente para garantizar que la



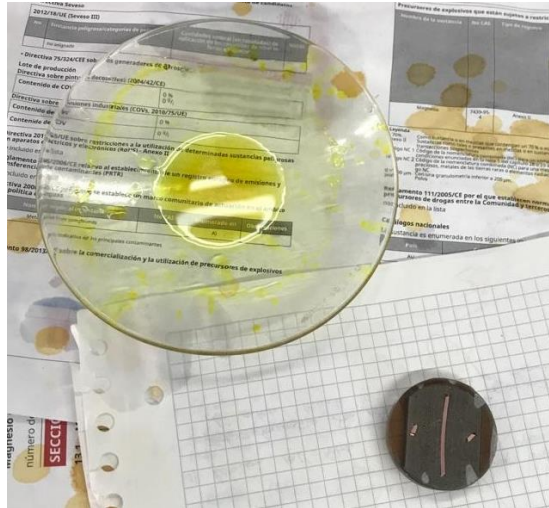
superficie sea totalmente visible en la microscopia óptica. Una vez obtenida la probeta esta debe ser desbastada en abrasivo de 80 a 100 granos/in<sup>2</sup> aquí se busca planear la muestra y dejar las dos caras lo más paralelas posible. Luego se realiza el desbaste fino, donde logramos remover las deformaciones generadas en el desbaste grueso, aquí se usa lijas que van desde la 120 a los 600 granos/in<sup>2</sup>, aquí como en el paso anterior es importante refrigerar la muestra para si evitar cambios en su estructura. Para eliminar las pequeñas imperfecciones aun existentes se debe realizar un pulido grueso y uno sube donde se usa abrasivo de alúmina de 1 micrón y 3 micrones respectivamente, ambos en suspensión de agua, en la Figura 2.8 se muestra el desbaste y pulido de las probetas.



**Figura 2.8** Desbaste y pulido de probetas

Lo que buscamos con el ensayo metalografico es poder observar una imagen precisa de la estructura del material esto se logra eliminando la zona de deformacion en la superficie, al inspeccionar esta zona, se revela la superficie nominal, que teóricamente es una superficie sin alteraciones. El proceso anterior de desbaste y pulido deja una superficie similar a de un espejo, esta es altamente reflectante y sumamente lisa, pero con una delgada capa de metal deformado plásticamente a causa del pulido del último abrasivo, esta delgada capa se logra eliminar tras el ataque químico. Para las muestras ensayadas se usó cloruro ferrico, alcohol y ácido clorídrico. El tiempo del ataque químico es un parametro muy importante, ya que de esto dependerá la calidad de imagen que se podrá obtener de la microestructura del material. Para el presente ensayo se usó un tiempo de ataque de 7 segundos. La Figura 2.9. muestra, una fotografía del ácido y la probeta atacada.





**Figura 2.9** Ácido y probeta atacada químicamente

Con el objetivo de revelar con precisión la microestructura del material, posterior al pulido fino se realiza una visualización de la microestructura bajo el microscopio metalográfico Olympus el cual se muestra en la fotografía de la Figura 2.10 del laboratorio de metalografía desgaste y falla de la FIM. La preparación de las probetas se realiza en base a la norma ASTM E3-11, revisar Anexo I.



**Figura 2.10** Microscopio metalográfico Olympus

Esta previsualización permite detectar elementos desde 1mm hasta las 100 micras, con este estudio se busca revelar varias características meso estructurales más importantes como líneas de flujo generadas en el proceso de conformado, tamaño y distribución de incrustaciones, imperfecciones de fabricación, profundidad y uniformidad de la capa endurecida de un elemento conformado en frío, en la Figura 2.11 se muestran dos

micrografías de alambre de 1.5 y 2.1 en diámetro trefilados con grasa, todas las micrografías sin ataque químico se muestran en el Anexo II.



**Figura 2.11** Micrografías de alambre de 1.5 y 2.1 en diámetro trefilados con grasa.

El ataque químico tiene como objetivo el hacer visible al microscopio metalográfico las características microestructurales del material ensayado, esto es posible gracias al uso de un reactivo adecuado para cada material, el cual reacciona exclusivamente con uno de los elementos presentes en el material. De esta forma en materiales de una sola fase como es en nuestro caso, los granos reaccionan químicamente en función a su orientación cristalográfica. De igual manera sucede con los bordes de grano esto debido a que son químicamente más reactivos y se disuelven con mayor rapidez dejando como resultado ranuras en la superficie que reflejan la luz. En la Figura 2.12 se muestra una micrografía de alambre de 1.5 en diámetro lubricado con aceite luego del ataque químico, todas las micrografías se presentan en el Anexo III.



**Figura 2.12** Micrografía de alambre de 1.5 en diámetro lubricado con aceite luego del ataque químico

## 2.5.4 Ensayo de Microdureza

Con la finalidad de caracterizar la microestructura del alambre trefilado, es necesario el ensayo de microdureza. La particularidad de este ensayo es que podemos obtener la dureza de un determinado grado del metal, esto permite conocer la dureza en diferentes zonas del alambre trefilado. El ensayo se realizó en el equipo DUROLINE-M, marca METKON con base en la norma ASTM E384-17 en la Figura 2.13 se muestra una fotografía del micro durómetro DUROLINE-M, en el Anexo IV se presenta todas las micrográficas tomadas. [11]

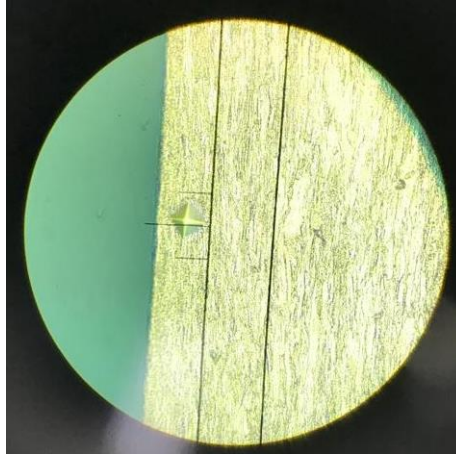


**Figura 2.13** Micro durómetro DUROLINE-M

Primero se inicia localizando con el microscopio presente en el durómetro una zona donde posteriormente se aplicará la carga y se medirá la microdureza, en la Figura 2.14 se muestra una fotografía de la micro Indentación realizada para la obtención de la microdureza. La carga aplicada para este tipo de material corresponde a 50 grf, durante 15 segundos a temperatura ambiente. El cálculo de la microdureza se realiza mediante la Ecuación 1. Donde P corresponde a la carga en gramos y d a las diagonales expresadas en micras.

$$HV = 1854.4 P/d^2$$

**Ecuación 1.1** Cálculo de microdureza, método de las diagonales



**Figura 2.14** Micro Indentación

### **2.5.5 Criterios de sostenibilidad**

Este trabajo de integración curricular se ha desarrollado bajo criterios de sostenibilidad como, la responsabilidad ambiental y la promoción de condiciones de trabajo favorables.

La responsabilidad ambiental es un desafío que hoy en día es uno de los principales factores por considerar al momento de realizar un determinado proceso de fabricación, el usar métodos de fabricación que sean amigables con el ambiente genera un reto muy importante por superar, en el presente trabajo de integración curricular se promueve el uso de aceite automotriz quemado de motor, esto es posible debido a que un aceite no pierde por completo todas sus propiedades de lubricación y refrigeración luego de haber cumplido su vida útil dentro del motor de auto, es así que este puede ser reutilizado en otros procesos donde la calidad y pureza del aceite no juegue un papel principal, en el proceso de trefilado el uso de aceite representa un aumento en la producción esto debido a que el aceite al actuar como refrigerante permite incrementar la velocidad de avance del alambre a través de los dados de trafilación y a su vez alargar la vida útil de las trefilas al no estar en contacto directo con el alambre de cobre a trefilar.

Las condiciones de trabajo para el proceso de trefilado deben ser las más favorable que precautelen la seguridad e integridad de los operadores, el proceso de trefilado realizado en el laboratorio de conformado no presenta mayor riesgo que el de ahusar cuidadosamente uno de los extremos con una lima, sujetando correctamente el cable en la mordaza, cave recalcar que el proceso de trefilado a gran escala no presenta los mismo riesgos que el realizado en el laboratorio, la producción a gran escala presenta retos mayores y un control más exhaustivo.

### 3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 3.1 Resultados

En este apartado se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de inspección visual, microscopía óptica, metalografía y espectrometría de chispa realizados al alambre de cobre antes y después del proceso de trefilado.

##### 3.1.1 Inspección visual

En concordancia con la metodología del punto 2.5.1 para cada alambre trefilado se tomó 3 mediciones del diámetro y se las promediaron, en la Tabla 3.1 se enlistan los diámetros de la trefila y del alambre trefilado.

**Tabla 3.1** Diámetros del alambre trefilado

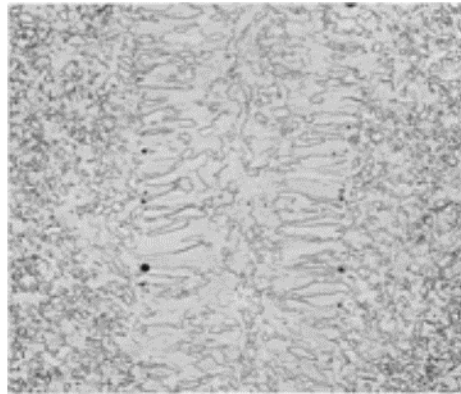
<b>Número de pasada</b>	<b>Diámetro trefila [mm]</b>	<b>Diámetro del alambre [mm]</b>
0	2.2	2.22
1	2.1	2.14
3	1.9	1.92
5	1.7	1.68
7	1.5	1.5

Para la inspección visual se utilizó luz natural y el tacto, esto permitió determinar que la calidad superficial del alambre de cobre trefilado es buena al no presentar desgarres de material ni fisuras visibles y una superficie uniforme sin rebabas.



### 3.1.2 Ensayo de Microscopia Óptica

De acuerdo con la metodología del punto 2.5.3 los alambres trefilados fueron sometidos al ensayo de microscopia óptica, en la Tabla 3.2 se muestran dos micrografías del alambre sin trefilar, la de la izquierda está tomada en el centro y la de la derecha en el borde del alambre de cobre sin trefilar. Como referencia se tomó una micrografía de la ASM de cobre electrolítico C10100 mostrada en la Figura 3.1. En esta micrografía es posible apreciar la estructura dendrítica presente en el cobre electrolítico.



**Figura 3.1** Micrografía de cobre electrolítico 10100 [3]

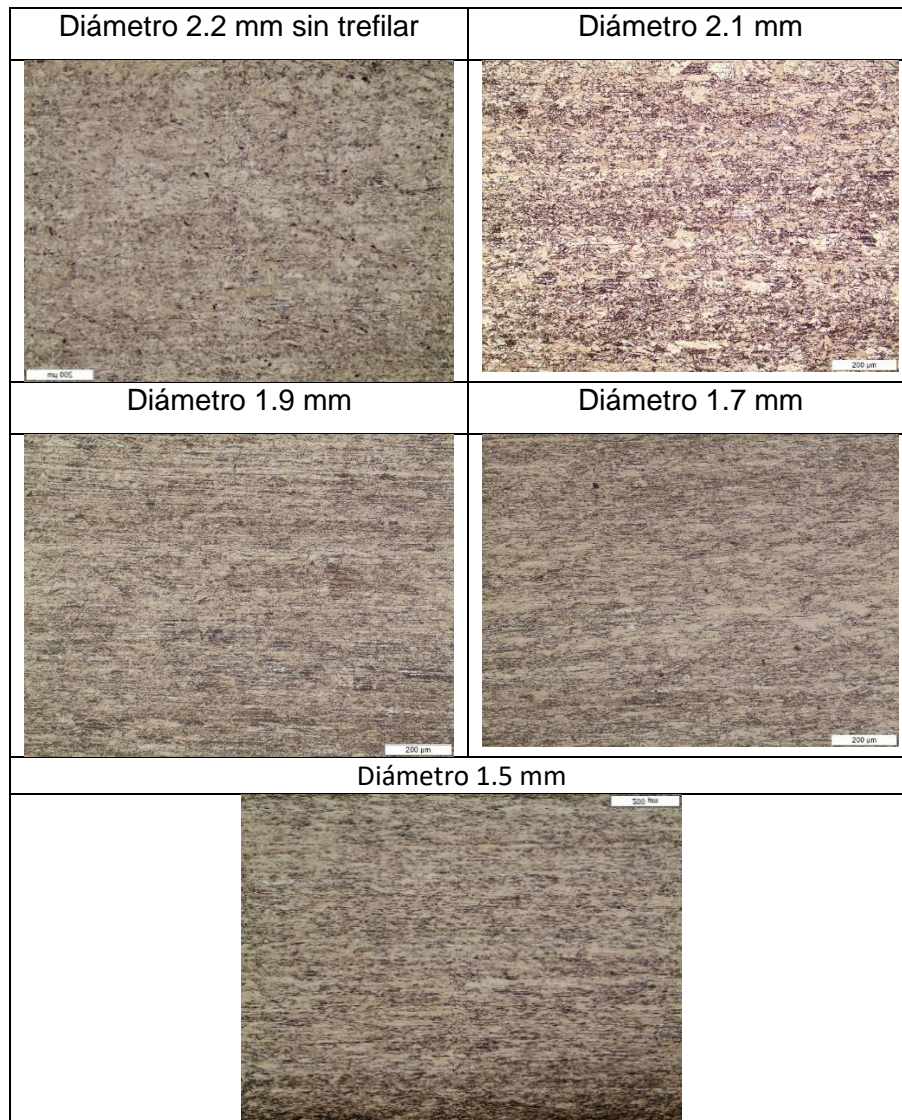
Con lo anteriormente expuesto usamos la micrografía de la Figura 3.1 como referencia para identificar que el alambre de cobre que se ensayó presenta la misma microestructura, donde los granos de mayor tamaño están ubicados en el centro y los más pequeños y alargados en borde, esto debido al proceso de fabricación del alambre de cobre.

**Tabla 3.2** Micrografías del alambre sin trefilar

Alambre sin trefilar micrografía del centro	Alambre sin trefilar micrografía del borde
Micrografía que muestra la estructura del alambre de cobre sin trefilar tomada en el centro. Se observan granos de mayor tamaño y una estructura dendrítica similar a la de la Figura 3.1. Incluye una escala de 50 µm.	Micrografía que muestra la estructura del alambre de cobre sin trefilar tomada en el borde. Se observan granos más pequeños y alargados. Incluye una escala de 50 µm.

En la Tabla 3.3 se muestran las micrografías de los alambres trefilados lubricados con grasa, aquí se muestra, como conforme el diámetro del alambre es reducido los granos forman líneas de flujo en la dirección del trefilado, en la micrografía del alambre de  $\varnothing$  1.9, se aprecia como los granos se alargan y se ordenan formando caminos cuasi horizontales.

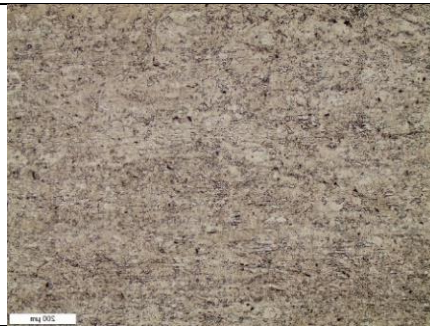


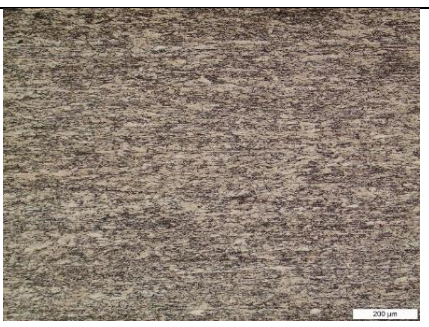

**Tabla 3.3** Micrografías de alambre trefilado lubricado con grasa con aumento de 100x



De manera similar ocurre con los alambres trefilados con aceite, en la Tabla 3.4 se presentan las micrografías del alambre trefilado lubricado con aceite, en la de alambre con  $\varnothing$  2.1 es más notorio el fenómeno antes descrito, las vetas formadas por el trefilado son mucho más claras y los granos más ordenados en sentido del flujo del material.

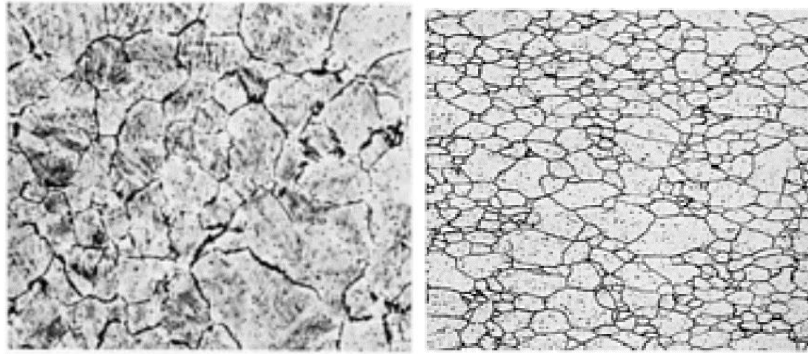


**Tabla 3.4** Micrografías de alambre trefilado lubricado con grasa con aumento de 100x

Diámetro 2.2 mm sin trefilar	Diámetro 2.1 mm
	
Diámetro 1.9 mm	Diámetro 1.7 mm
	
Diámetro 1.5 mm	
	

En la Figura 3.2 extraída de la ASM se presentan dos micrografías de aleación C17200 que ha sido trabajada en frío, la micrografía de la izquierda es del material base sin ningún tipo de conformado, aquí los granos son de gran tamaño y no tienen una dirección ni forma específica, por otro lado, la micrografía de la derecha es del material luego de ser laminado en frío, esta muestra granos reducidos y un poco alargados con geometría mucho más uniforme.

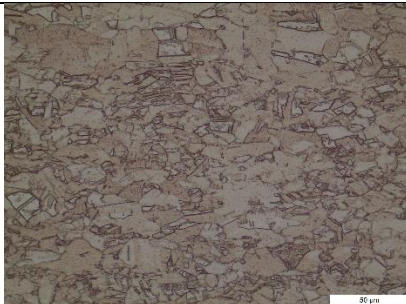
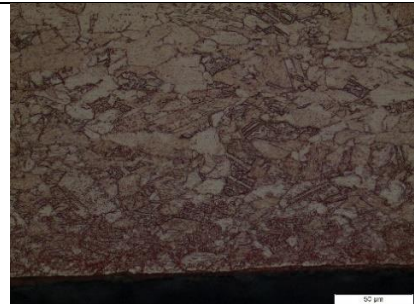




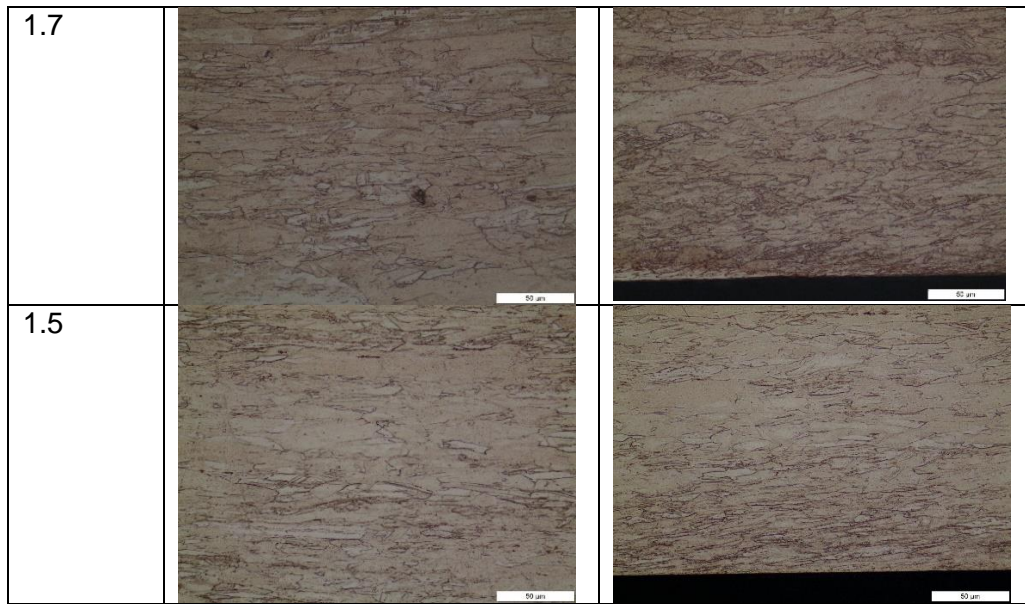


**Figura 3.2** Aleación C17200 antes y después de ser laminada en frío [3]







En las micrográficas de alambre de cobre trefilado lubricado con grasa mostradas en la Tabla 3.5, se aprecia que conforme se reduce el diámetro del alambre, el tamaño de grano se ve reducido, esto corrobora lo mostrado en la Figura 3.2 donde el tamaño de grano se reduce debido al conformado mecánico. En la Tabla 3.6 se presentan las micrográficas del trefilado de alambre lubricado con aceite, estas probetas también presentan una reducción en el tamaño de grano conforme nos acercamos hacia el borde, esto a causa del flujo de material a través del dado de trefilado. Es notable la estructura dendrítica del cobre tanto cuando usamos aceite o grasa como lubricante durante el trefilado.

**Tabla 3.5** Micrográficas de alambre trefilado lubricado con grasa

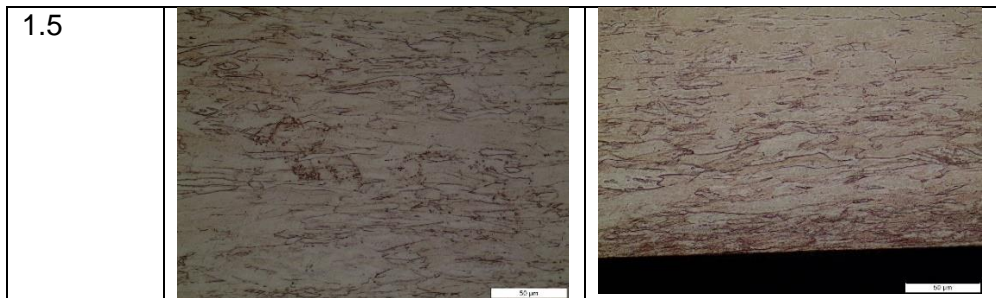
Diámetro del alambre	Micrografía del centro	Micrografía del borde
2.1		
1.9		



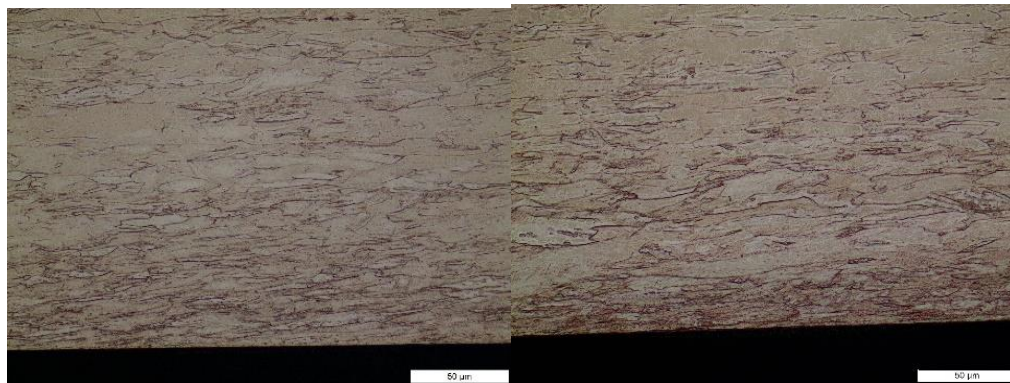
**Tabla 3.6** Micrografías de alambre trefilado lubricado con aceite

Diámetro del alambre	Micrografía del centro	Micrografía del borde
2.1		
1.9		
1.7		





A continuación, se analiza el alambre con mayor deformación plástica, esto debido a que en este serán más evidentes los cambios en su microestructura, causados durante el trefilado. En ambos casos de lubricación las micrografías de borde del alambre de  $\varnothing$  1.5 mm de la Figura 3.3 presentan granos alargados en el borde, al comparar el tamaño de grano en el borde, el alambre de cobre lubricado con grasa presenta granos más reducidos y alargados. Con lo que podemos deducir que mediante el uso de grasa durante el proceso de trefilado la superficie del alambre se endurece más que al usar aceite.



**Figura 3.3** Micrografías en el borde del alambre de  $\varnothing$  1.5 lubricado con grasa y aceite respectivamente

### 3.1.3 Ensayo de Microdureza

Como se explicó en la metodología del apartado 2.5.4, a cada alambre ensayado se realizaron dos mediciones de dureza, una en el centro y otra en el borde, en la Tabla 3.7 se muestran las micro durezas del alambre trefilado lubricado con grasa y aceite respectivamente, al comparar la microdureza del centro y del borde, se nota que el proceso de trefilado incrementa la dureza del alambre de cobre, esto debido a la deformación plástica existente durante el trefilado lo que genera un incremento en la densidad de dislocaciones en el material. En la Tabla 3.7 también se presenta la dureza del material sin proceso de trefilado, esta es igual tanto en el centro como en el borde, conforme se

deforma el material plásticamente la dureza del centro y del borde se ven incrementadas, en ambos casos la dureza del borde es mayor a la del centro, esto debido a que el flujo de material en el centro es mucho mayor que en los bordes generando que en este punto el grano sea más pequeño y alargado.

**Tabla 3.7** Microdureza del alambre lubricado con grasa y aceite respectivamente

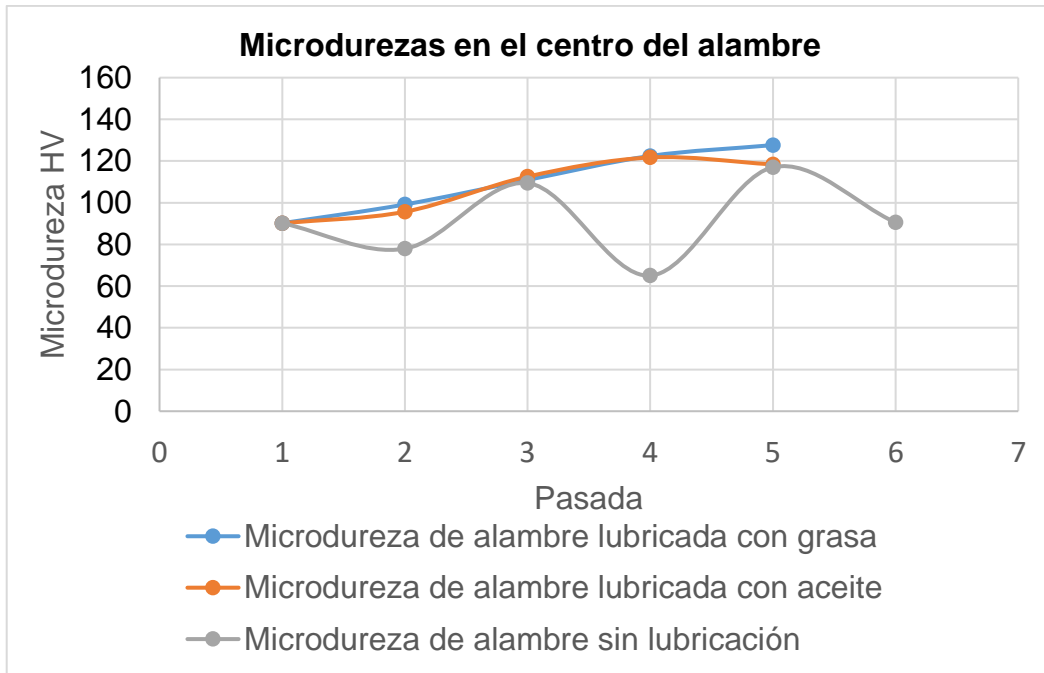
Diámetro de alambre	Lubricado con grasa		Lubricado con aceite	
	Microdureza del centro	Microdureza del borde	Microdureza del centro	Microdureza del borde
	HV	HV	HV	HV
2.2	90,18	90,88	90,18	90,88
2.1	99,16	123,95	95,67	107,79
1.9	110,93	123,86	112,53	131,64
1.7	122,43	127,8	121,71	125,85
1.5	127,63	128,79	118,37	124,37

A continuación, en la Tabla 3.8 se presentan las micro durezas obtenidas en el trefilado de alambre sin lubricación obtenidas en el otro componente del presente trabajo de integración curricular. Se incluyen estos datos para realizar una comparación con los valores obtenidos al usar lubricante en el proceso de trefilado.

**Tabla 3.8** Microdureza del alambre sin lubricación

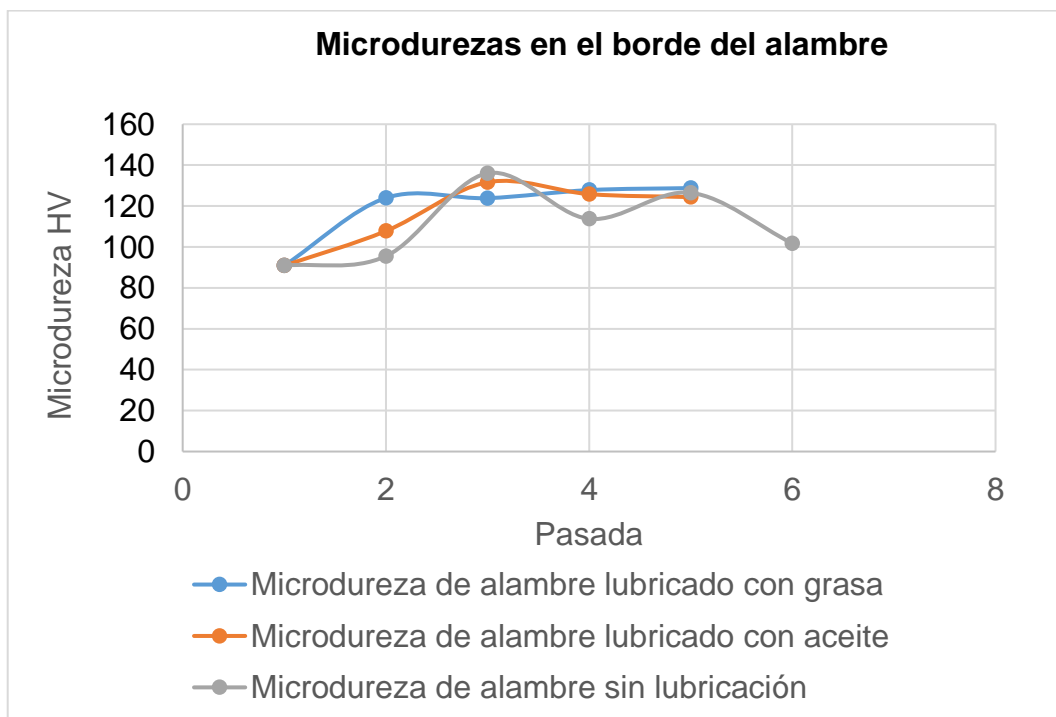
Diámetro de alambre	Lubricado con grasa	
	Microdureza del centro	Microdureza del borde
	HV	HV
2.2	90,18	90,88
2	77,94	95,52
1,8	109,42	136,03
1,6	65,04	113,73
1,4	117,03	126,48
1,2	90,52	101,75

Para analizar el incremento de la dureza durante el proceso de trefilado en la Figura 3.4 y Figura 3.5 se muestran los resultados de microdureza del alambre trefilado medidos en el centro y en el borde respectivamente. En ambas gráficas se nota un incremento significativo en la dureza, donde el uso de grasa presenta mayor endurecimiento del alambre.



**Figura 3.4** Resultados de microdureza medidos en el centro del alambre trefilado

por otro lado, el trefilado sin el uso de ningún lubricante da como resultado menor dureza superficial, esto es apreciable en la Figura 3.5. en la pasada 2 y 4, aquí cave recalcar que la primera pasada hace referencia al alambre sin trefilar. En el Anexo IV se incluyen las fotografías de cada microdureza tomada con fines pedagógicos.



**Figura 3.5** Resultados de microdureza medidos en el borde del alambre trefilado

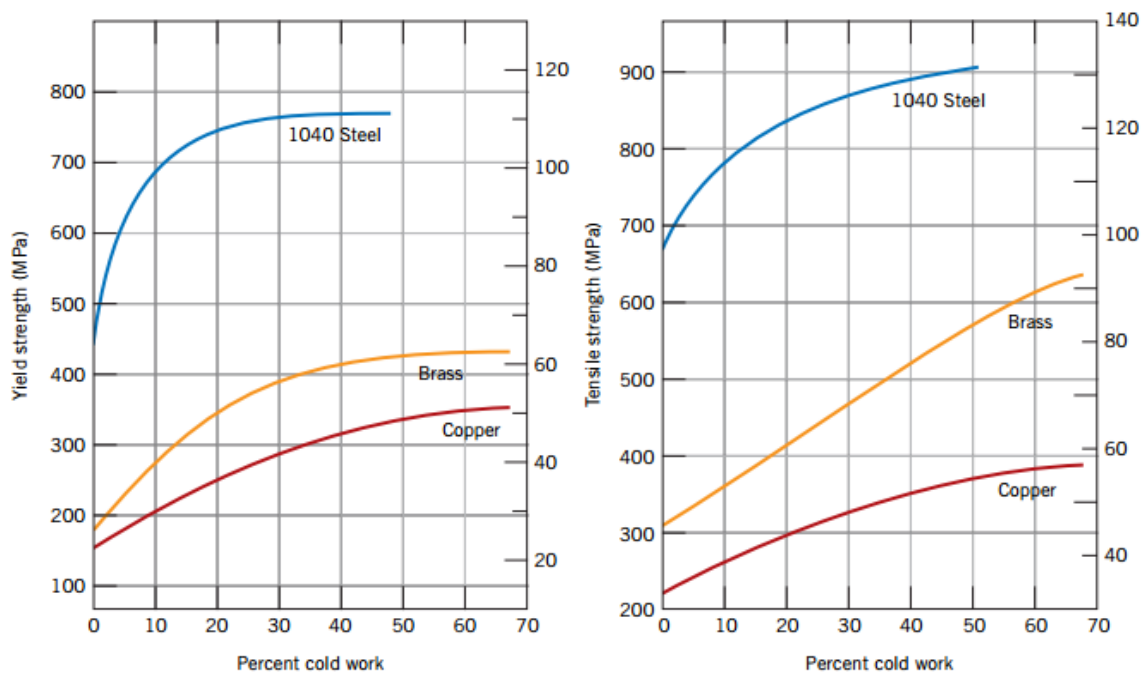
A continuación, se determina el porcentaje de trabajo en frío con la Ecuación 3.1:

$$\%CW = 100 \left( \frac{A_0 - A_d}{A_0} \right)$$

**Ecuación 3.1** Porcentaje de trabajo en frío [2]

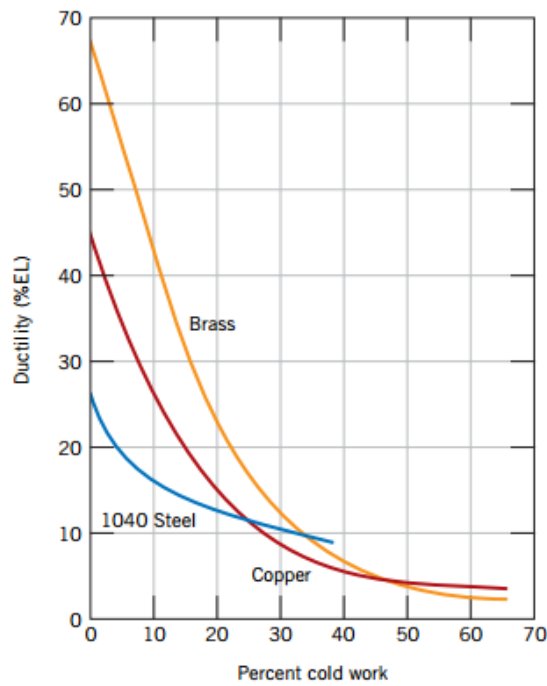
$$\%CW = 53.51\%$$

Con cálculo del porcentaje de trabajo en frío se conocen el aumento del límite elástico y la resistencia a la tracción a causa del trefilado del alambre de cobre. En la Figura 3.6 se muestra la influencia que tiene el trabajo en frío del cobre sobre el límite elástico y la resistencia a la tracción, el alambre de cobre se sometió a un 53.51% de trabajo en frío lo que nos da un límite elástico aproximado a 340 MPa y una resistencia a la tracción de casi 370 MPa, con estos valores se confirma el incremento en las propiedades mecánicas por efecto del trefilado en frío.



**Figura 3.6** Influencia del trabajo en frío del cobre sobre el límite elástico y la resistencia a la tracción [2]

Con el porcentaje de trabajo en frío antes calculado también se obtiene la ductilidad del alambre luego de ser trefilado, en la Figura 3.7 se muestra la influencia del trabajo en frío del cobre sobre la ductilidad, aquí se aprecia que el porcentaje de elongación presenta una reducción a medida que el porcentaje de trabajo en frío se incrementa, en el caso de estudio el alambre luego de ser trefilado presenta alrededor de 4% de elongación, esto indica que de querer seguir conformando el alambre de cobre es necesario realizar un recocido para eliminar las tensiones internas causadas por el proceso de trefilado.



**Figura 3.7** Influencia del trabajo en frío del cobre sobre la ductilidad [2]

### 3.1.4 Ensayo de espectrometría de chispa

Siguiendo la metodología del apartado 2.5.2 en Tabla 3.9 se muestran los resultados del ensayo de espectrometría de chispa, como resultado se tiene que el alambre de cobre presenta una pureza de 99.81 % en Cu, esto corrobora el uso de cobre electrolítico usado para conducción eléctrica.

**Tabla 3.9** Resultados del ensayo de espectrometría de chispa

<b>Material</b>	<b>Trefilado de alambre de Cobre [%]</b>
Zinc [Zn]	0.032
Plomo [Pb]	0.015
Niobio [Nb]	0.010
Bismuto [Bi]	0.010
Cobalto [Co]	0.008
Níquel [Ni]	0.012
Aluminio [Al]	0.031
Selenio [Se]	0.002
Cobre [Cu]	99.81
<b>Total</b>	100



## 3.2 Conclusiones

Se cumplió el objetivo general de este trabajo de integración curricular de analizar los parámetros de trefilado de alambre de cobre en diferentes condiciones de lubricación, se concluyó que el uso de aceite automotriz como lubricante y refrigerante favorece el proceso de trefilado.

Se cumplió el objetivo de recopilar bibliografía del proceso de trefilado bajo condiciones de lubricación, para lo que se revisaron los tipos de máquinas de trefilar y los tipos de lubricantes usados en este proceso, llegando a la conclusión de que los lubricantes más usados en el proceso de trefilado son los sintéticos y los aceites minerales.

Se cumplió el objetivo de determinar la composición química y microestructura del alambre de cobre usado en el presente estudio, concluyendo que es cobre electrolítico con un 99.81% de Cu el cual de acuerdo con la bibliografía consultada este es usado para conducción eléctrica.

Se cumplió el objetivo de llevar a cabo el proceso de trefilado de cobre bajo distintos tipos de lubricantes donde el lubricante que presentó tener mejores resultados para el proceso de trefilado es el aceite automotriz al presentar menor endurecimiento de la superficie del alambre, si bien la diferencia en la dureza obtenida de la aplicación de un lubricante y otro es mínima, el uso de aceite como lubricante representa una ventaja al momento de refrigerar el alambre durante el proceso del trefilado, la forma en la que se aplica el lubricante influye en su elección, esto considerando que para el uso de aceite se instalen reservorios antes de cada dado de trefilado, logrando una lubricación constante y automática durante todo el proceso.

Se cumplió el objetivo de determinar la dureza del alambre trefilado, llegando a la conclusión de que la dureza se incrementa conforme el diámetro disminuye, esto debido al proceso de conformado en frío al cual fue sometido, mediante el cálculo del porcentaje de deformación se concluyó que para seguir disminuyendo el diámetro del alambre se requiere de un tratamiento térmico de recocido, para eliminar las tensiones internas generadas durante el trefilado.

Se cumplió el objetivo de medir el diámetro del alambre trefilado el cual se lo realizó por medio de la inspección visual con ayuda del calibrador presente en el Laboratorio de Conformado, mediante la misma inspección se concluyó que la calidad superficial del alambre trefilado es buena al presentar una superficie lisa y brillante y al no contar con rajaduras ni rebabas, pero, el objetivo más bien fue el de comparar el diámetro del alambre

trefilado con el de la trefila para determinar la recuperación elástica del alambre de cobre, esto no fue posible determinar, debido a las limitaciones tecnológicas presentes en el laboratorio y al no contar con la tolerancia proporcionada por el fabricante de la trefila.

### **3.3 Recomendaciones**

Se recomienda estudiar las condiciones reales de velocidad a la que está sometido el alambre durante su trefilado en la máquina manual del Laboratorio de Conformado con la implementación de un sensor electrónico, al igual que el estudio de la influencia que tiene la velocidad de avance en las propiedades mecánicas y eléctricas del alambre de cobre trefilado.

Se recomienda implementar un sistema electrónico que permita medir y almacenar los valores de torque y temperatura a la que está sometido el alambre durante el proceso de trefilado, con la finalidad de determinar los valores de torque y temperatura óptimos que garanticen una excelente calidad,

Realizar un estudio sobre el desgaste al que es sometido la trefila cuando se fabrica alambre de cobre bajo condiciones de lubricación y no lubricación, y como este desgaste afecta en la calidad superficial del alambre conformado y en su calibre final.

## 4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. Askeland, Ciencia e ingeniería de materiales, México: CENGAGE Learning , 2012.
- [2] W. D. Callister, Materials Science and Engineering, United States of America: Wiley, 2014.
- [3] A. I. M. Handbook, Metallography & Microstructures, EEUU: ASM International, 2004.
- [4] G. Mikell, Fundamentos de manufactura moderna, México: Mc Graw Hill, 2007.
- [5] EQUIMSA, «EQUIMSA,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.equimsa.com/lubricantesparatrefilado#:~:text=La%20lubricaci%C3%B3n%20en%20el%20trefilado,gran%20fricci%C3%B3n%20entre%20las%20superficies..> [Último acceso: enero 2023].
- [6] B. Paul, La Trefilación, Bélgica: BEKAERT, 1993.
- [7] T. J. Cuascota José, «DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA TREFILADORA MANUAL PARA EL LABORATORIO DE CONFORMADO MECÁNICO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA (EPN),» EPN, Quito, 2021.
- [8] R. N. Wright, Wire Technology Process Engineering and Metallurgy, New York: Butterworth-Heinemann, 2011.
- [9] UPV, «Materiales,» 2017. [En línea]. Available: [http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm03/ptrb3\\_4.html#:~:text=El%20ensayo%20de%20microdureza%20es,materiales%20met%C3%A1licos%20de%20durezas%20diversas..](http://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm03/ptrb3_4.html#:~:text=El%20ensayo%20de%20microdureza%20es,materiales%20met%C3%A1licos%20de%20durezas%20diversas..) [Último acceso: febrero 2023].
- [10] L. Carvajal, Metodología de la Investigación Científica. Curso general y aplicado, 28 ed., Santiago de Cali: U.S.C., 2006, p. 139.
- [11] Castrol, «FLUIDO PARA MOTOR CONVENCIONAL CASTROL GTX- PREMIUM,» 2020. [En línea]. Available: [https://www.castrol.com/es\\_us/united-states/home/motor-oil-and-fluids/engine-oils/motor-engine-oil-brands/castrol-gtx-brand/castrol-gtx.html#tab\\_20w-50](https://www.castrol.com/es_us/united-states/home/motor-oil-and-fluids/engine-oils/motor-engine-oil-brands/castrol-gtx-brand/castrol-gtx.html#tab_20w-50). [Último acceso: febrero 2023].
- [12] D. S.A.S, «Dismacor S.A.S,» 2021. [En línea]. Available: <https://dismacor.com/grasas-chevron/#.Y-qvf3bMJD8>. [Último acceso: febrero 2023].

## 5. ANEXOS

### ANEXO I. Informe de resultado: Microdureza y Metalográficos

	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL	Revisión:	000	
	Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF)	Fecha:	22/09/2019	
	INFORME DE RESULTADOS	Página:	Pág. 1 de 3	
	Nº 0TI0019-23	RT-LMDF-0701		

#### INFORME DE RESULTADOS Nº 0TI0019-23

##### Información General

<b>Cliente / Empresa/ Entidad:</b>	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL		
<b>Persona de contacto:</b>	Martin Tadeo Monar Torres / Victor Hugo Tacan Tulmo		
<b>Teléfono:</b>	0983216052	<b>E-mail:</b>	martin.monar@epn.edu.ec
<b>Muestras suministradas por:</b>	Martin Monar, Victor Tacan	<b>Fecha de recepción de muestra:</b>	03-01-23
<b>Fecha de emisión de Informe:</b>	27-01-2023	<b>Fecha/ plan y método de muestreo:</b>	N/A
<b>Fecha de inicio de ensayo:</b>	03-01-23	<b>Fecha de fin de ensayo:</b>	25-01-2023

#### 1. ANTECEDENTES.

Se recibe en el Laboratorio de Metalografía, Desgaste y Falla de la Escuela Politécnica Nacional, unas probetas de alambre de cobre, a someterse a ensayos complementarios para el desarrollo del proyecto de integración curricular TIC: "ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DE TREFILADO DE ALAMBRE DE COBRE, PARA CONDUCTORES ELECTRICOS, EN DIFERENTES CONDICIONES DE LUBRICACIÓN, BAJO CRITERIOS DE SOSTENIBILIDAD. Memorando Nro. EPN-DMT-2022-1651-M.

#### 2. DESCRIPCIÓN DE MUESTRA

Probetas de alambre de cobre con diferentes diámetros trefilados.

#### 3. MAPEO DE DUREZAS

El ensayo se realizó en el equipo DUROLINE-M, marca METKON, y se basa en la especificación de la norma ASTM E384 – 17. En donde:

- La superficie de las muestras son responsabilidad del cliente, el cual identifica el área para realizar la micro-indotación.
- La fuerza de ensayo aplicada corresponde a 50 gf, durante 15 s, a temperatura ambiente.

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" -Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño - Edificio N°14 PB RUC: 1760005620001 - Tel. (593 - 2) 2 976 300 Ext. 3010/3011 E-mail: metalografia@epn.edu.ec  
Quito-Ecuador

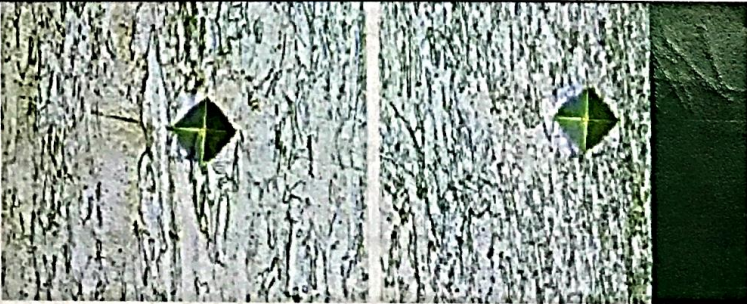




	<b>ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL</b> Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF)	Revisión: 000	
		Fecha: 22/09/2019	
	Página: Pág. 2 de 3		
	<b>INFORME DE RESULTADOS</b> N° 0TI0019-23		

- c. Se utilizó un penetrador Vickers.
- d. Se realizó dos indentaciones en el lado indicado por el cliente.
- e. Los resultados representativos del ensayo se despliegan a continuación y se entrega en CD el respaldo respectivo:

23-001-P1.5

Micro Hardness Analysis Report						
Sample	P1.5		Date	25/01/2023		
Material	OIL		Load	50		
Reported by	ANDRÉS LÓPEZ		Eht	1		
Label	HRC	HV	D1	D2	Mean Diagonal	Depth
O1	-	118,37	27,70	28,27	27,98	
O2	-	124,37	27,89	26,71	27,30	
Mean	0,00	121,37	27,80	27,49	27,64	0,00
Signed by:			Unit	µm		
						

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" -Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño - Edificio N°14 PB RUC: 1760005620001 - Tel. (593 - 2) 2 976 300 Ext. 3010/3011 E-mail: metalografia@epn.edu.ec Quito-Ecuador

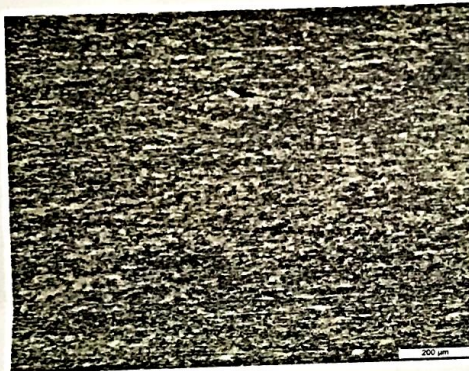


	<b>ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL</b> Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF)	Revisión: 000 Fecha: 22/09/2019 Página: Pág. 3 de 3	
	<b>INFORME DE RESULTADOS</b>	<b>RT-LMDF-0701</b>	
	N° OTI0019-23		

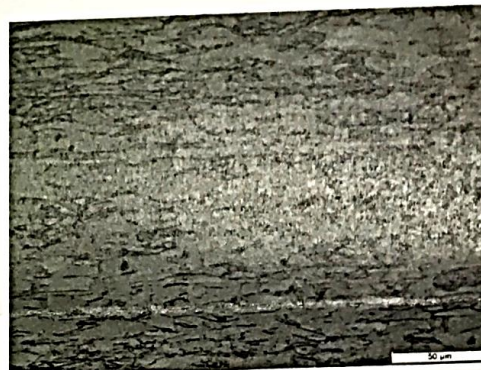
#### 4. RESULTADO METALOGRAFICO

La preparación de las probetas para el ensayo metalográfico se realiza en base a la norma ASTM E3-11, las metalografías realizadas son en el sentido especificado por el cliente, a continuación, se presenta las fotografías más representativas del ensayo:

23-001-P1.7



Aumento 100x



Aumento 500x

#### DECLARATORIA:

- Los resultados de este informe, se aplican al objeto de ensayo como se recibió y son exclusivos del mismo.
- Este informe de resultados no debe ser reproducido parcialmente, excepto cuando se reproduzca en su totalidad y con aprobación escrita del LMDF.
- Los ensayos solicitados se han realizado en las instalaciones del LMDF.

#### Atentamente:

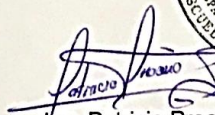
Informe

Elaborado por:



Ing. Andrés López  
Asistente de Laboratorio de  
Ensayos Metalografía,  
Desgaste y Falla.

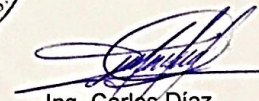
Revisado por:



Ing. Patricia Proaño  
Especialista del Laboratorio de  
Metalografía,  
Desgaste y Falla.



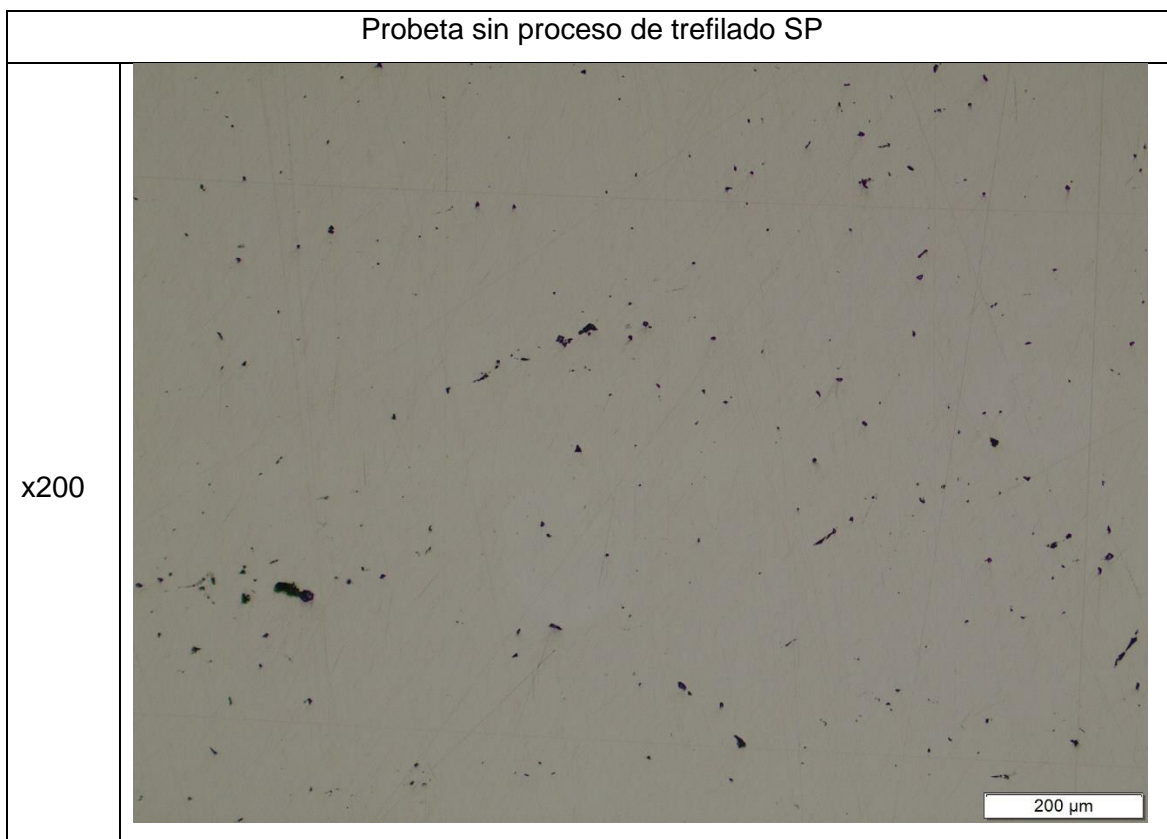
Aprobado por:



Ing. Carlos Díaz  
Jefe del Laboratorio de  
Metalografía,  
Desgaste y Falla.

Campus Politécnico "José Rubén Orellana Ricaurte" -Calle Isabela Católica S/N y Alfredo Mena Caamaño - Edificio N°14 PB RUC: 1760005620001 - Tel. (593 - 2) 2 976 300 Ext. 3010/3011 E-mail: metalografia@epn.edu.ec Quito-Ecuador

## ANEXO II. Metalografías del alambre trefilado sin ataque químico



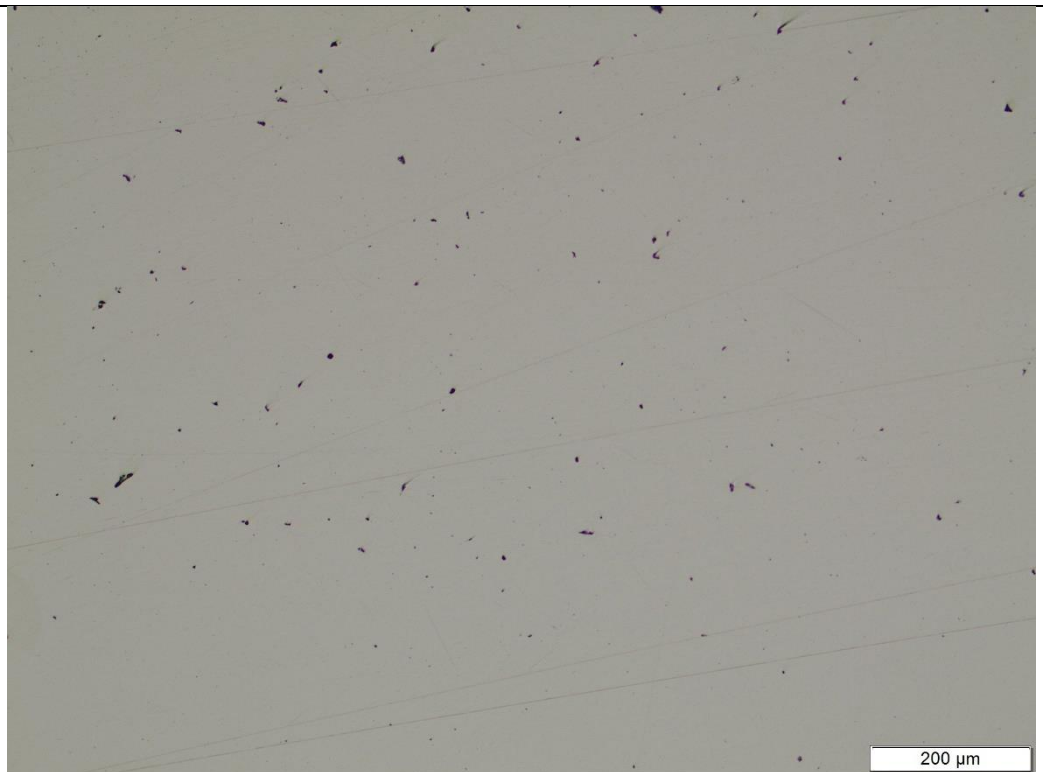
Probeta trefilada con grasa con diámetro de 1.9mm

x200



Probeta trefilada con grasa con diámetro de 1.7mm

x200





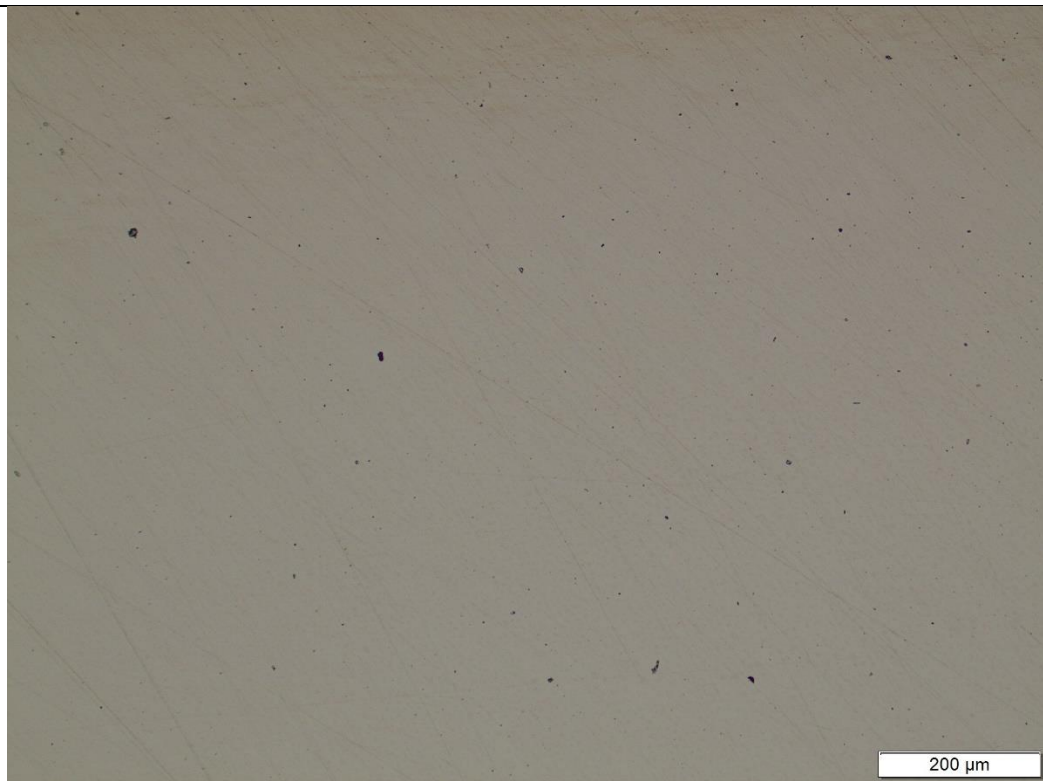
Probeta trefilada con grasa con diámetro de 1.5mm

x200



Probeta trefilada con aceite con diámetro de 2.1mm

x200



Probeta trefilada con aceite con diámetro de 1.9mm

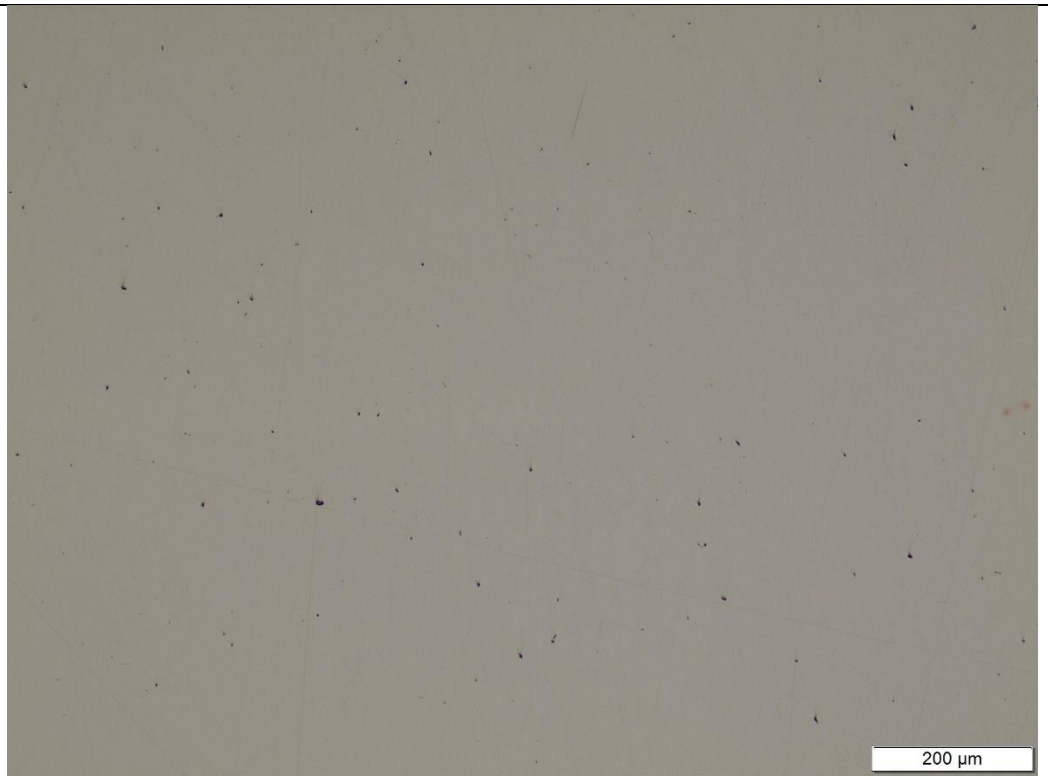
x200



200 μm

Probeta trefilada con aceite con diámetro de 1.7mm

x200



200 μm


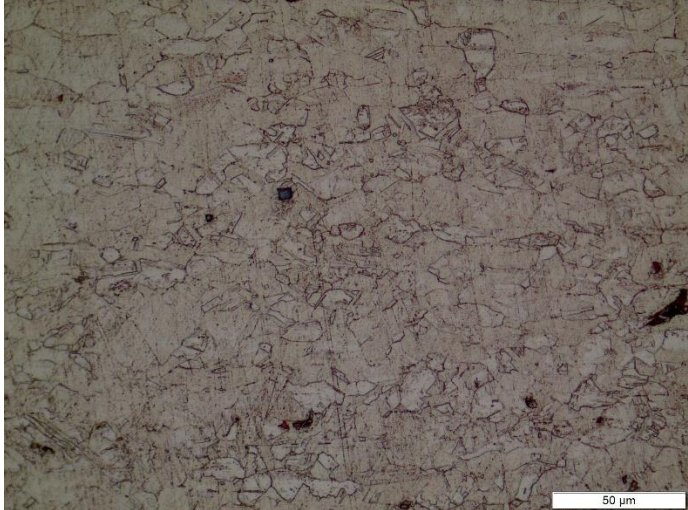
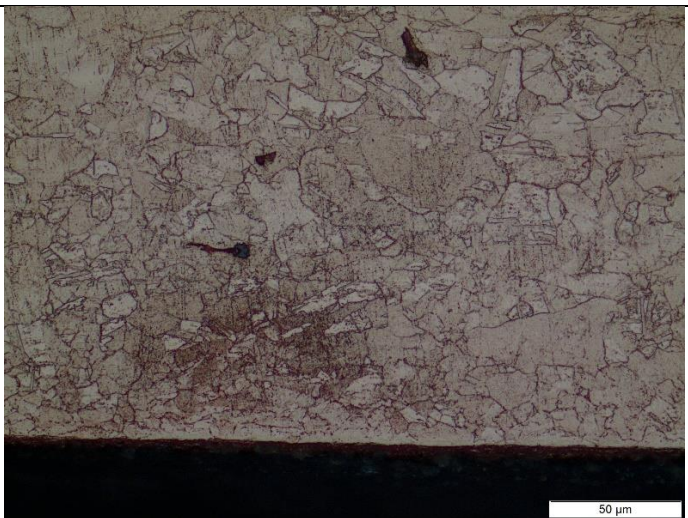
Probeta trefilada con aceite con diámetro de 1.5mm

x200



200  $\mu$ m

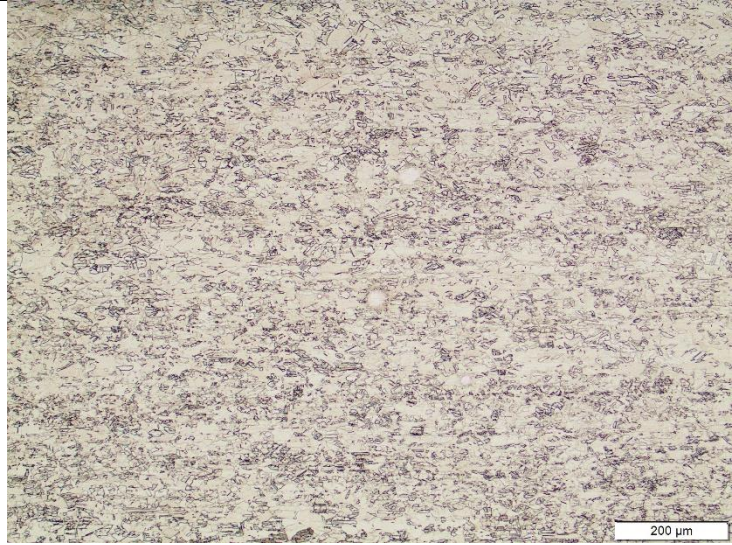
**ANEXO III. Metalografías del alambre de cobre trefilado lubricado con aceite y grasa automotrices con ataque químico.**

Probeta sin proceso de trefilado SP	
x100	
x500 en el centro	
x500 en el borde	

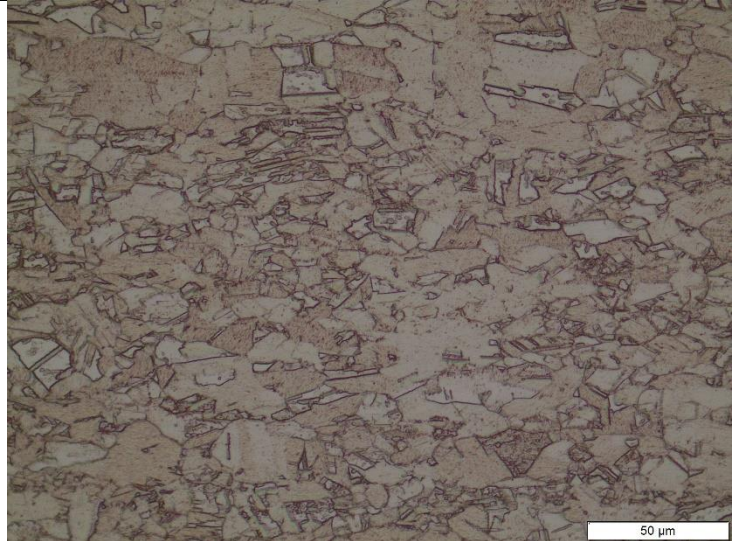


Probeta trefilada con grasa con diámetro de 2.1mm

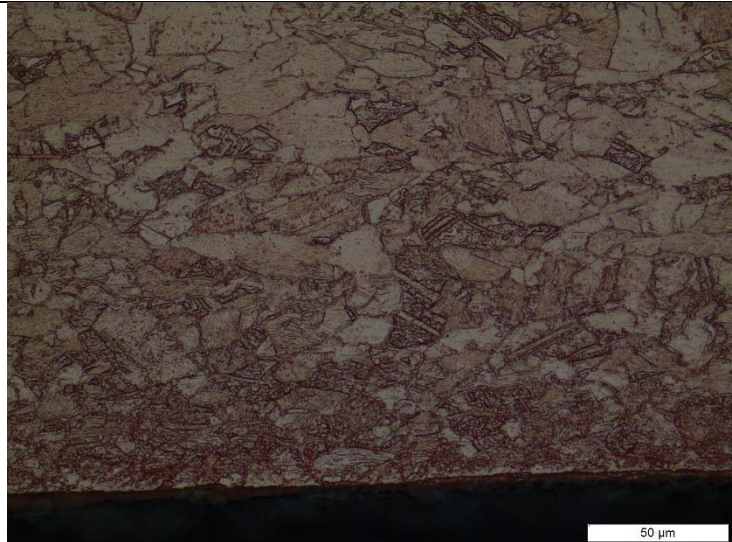
x100



x500  
en el centro



x500  
en el borde



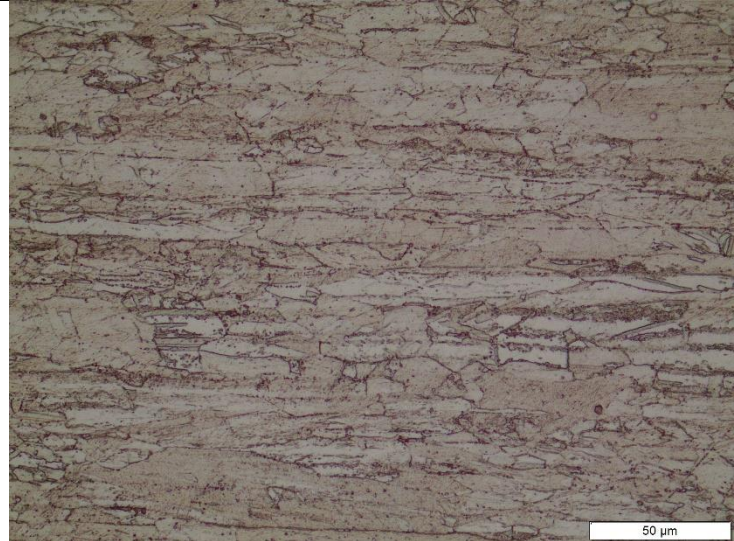


Probeta trefilada con grasa con diámetro de 1.9mm

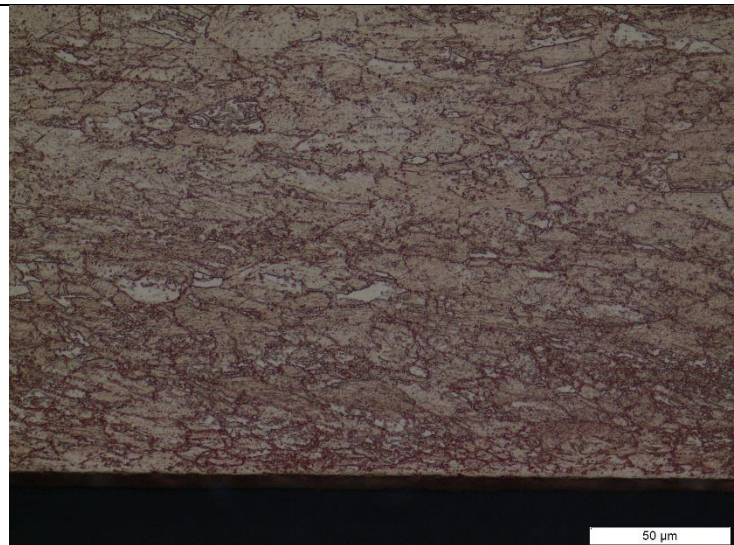
x100



x500  
en el centro




x500  
en el borde





Probeta trefilada con grasa con diámetro de 1.7mm	
<p>x100</p>	
<p>x500 en el centro</p>	
<p>x500 en el borde</p>	



Probeta trefilada con grasa con diámetro de 1.5mm	
<p>x100</p>	
<p>x500 en el centro</p>	
<p>x500 en el borde</p>	



Probeta trefilada con aceite con diámetro de 2.1mm	
x100	 <p>200 μm</p>
x500 en el centro	 <p>50 μm</p>
x500 en el borde	 <p>50 μm</p>

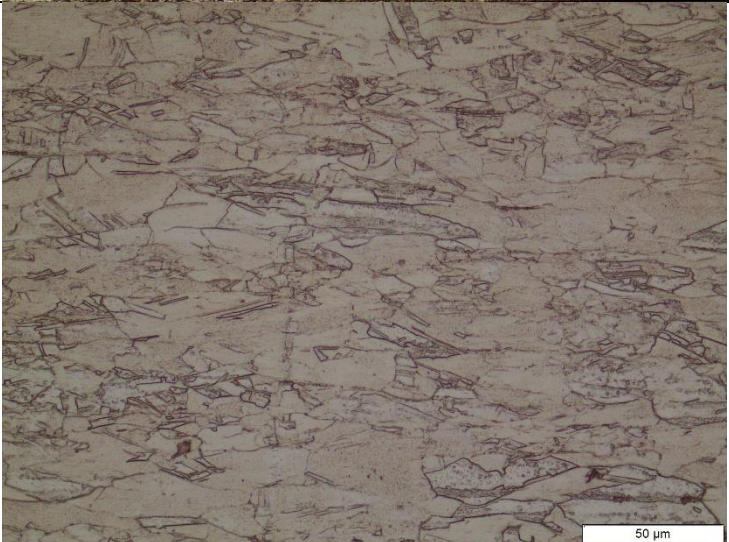


Probeta trefilada con aceite con diámetro de 1.9mm

x100




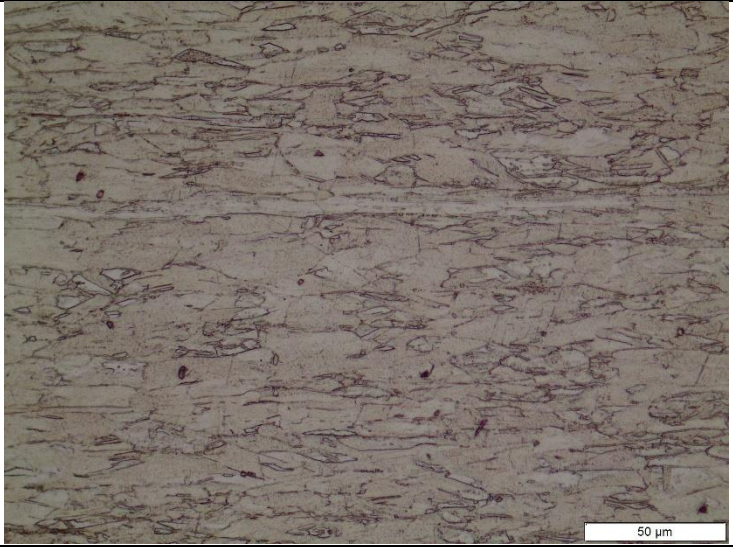
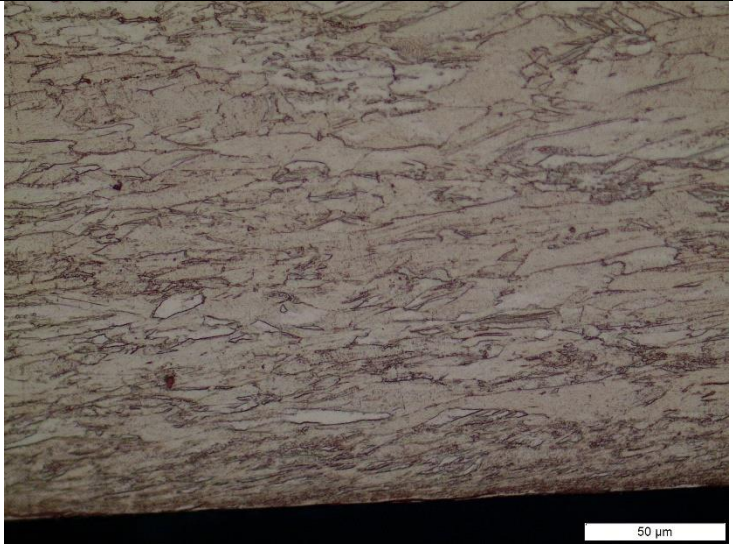
x500  
en el centro




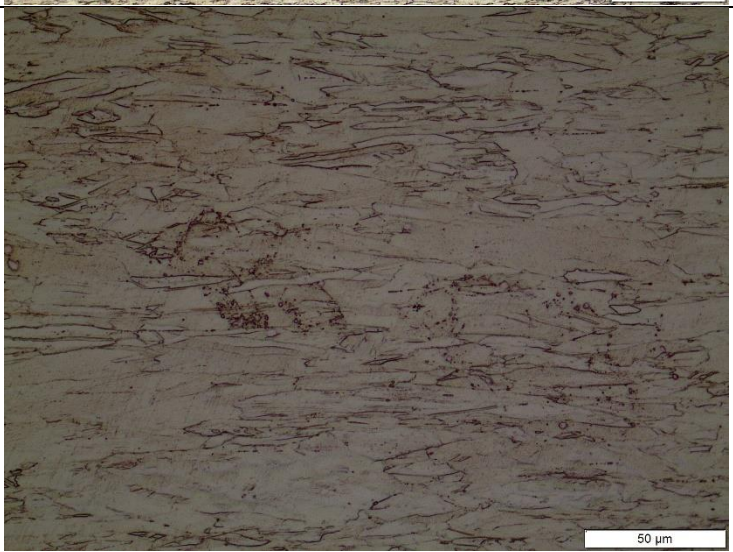
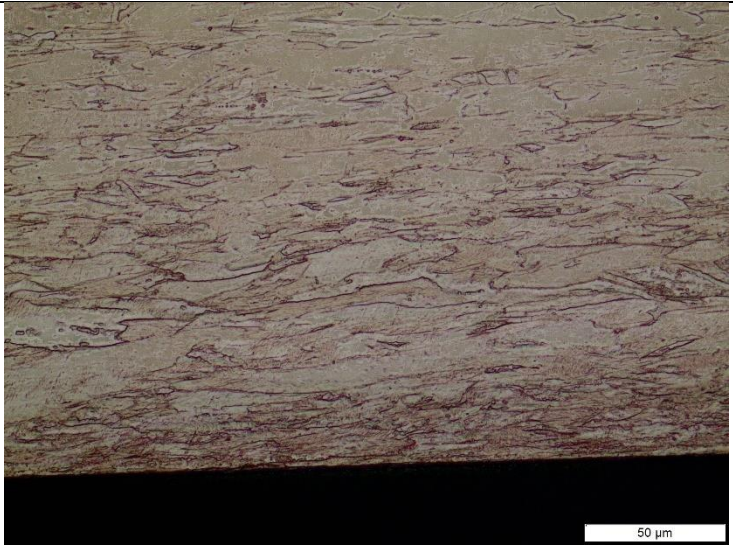
x500  
en el borde





Probeta trefilada con aceite con diámetro de 1.7mm	
<p>x100</p>	
<p>x500 en el centro</p>	
<p>x500 en el borde</p>	



Probeta trefilada con aceite con diámetro de 1.5mm	
<p>x100</p>	
<p>x500 en el centro</p>	
<p>x500 en el borde</p>	



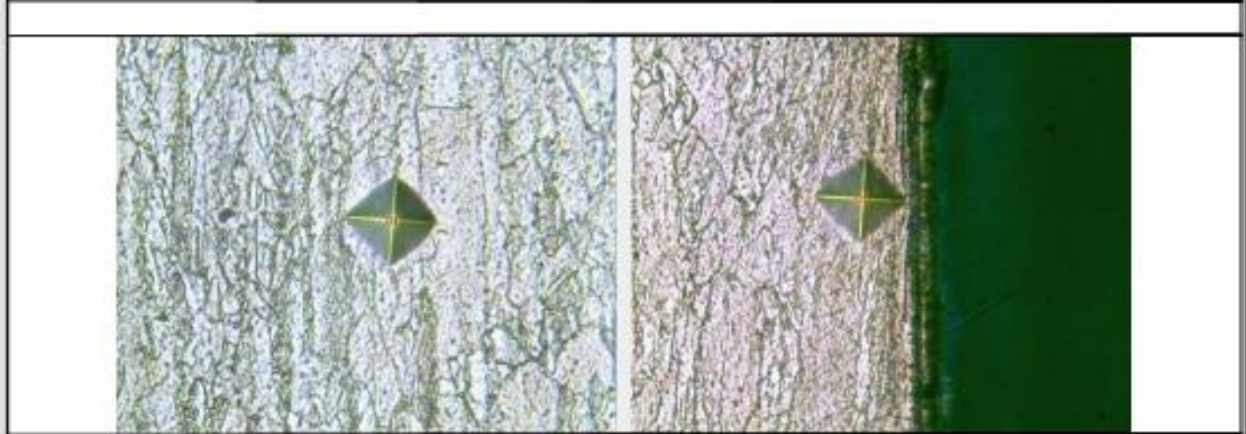


	Micro Hardness Analysis Report
---	--------------------------------

Sample	P 1.9	Date	25/01/2023
Material	GRASA	Load	50
Reported by	ANDRES LOPEZ	Eht	1

Label	HRC	HV	D1	D2	Mean Diagonal	Depth
O1	-	110,93	28,72	29,09	28,91	
O2	-	123,86	26,45	28,27	27,36	

<b>Mean</b>	0,00	117,40	27,59	28,68	28,13	0,00
Signed by:			Unit	µm		





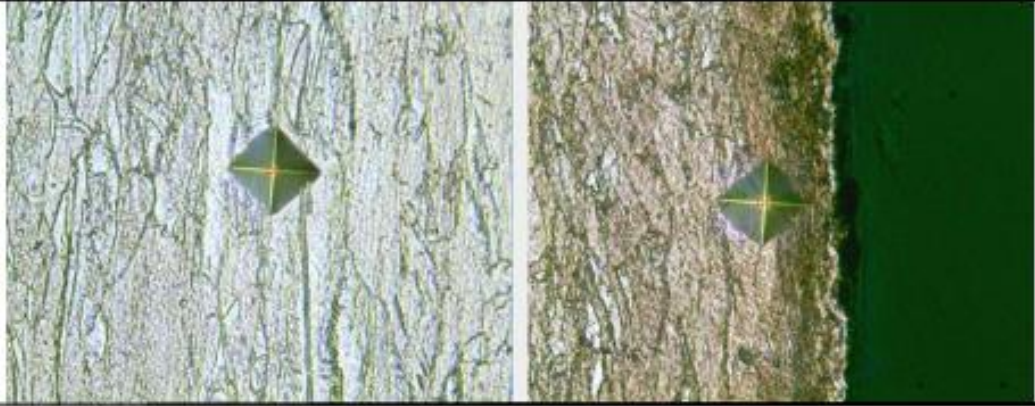
# Micro Hardness Analysis Report

Sample	P 1.7	Date	25/01/2023
Material	GRASA	Load	50
Reported by	ANDRES LÓPEZ	Eht	1

Label	HRC	HV	D1	D2	Mean Diagonal	Depth
O1	-	122,43	26,74	28,29	27,52	
O2	-	127,80	26,94	26,93	26,93	

Mean	0,00	125,12	26,84	27,61	27,23	0,00
------	------	--------	-------	-------	-------	------

Signed by: \_\_\_\_\_ Unit \_\_\_\_\_  $\mu\text{m}$







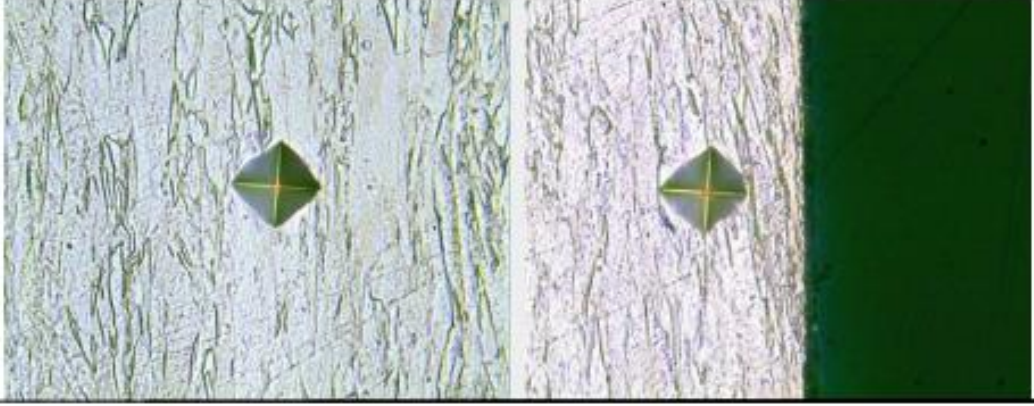
# Micro Hardness Analysis Report

Sample	P1.5	Date	25/01/2023
Material	GRASA	Load	50
Reported by	ANDRES LOPEZ	Eht	1

Label	HRC	HV	D1	D2	Mean Diagonal	Depth
O1	-	127,63	26,49	27,42	26,95	
O2	-	128,79	26,82	26,84	26,83	

Mean	0,00	128,21	26,66	27,13	26,89	0,00
------	------	--------	-------	-------	-------	------

Signed by: \_\_\_\_\_ Unit \_\_\_\_\_  $\mu\text{m}$





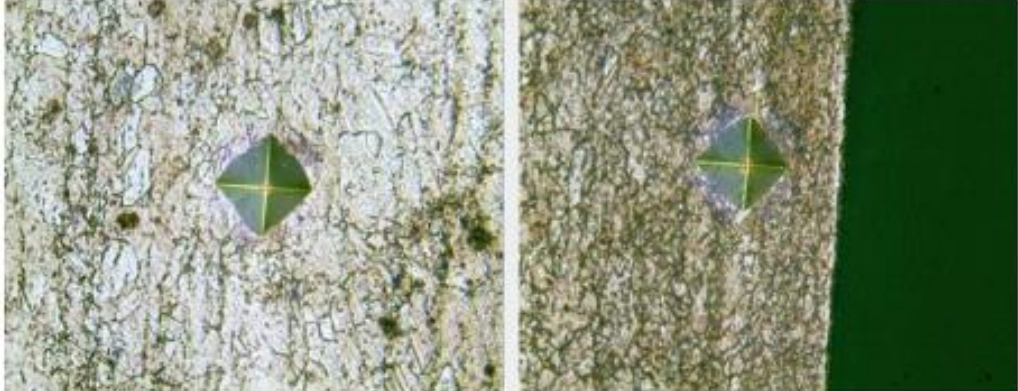
# Micro Hardness Analysis Report

Sample	P 2.1	Date	25/01/2023
Material	OIL	Load	50
Reported by	ANDRES LÓPEZ	Eht	1

Label	HRC	HV	D1	D2	Mean Diagonal	Depth
O1	-	95,67	32,32	29,94	31,13	
O2	-	107,79	28,72	29,93	29,33	

Mean	0,00	101,73	30,52	29,94	30,23	0,00
------	------	--------	-------	-------	-------	------

Signed by: \_\_\_\_\_ Unit \_\_\_\_\_  $\mu\text{m}$







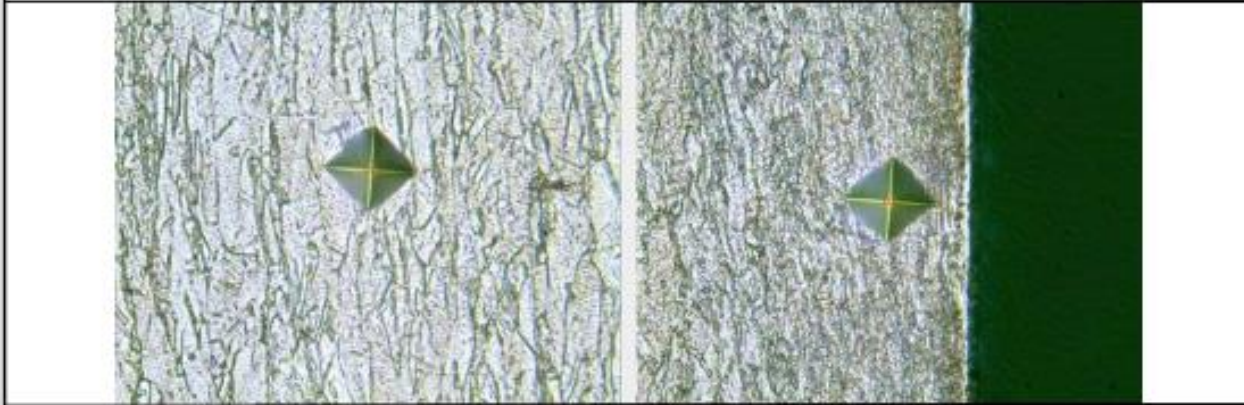


# Micro Hardness Analysis Report

Sample	P 1.7	Date	25/01/2023
Material	OIL	Load	50
Reported by	ANDRES LOPEZ	Eht	1

Label	HRC	HV	D1	D2	Mean Diagonal	Depth
O1	-	121,71	26,93	28,27	27,60	
O2	-	125,85	26,27	28,01	27,14	

Mean	0,00	123,78	26,60	28,14	27,37	0,00
Signed by:			Unit	µm		





## ANEXO V. Informe del ensayo de espectrometría de chispa.



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA



**Resultados de análisis por Espectrometría de Chispa**

**Solicitante** : Sres. Victor Tacan / Martin Tadeo  
**No. Referencia** : RM - 10530  
**Fecha** : 02/02/2023  
**Muestras recibidas** : Una muestra de: Trefilado de Alambre de Cobre para Conductores Eléctricos.

La cuantificación de metales presentes en la muestra se realizó empleando el Espectrómetro de Chispa marca BRUKER modelo Q4TASMAN. A continuación, los resultados obtenidos:

Metales	Trefilado de Alambre de Cobre (%)
Zinc (Zn)	0,032
Plomo (Pb)	0,015
Níquel (Ni)	0,012
Aluminio (Al)	0,031
Niobio (Nb)	0,010
Selenio (Se)	0,002
Bismuto (Bi)	0,010
Cobalto (Co)	0,008
Cobre (Cu)	99,81

Ing. Diana Endara D. PhD.  
Jefe de Departamento

MSc. Evelyn Criollo T.  
Jefe de Laboratorio