

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

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

**COMPONENTE: Trefilado De Alambre de Cobre Para Conductores  
Eléctricos, Sin Lubricación**

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

**VÍCTOR HUGO TACAN TULMO**

**DIRECTOR: ING. WILLAN LEOPOLDO MONAR MONAR Ms.C. MBA.**

**DMQ, febrero 2023**

# CERTIFICACIONES

Yo, VÍCTOR HUGO TACAN TULMO 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.

**Víctor Hugo Tacan Tulmo**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por VÍCTOR HUGO TACAN TULMO, bajo mi supervisión.



**Ing. Willan Monar Ms.C. MBA.**

Certificamos que revisamos el presente trabajo de integración curricular.



**M.Sc. MARÍA VERÓNICA**

**SOTOMAYOR GRIJALVA\_REVISOR 1  
DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN  
CURRICULAR**



**PH.D. PATRICIA ARACELLY**

**RODRÍGUEZ SALAZAR\_REVISOR 2  
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 producto resultante 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.

Víctor Hugo Tacan Tulmo

Ing. Willan Monar M.Sc. MBA.

## DEDICATORIA

Quiero dedicar este proyecto a mi madre Angélica Tulmo, quien me apoyó de manera incondicional y siempre estuvo ahí para apoyarme, quien supo guiarme desde pequeño e inculcarme los valores que me han formado, por consolarme en mis peores momentos y motivarme a seguir adelante.

A mi padre Jorge Tacan y a mi tía Carmen Tacan, quienes me apoyaron académicamente y brindaron todas las herramientas para poder estudiar y superarme.

A mis hermanos, Mauricio Borja y Fernanda Borja, por ayudarme y guiarme desde mi niñez, además de apoyarme motivacionalmente y siempre brindándome su total confianza.

A mi mejor amigo Matías Buenaño, quien me apoyó y motivó en aquellas dificultades que he tenido, por celebrar esos pequeños triunfos y batallar en esos momentos difíciles sin pedir nada a cambio.

Y, por último, quiero dedicar este proyecto a mi yo de primer semestre por no haberse rendido a pesar de las dificultades que tuvo, por seguir adelante a pesar de los malos comentarios y saber sobrellevar todas las adversidades y superarlas.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a mi madre y mis hermanos por apoyarme, motivarme y por brindarme su confianza en el transcurso de mi vida y mi formación profesional.

A mi padre y mi tía, por darme la oportunidad de superarme académicamente y hacer lo posible por darme su apoyo.

Al Ing. Roberto Buenaño y la Sra. Gloria Franco, quienes fueron quienes me guiaron cuando más lo necesite, que me brindaron una mano sin ningún interés y me aconsejaron como si fuera su hijo.

A mi mejor amigo y a mis compañeros de universidad Martín Monar y David Murillo, quienes durante la carrera fueron un gran apoyo y la constante motivación en aquellas situaciones que afrontamos durante la carrera.

A aquellos docentes quienes fueron una inspiración para superarme y por brindarme sus conocimientos durante la carrera, además de ser los pilares que me formaron académicamente y éticamente.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES .....	1
DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	3
DEDICATORIA .....	4
AGRADECIMIENTO .....	5
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	6
ÍNDICE DE FIGURAS .....	7
ÍNDICE DE TABLAS .....	8
RESUMEN .....	9
ABSTRACT.....	10
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO .....	1
1.1 Objetivo general.....	1
1.2 Objetivos específicos .....	1
1.3 Alcance .....	1
1.4 Marco teórico .....	2
1.4.1 Deformación Plástica .....	2
1.4.2 Proceso de Trefilado.....	3
1.4.3 Parámetros de Trefilado .....	4
1.4.4 Tipos de máquinas trefiladoras .....	6
1.4.5 Objetivos de Desarrollo Sostenible .....	9
2 METODOLOGÍA.....	11
2.1 Adquisición del material .....	12
2.2 Proceso de Trefilación .....	13
2.3 Obtención de Probetas .....	16
2.4 Ensayos .....	17
3 RESULTADOS, ANÁLISIS DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	20
3.1 Resultados.....	20
3.1.1. Velocidad de Trefilado.....	20
3.1.2. Porcentaje de Trabajo en Frío .....	20
3.1.3. Estabilidad Geométrica .....	23
3.1.4. Ensayo de Chispa – Espectrometría .....	24
3.1.5. Ensayo de Micro Dureza Vickers.....	25
3.1.6. Micro Estructura .....	29

3.2	Análisis de Resultados.....	33
3.3	Conclusiones .....	34
3.4	Recomendaciones .....	35
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36
	ANEXOS.....	38
	Anexo I. Micrografías sin Ataque Químico .....	39
	Anexo II. Micrografías con Ataque Químico .....	42
	Anexo III. Resultado Espectrometría .....	51
	Anexo IV. Resultado Micro dureza y Microestructura .....	52

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Deformación plástica idealizada.....	2
Figura 1.2	Proceso de trefilado .....	3
Figura 1.3	Invariabilidad del volumen.....	5
Figura 1.4	Trefiladora con acumulación y torsión .....	6
Figura 1.5	Trefiladora con acumulación sin torsión .....	6
Figura 1.6	Trefiladora de tiro directo-júpiter.....	7
Figura 1.7	Máquinas trefiladoras tipo NDB y NDR .....	7
Figura 1.8	Máquina trefiladora laboratorio de conformado mecánico .....	8
Figura 1.9	Eje para enrollar alambre trefilado .....	8
Figura 1.10	Asiento trefila .....	8
Figura 1.11	Dados de trefila .....	9
Figura 1.12	Trefila posicionada .....	9
Figura 2.1	Diagrama de flujo .....	12
Figura 2.2	Ahusado del alambre .....	14
Figura 2.3	Inserción del alambre en el dado de trefilación .....	14
Figura 2.4	Sujeción del alambre en el tambor giratorio de la trefiladora .....	14
Figura 2.5	Alambre trefilado .....	15
Figura 2.6	Muestra para realizar probetas.....	15
Figura 2.7	Placa base probeta .....	16
Figura 2.8	Alambre colocado en placa base .....	16
Figura 2.9	Probeta en molde con glicerina .....	16
Figura 2.10	Pulido de probetas .....	16
Figura 2.11	Probetas pulidas .....	17
Figura 2.12	Durómetro METKON.....	18
Figura 2.13	Microscopio Olympus SC30 .....	18
Figura 2.14	Reactivo químico.....	19
Figura 3.1	Porcentaje trabajo en frío vs N° pasadas .....	21
Figura 3.2	Límite elástico vs porcentaje trabajo en frío .....	22
Figura 3.3	Resistencia a la tracción vs porcentaje de trabajo en frío.....	22
Figura 3.4	Porcentaje elongación vs porcentaje trabajo en frío .....	23



Figura 3.5 Composición química alambre .....	24
Figura 3.6 Micro dureza alambre sin lubricación .....	28
Figura 3.7 Comparación dureza sin lubricación, lubricación con grasa y aceite automotriz .....	28
Figura 3.8 Resultado espectrometría .....	51

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Propiedades material base .....	12
Tabla 2.2 Toma de medidas, diámetro alambre .....	13
Tabla 2.3 Dimensiones alambre sin trefilar .....	13
Tabla 2.4 Parámetros para el ensayo de micro dureza .....	18
Tabla 2.5 Reactivo químico .....	19
Tabla 3.1 Comparación de diámetros .....	23
Tabla 3.2 Dureza probeta sin trefilado .....	25
Tabla 3.3 Dureza probeta P1 T2.2 .....	25
Tabla 3.4 Dureza probeta P3 T2.0 .....	26
Tabla 3.5 Dureza probeta P5 T1.8 .....	26
Tabla 3.6 Dureza probeta P7 T1.6 .....	27
Tabla 3.7 Dureza probeta P9 T1.4 .....	27
Tabla 3.8 Microestructura sin ataque químico .....	29
Tabla 3.9 Microestructura con ataque químico, aumento x100 y x500 .....	32

## RESUMEN

El presente proyecto tiene como objetivo el análisis de los parámetros de trefilado bajo condiciones de lubricación y no lubricación. Este componente del trabajo trata sobre el proceso de trefilado bajo condiciones de no lubricación en alambres de cobre C10100 para conducción eléctrica, mediante la caracterización del material antes y después del proceso. Se caracterizó el material para el alambre disponible en el Laboratorio de Conformado Mecánico de la FIM, se realizaron ensayos metalográficos, metrológicos y micro dureza. Se realiza el proceso de trefilado utilizando una trefila de 52 agujeros cuyos diámetros van desde 4,1 [mm] hasta 0.26 [mm]; en pasadas por trefilas para determinar los parámetros de trefilado como: velocidad de aplicación de la carga, esfuerzos de trefilado y porcentaje de deformación. De esta manera se establece la sostenibilidad del proceso de trefilación para alambre de cobre para conducción eléctrica para las condiciones de prueba realizadas.

**PALABRAS CLAVE:** trefilado sin lubricación, cobre, trefila, propiedades mecánicas, deformación plástica.

## **ABSTRACT**

The objective of this project is the analysis of the drawing parameters under lubricated and non-lubricated conditions. This component of the work deals with the drawing process under non-lubricated conditions in C10100 cooper wires for electrical conduction, through the characterization of the material before and after the process. The material was characterized for the wire available in the Mechanical Forming Laboratory of the FIM, metallographic, metrological and micro hardness test were carried out. The drawing process is carried out using a 52 – hole wire drawing whose diameters range from 4.1 [mm] to 0.26 [mm] in passes through wire drawing parameters such as: load application speed, drawing stresses and deformation percentage. In this way, the sustainability of the drawing process for cooper wire for electrical conduction is established for the test conditions carried out.

**KEYWORDS:** drawing without lubrication, cooper, wire drawing, mechanical properties, plastic deformation.

# **1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO**

El presente proyecto busca proporcionar una guía para poder determinar los parámetros óptimos en el proceso de trefilado de alambre de cobre con uso en conducciones eléctricas, bajo condiciones de no lubricación y considerando los parámetros que caracterizan al trefilado tales como: velocidad de trefilado, porcentaje de reducción y caracterización, esto se llevará a cabo mediante el uso de la máquina trefiladora del laboratorio de Conformado Mecánico de la Facultad de Ingeniería Mecánica. Además, se realizan pruebas y ensayos de laboratorio para la caracterización de los alambres obtenidos después de realizar el proceso de trefilado.

## **1.1 Objetivo general**

Analizar los parámetros de trefilado de alambre de cobre, en condiciones de no lubricación, bajo criterios de sostenibilidad.

## **1.2 Objetivos específicos**

1. Recopilar información bibliográfica del proceso de trefilado de cobre sin lubricación.
2. Determinar la microestructura del alambre de cobre mediante ensayo metalográfico.
3. Comparar las medidas de los diámetros de la trefila y el alambre trefilado bajo el proceso de no lubricación.
4. Medir la micro dureza de probetas en diferentes diámetros de trefilado sin lubricación.

## **1.3 Alcance**

El presente proyecto busca analizar los parámetros de trefilado que se obtienen al utilizar la máquina de trefilado manual del Laboratorio de Conformado Mecánico de la Facultad de Ingeniería Mecánica, para alambre de cobre para conducción eléctrica. Debido al aumento del precio final debido al procesos de manufactura, el uso de equipos para trefilado de alto rendimiento se convierte en una solución viable y sostenible, para ello se debe considerar ciertas condiciones de trefilado además del material a ser usado, cabe recalcar que el trefilado presenta grandes ventajas como bajo costo, regulación de calibre por pasada, etc.

Este proyecto de integración curricular tiene como principio la recopilación bibliográfica del estado del arte del proceso de trefilado de cobre para conducción eléctrica, el cual permitirá la obtención de información sistematizada, estructurada con las especificaciones técnicas correspondientes; posteriormente, se realizarán pruebas experimentales para el estudio de los diversos parámetros de trefilado, con la consideración de que se realizará el proceso sin ningún tipo de lubricante con el fin de observar el producto final.

Finalmente, se realizarán pruebas de laboratorio para evaluar la calidad superficial del alambre trefilado, con el fin de determinar las variables de trefilado óptimas para el material y llevar a cabo su respectivo análisis estadístico.

## 1.4 Marco teórico

El proceso de trefilado es un proceso de deformación plástica que tiene como principal característica el trabajo en frío. Es conocido debido a que su uso brinda resultados como alambres, tubos, etc., analizando temas como deformación plástica y entendiendo conceptos de como un material al sobrepasar su límite de fluencia este se comporta de manera plástica provocando que el material no regrese a su condición inicial, pero aumentando su resistencia hasta cierto punto de ruptura. La fuerza necesaria para poder realizar el trefilado de un material y la influencia del ángulo con el que la matriz trefila al material, de igual manera la intervención de la fricción ya que es un proceso sin lubricación; así como las distintas máquinas y sus diseños para acumulación y torsión, sin torsión, etc.

### 1.4.1 Deformación Plástica

Cuando un metal policristalino con granos uniformes equiaxiales es sometido a una carga que produce deformación plástica a temperatura ambiente (Cold Work) los granos del material se deforman y alargan, como se observa en la figura 1.1.

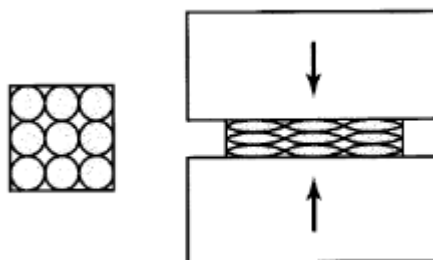


Figura 1.1 Deformación plástica idealizada

Este proceso de deformación puede ser llevado a cabo mediante acciones como compresión de piezas metálicas, forja, tensión como el estiramiento de chapas.

Durante el proceso de deformación plástica existe una continuidad de masa en los límites del grano los cuales permanecen intactos. El material deformado plásticamente presenta una mayor resistencia debido al entrelazamiento de las dislocaciones y los límites de grano.

La resistencia depende del grado de deformación al cual está sometido el material, a mayor deformación mayor dureza presentará el material. [1]

Al denominado trabajo en frío (CW) se lo puede interpretar como una relación de las áreas transversales, tanto después de la deformación como inicial como lo indica la ecuación (1). [2]

$$\%CW = \left( \frac{A_o - A_d}{A_o} \right) * 100 \quad (1) \quad [2]$$

Donde:

A<sub>o</sub>: área transversal inicial

A<sub>d</sub>: área después de la deformación

### 1.4.2 Proceso de Trefilado

El proceso de trefilado consiste en la reducción del área transversal de una varilla y/o alambre largo, la cual se reduce o cambia mediante la acción de una fuerza la cual es aplicada en un extremo de la varilla y/o alambre a través de una matriz denominada matriz de trefilado o de estiramiento, en la figura 1.2 se observa el proceso de trefilado. [1]

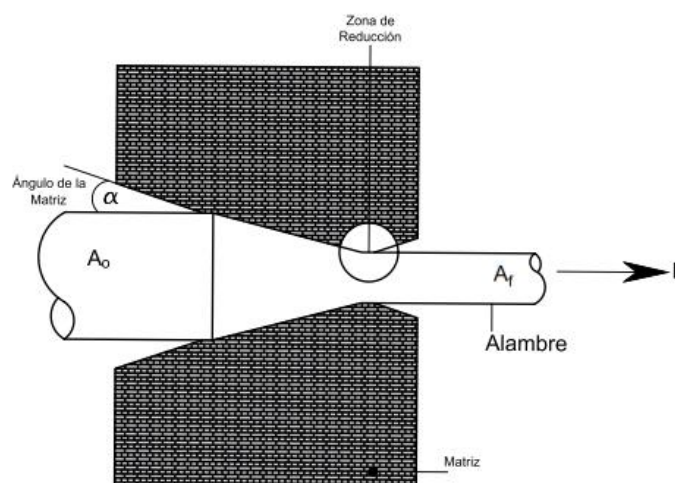


Figura 1.2 Proceso de trefilado

En este proceso influyen parámetros que determinan la fuerza F necesaria para poder trefilar el material, entre los cuales se encuentran: velocidad de trefilado, temperatura, lubricación y área seccional a reducir.

### 1.4.3 Parámetros de Trefilado

Los parámetros del trefilado son: la Fuerza de Trefilado (F), el porcentaje de deformación plástica, la velocidad de trefilado, la invariabilidad de volumen, la lubricación.

La fuerza de trefilado, es la carga que se requiere aplicar al material para producir la deformación plástica, para el cálculo de esta fuerza necesaria de trefilado se toman parámetros de no lubricación, debido a esto la fricción existente entre el material a trefilar y la matriz de trefilado es máximo, además debido a la no uniformidad de la deformación que ocurre en la matriz de trefilado se requiere una energía adicional denominada como *trabajo de deformación redundante*, se tiene la siguiente ecuación para su cálculo [1]:

$$F = Y_{avg} A_f \left[ \left( 1 + \frac{\mu}{\alpha} \right) \ln \left( \frac{A_o}{A_f} \right) + \frac{2}{3} \alpha \right] \quad (2) \quad [1]$$

Donde:

$Y_{avg}$ : Esfuerzo último de tensión.

$A_f$ : Área transversal final de trefilado.

$A_o$ : Área transversal inicial de trefilado.

$\mu$ : Coeficiente de fricción dinámico.

$\alpha$ : Ángulo entre la matriz de trefilado y el alambre.

Para condiciones ideales, se tiene que el área máxima de reducción por pasada es del 63%. En el proceso de trefilado en la práctica, la reducción del área transversal por pasada alcanza aproximadamente un 45%, los alambres finos suelen tener un rango de trefilado del 15 al 25% por pasada mientras que los de mayor diámetro tienen un rango de trefilado del 20 al 45%. Para reducciones mayores al 45% pueden ocurrir rupturas en el material y mal acabado superficial. [1]

El porcentaje de Reducción de Trefilado o Porcentaje de Trabajo en Frío (%CW), Es una variable importante en el proceso de trefilado, indica como se presenta la reducción de la sección transversal del alambre durante el proceso, es representada en cantidades de porcentaje, se la puede representar por las ecuaciones (3) y (4) [2]

$$\%R = \left[ 1 - \left( \frac{D_f}{D_i} \right)^2 \right] * 100 \quad (3) \quad [2]$$

$$\%CW = \left( \frac{A_o - A_d}{A_o} \right) * 100 \quad (4) \quad [2]$$

Donde:

$D_f$ : Diámetro final

$D_i$ : Diámetro inicial

$A_o$ : Área transversal inicial

$A_d$ : Área transversal final

Se tiene el principio de invariabilidad del volumen o masa del alambre el cual indica que se mantiene constante a pesar de su incremento de longitud y disminución de diámetro. [1] cómo se observa en la figura 1.3.

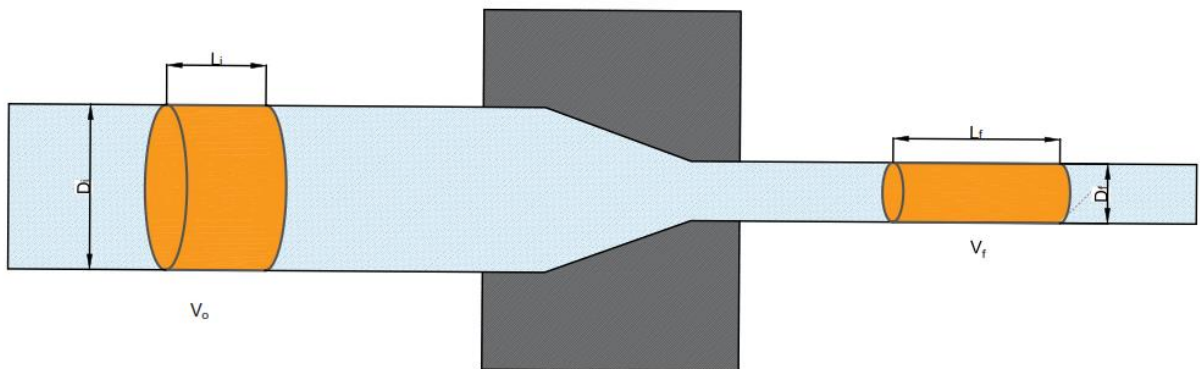


Figura 1.2 Invariabilidad del volumen

Cumpliendo que:

$$V_f = V_o \quad (5) \quad [1]$$

Donde:

$V_f$ : Volumen Final

$V_o$ : Volumen Inicial



#### 1.4.4 Tipos de máquinas trefiladoras

Para los distintos trabajos o requerimientos que existen en la industria se han diseñado ciertas máquinas trefiladoras, las cuales presentan variaciones a la máquina trefiladora convencional, y las importantes son: con acumulación y torsión, con acumulación sin torsión, de tiro directo-júpiter, NDB y NDR.

La máquina trefiladora con acumulación y torsión, tiene como principal característica que el propio alambre causa torsión en su proceso, además de que con la misma se pueden producir distintas reducciones del área transversal del material, es controlada de manera automática. [3] ver figura 1.4.



*Figura 1.3 Trefiladora con acumulación y torsión [3]*

La máquina trefiladora con acumulación sin torsión, tiene 2 bobinas que giran con el alambre que sale del dado, poseen una banda la cual gira en dos sentidos, para incrementar gira de manera anti horaria, y para disminuir gira de manera horaria. [3] ver figura 1.5.



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

Debido a la trayectoria del diseño de la máquina trefiladora de tiro directo-júpiter no se producen tensiones en el alambre, además de que consta con poleas controladas las cuales reducen la ruptura del material. [3] ver figura 1.6.



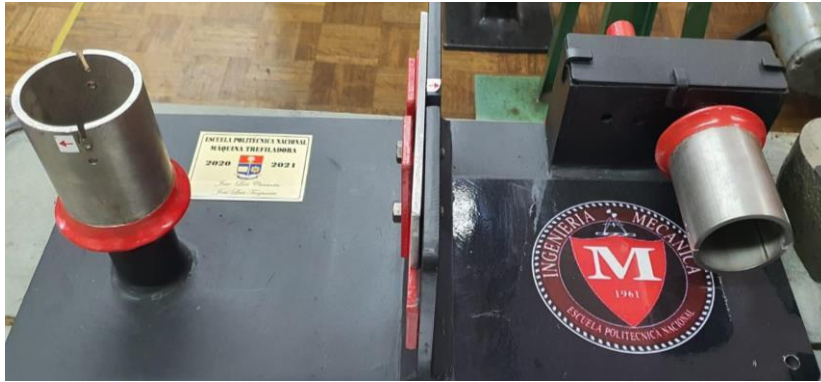
*Figura 1.5 Trefiladora de tiro directo-júpiter [3]*

Las máquinas trefiladoras tipo NDB y NDR son trefiladoras cuya particularidad reside en que se desempeñan en ambientes húmedos. [3] ver figura 1.7



*Figura 1.6 Máquinas trefiladoras tipo NDB y NDR [3]*

Para este componente del trabajo de integración curricular, la máquina trefiladora para la realización del proceso de trefilado de alambre de cobre para conductores eléctricos se realizará en el Laboratorio de Conformado Mecánico de la Facultad de Ingeniería Mecánica, como se ve en la figura 1.8.



*Figura 1.7 Máquina trefiladora laboratorio de conformado mecánico*

La figura 1.9 muestra el eje para enrollar el alambre trefilado.



*Figura 1.8 Eje para enrollar alambre trefilado*

La figura 1.10 muestra el asiento de trefila donde se posicionará la trefila de dados.



*Figura 1.9 Asiento de trefila*

La figura 1.11 muestra la trefila de dados de trefilado.



Figura 1.10 Dados de trefilado

La figura 1.12 muestra el trefila posicionada en el asiento de trefila.



Figura 1.11 Trefila posicionada

#### 1.4.5 Objetivos de Desarrollo Sostenible

El 25 de septiembre de 2015, la ONU estableció ciertos objetivos a cumplirse para poder asegurar un desarrollo sostenible, los cuales deberán ser alcanzados en los próximos 15 años para lograr la protección del planeta y asegurar la viabilidad de los procesos. [4], De esta manera se plantean 17 objetivos: Fin de la Pobreza, Hambre Cero, Salud y Bienestar, Educación de Calidad, Igualdad de Género, Agua limpia y Saneamiento, Energía Asequible y no Contaminante, Trabajo Decente y Crecimiento Económico, Industria Innovación e Infraestructura, Reducción de las Desigualdades, Ciudades y Comunidades Sostenibles, Producción y Consumo Responsables, Acción por el Clima, Vida Submarina, Vida de Ecosistemas Terrestres, Paz, Justicia e Instituciones Sólidas, Alianzas para lograr los Objetivos. [4]

Este proyecto de integración curricular, se relaciona con los objetivos: Objetivo 7: Garantizar el acceso a una energía asequible; Objetivo 8: Trabajo Decente y Crecimiento Económico; Objetivo 9: Industria Innovación e Infraestructura; Objetivo 12: Producción y Consumo Responsables; y, Objetivo 17: Alianzas para lograr los Objetivos.

Objetivo 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna, Debido al constante avance tecnológico también se evidencia un avance considerable en las energías de manera que cada vez se vuelve más sostenible y disponible; el acceso a

la electricidad, el uso de energías renovables cada vez es de mayor impacto y su uso incrementa cada día. [5]

El objetivo 8: Promover el crecimiento económico inclusivo y sostenible, el empleo y el trabajo decente para todos. En la actualidad el impacto del Covid 19 ha afectado de manera directa la posibilidad de encontrar un empleo, de esta manera se ha intensificado la pérdida de empleos y la obtención de trabajos que son realizados bajo condiciones inhumanas, así la inclusión y el brindar condiciones de trabajo donde el trabajador pueda desarrollar sus actividades de manera eficiente y eficaz puede provocar un aumento en el crecimiento económico. [6]

Objetivo 9: Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación. La industrialización inclusiva y sostenible, en conjunto con la creación y modificación de infraestructura puede dar como resultado que el desarrollo económico se vuelva dinámico y competitivo de manera que se generen nuevas plazas de empleo y nuevos ingresos. La tecnología y diseño son herramientas capaces de introducir innovación y permitir el uso eficiente de recursos. [7]

Objetivo 12: Producción y Consumo Responsables, el consumo y producción mundial dependen netamente de recursos naturales provocando así daños colaterales sobre el planeta. Con la evolución de la industrialización se han observado aumentos en la degradación ambiental que como resultado afecta los sistemas de los que dependerán las generaciones futuras. [8]

Objetivo 17: Revitalizar la Alianza Mundial para el Desarrollo Sostenible, para poder satisfacer los objetivos para el desarrollo sostenible es necesario la alianza de asociaciones a nivel mundial, nacionales y locales. Así implantando los valores y principios con el fin de establecer objetivos en común el cual tenga como principal prioridad el planeta y sus habitantes. [9]

## 2 METODOLOGÍA

En este apartado se determinan los procesos a ser realizados para poder alcanzar los objetivos planteados en el presente proyecto. Se utiliza una metodología experimental la cual consiste en el controlar de manera rigurosa ciertas variables independientes para que tengan un efecto de cambio en las variables dependientes. Se realizan distintos procesos para la obtención de datos y puedan convertirse en información útil, como son la obtención y preparación de probetas y respectivos ensayos de laboratorio.

Como primer paso se tiene la determinación del material a ser utilizado, posterior, se realiza el proceso de trefilado en la máquina trefiladora del laboratorio de Conformado Mecánico. Como tercer paso se extraen muestras para realizar las probetas para su caracterización. La caracterización se lleva a cabo realizando los ensayos de espectrometría, micro dureza y estabilidad geométrica. Un análisis de resultados permite analizar la influencia de los parámetros de trefilado. Finalmente se realizan las conclusiones y recomendaciones, lo que permitirá la apertura de futuras investigaciones en este sentido.

El proceso de trefilado se inicia con un diámetro inicial de 2.2 [mm] y se realizan 9 pasadas por cada trefila disminuyendo con variaciones de 0.2 mm hasta llegar a un diámetro de 1.4 [mm], al terminar cada trefilado se obtienen probetas de 25 [mm] de longitud y realizar la caracterización del material en cada paso y así observar el comportamiento del material al proceso de trefilado. En este proyecto se analizarán los parámetros de trefilado referente a la no lubricación.

El diagrama de flujo mostrado en la figura 2.1 muestra la secuencia de pasos a seguir en el desarrollo de este componente.

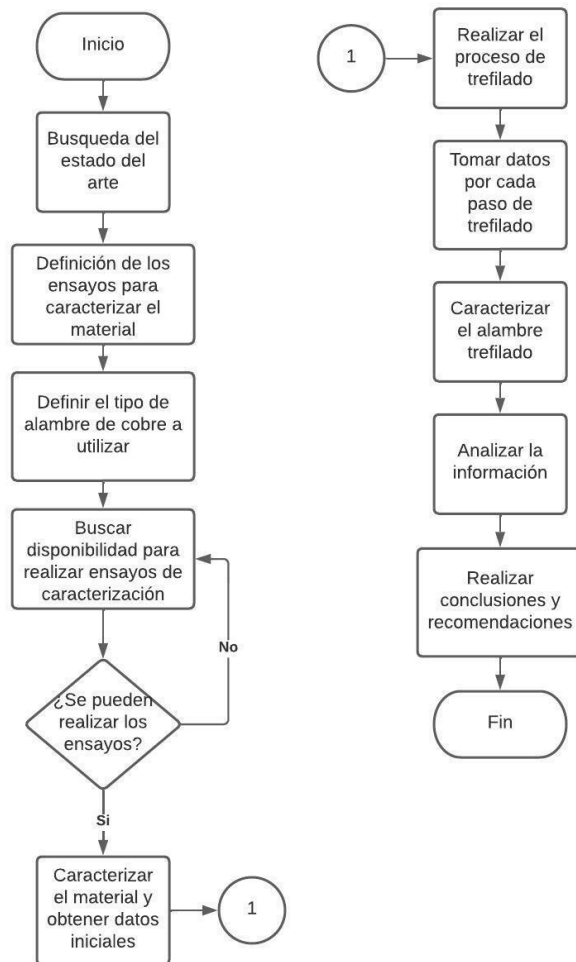


Figura 12 Diagrama de flujo

## 2.1 Adquisición del material

El material a utilizarse es un alambre de cobre para conducción eléctrica, cuyas propiedades se pueden evidenciar en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Propiedades material base [10]

Número de Aleación (y nombre)	Composición Nominal, [%]	Propiedades Mecánicas			
		Resistencia a la Tracción		Límite Elástico	
		[MPa]	[ksi]	[MPa]	[ksi]



C10100 (cobre para conducción eléctrica libre de oxígeno)	99,99 Cu	221-455	32-66	69-365	10-53
---	----------	---------	-------	--------	-------

Para determinar el diámetro del alambre se tomaron 5 medidas distintas a lo largo del alambre como se observa en la tabla 2.2 y se realizó un promedio de los diámetros.

*Tabla 2.2 Toma de medidas, diámetro alambre*

N° de medida	Diámetro Inicial $\varnothing_i$ [mm]
1	2.15
2	2.1
3	2.15
4	2.15
5	2.1

Se obtiene el diámetro del alambre promediado, 2.13 [mm], debido la tolerancia dimensional del dado de trefilación se tomará el valor del diámetro del alambre de 2.1 [mm] y se obtiene las dimensiones del alambre sin trefilar como se observa en la Table 2.3.

*Tabla 2.3 Dimensiones alambre sin trefilar*

Dimensiones	Valor
Diámetro del alambre	2.1 [mm]
Longitud del alambre	1500[mm]

## 2.2 Proceso de Trefilación

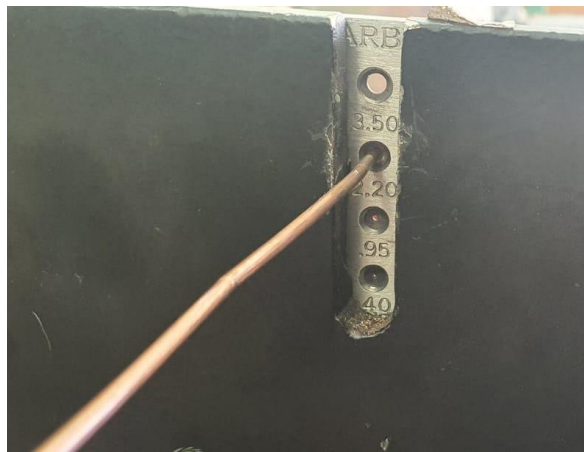
Una vez obtenido el material base para el proceso de trefilación, se realiza un ahusado en la punta del alambre para poder tener un punto de apoyo en el tambor giratorio de la trefiladora, se realiza un ahusado de 40 [mm] en la punta del alambre. Ver figura 2.2.





*Figura 2.2 Ahusado del alambre*

El objetivo del ahusado del alambre es para poder insertar en el dado correspondiente para realizar el proceso de trefilación. Ver figura 2.3.



*Figura 2.3 Inserción del alambre en el dado de trefilación*

Se estira el alambre hasta poder sujetarlo en el tambor giratorio de la trefiladora de modo que se exista una tensión y se realice el proceso de trefilado mediante el movimiento del mango rotador. Ver figura 2.4.



*Figura 2.4 Sujeción del alambre en el tambor giratorio de la trefiladora*

Finalmente, se obtiene el alambre trefilado que se enrolla en el tambor giratorio. Ver figura 2.5



*Figura 2.5 Alambre trefilado*

Para la obtención de las muestras se realiza un corte en la zona delimitada por el rectángulo negro (ver figura 2.5), esto con el fin de obtener una muestra lo más horizontal posible, cabe recalcar que al terminar el proceso no se debe tratar de enderezar el alambre, esto debido a que los cambios en el alambre de cobre son muy susceptibles a fuerzas externas.

Al tomar las muestras para realizar probetas se realiza una denominación a cada muestra, donde: P corresponde al número de pasada y T es el diámetro de trefila. En la figura 2.6 se observa la muestra denominada P1 – T 2.2 mm, la cual hace referencia a la muestra obtenida en la pasada número 1 por el diámetro de trefila 2.2 [mm].



*Figura 2.6 Muestra para realizar probetas*

## 2.3 Obtención de Probetas

Se hace uso de una placa de acero de 6 [mm] de espeso para poder tener una base en la que repose el alambre a ser analizado.

Tabla 2.4 Proceso elaboración de probetas

 <p>Figura 2.7 Placa base probeta</p>	<p>La figura 2.7 muestra la placa base de la probeta donde se coloca la muestra de alambre trefilado.</p>
 <p>Figura 2.8 Alambre colocado en placa base</p>	<p>En la figura 2.8 se observa el alambre trefilado colocado en la placa base, para la sujeción se hizo uso de adherente.</p>
 <p>Figura 2.9 Probeta en molde con glicerina</p>	<p>La figura 2.9 muestra la probeta en el molde con glicerina.</p>

Una vez enfriadas las probetas se realiza el pulido de las mismas como se observa en la figura 2.9.



Figura 2.10 Pulido de probetas

De esta manera se obtienen las probetas pulidas para poder realizar los ensayos de micro estructura y micro dureza. Ver figura 2.11.



*Figura 2.11 Probetas pulidas*

## **2.4 Ensayos**

Para la caracterización del material se realizaron ensayos tales como: ensayo de chispa o espectrometría, ensayo de micro dureza, ensayo de microestructura y la estabilización geométrica.

Se realiza el ensayo de chispa o espectrometría con el fin de determinar la composición química del alambre de cobre a utilizarse, el cual provee la información necesaria para poder determinar de manera más exacta su composición con una rapidez considerable al momento de realizar el ensayo y un costo relativamente bajo. [10]

La cuantificación de metales presentes se realizó con el uso del Espectrómetro de Chispa marca BRUKER modelo Q4TASMAN.

### **Ensayo de Micro dureza**

Mediante el ensayo de micro dureza, se puede determinar la capacidad de un material; su ductilidad, resistencia al desgaste y límite elástico, tomando en cuenta la geometría del indentador, carga aplicada y el tiempo de la carga aplicada. [10]

Para la realización del ensayo se hace uso del equipo DUROLINE marca METKON y se basa en especificaciones como la carga, tiempo de aplicación de la carga, número de indentaciones y lugar de indentación, obtenidos de la Norma ASTM E384 – 17. La micro dureza obtenida tiene que estar dentro de los rangos [42-115] en escala de dureza Vickers [HV]. [11]



Figura 2.12 Durómetro METKON

Tabla 2.5 Parámetros para el Ensayo de Micro dureza [12]

Carga Aplicada	Tiempo de Aplicación de la Carga	Número de Indentaciones	Lugar de Indentación
50 [gr]	15 [s]	2	Centro y borde

### Ensayo de Micro estructura

Utilizando el microscopio en la zona donde se aplica la carga se puede observar su comportamiento a manera microestructura, visualizando así su estructura cristalina y analizar si durante el cambio de sección del alambre se evidencia cambio microestructural. [10]

Para la realización del ensayo de micro dureza se basa en la Norma ASTM E3-11 para la preparación de las probetas obtenidas anteriormente, se las pule de manera que en lo mínimo posible se evidencia líneas sobre el material a ser analizado. Basándose en la Norma ASTM E407 se realiza un compuesto de Cloruro de Hierro (III), Etanol y Ácido



Clorhídrico para realizar el ataque químico. Mediante un proceso de inmersión de 7 segundos se extrae la probeta y se obtiene la microestructura a escalas 100x y 500x. [11]

Tabla 2.6 Reactivo químico [13]

Reactivo	Composición		Observaciones	Usos
Cloruro Férrico	$FeCl_3$	2.5 g	Inmersión o aplicar de 1 segundo a varios minutos	Cobre, Aluminio, Magnesio, Níquel, Zinc
Alcohol Etílico	$C_2H_5OH$	48 ml		
Ácido Clorhídrico	$HCl$	1 ml		



Figura 2.13 Microscopio Olympus SC30

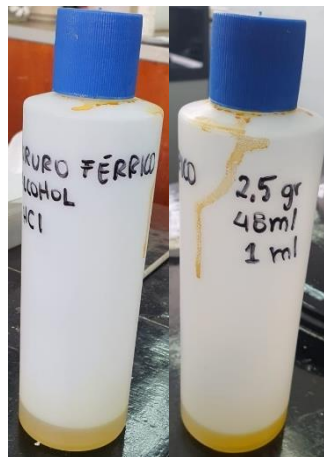


Figura 2.14 Reactivo químico

En la estabilidad Geométrica con el uso de un vernier digital calibrado, se obtienen 5 medidas de cada muestra de alambre trefilado, se realiza un promedio y se obtiene el diámetro promediado de cada muestra de proceso de trefilado, se toma como referencia la medida nominal de la trefila y se obtiene un porcentaje de error de medida.

### **3 RESULTADOS, ANÁLISIS DE RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Después de la realización del proceso de trefilado y la caracterización del material antes y después del proceso de trefilado se obtiene la velocidad de trefilado, porcentaje de trabajo en frío, estabilidad geométrica, composición química, micro dureza y microestructura, de los cuales se realiza un análisis de resultados.

#### **3.1 Resultados**

##### **3.1.1. Velocidad de Trefilado**

Para la obtención de la velocidad de trefilado se realizó un aproximado de toma de tiempo del proceso de trefilado en base a la distancia del alambre a trefilar.

$$V = \frac{d}{t} \approx \frac{1500[mm]}{19.88[s]}$$

$$V \approx 75.45 \frac{[mm]}{[s]}$$

##### **3.1.2. Porcentaje de Trabajo en Frío**

Se determinará el porcentaje de trabajo en frío (%CW) de cada una de las probetas obtenidas, mediante la ecuación (4)

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

Para la probeta P1 T2.2

$$\%CW = \left( \frac{\frac{\pi d_o^2}{4} - \frac{\pi d_d^2}{4}}{\frac{\pi d_o^2}{4}} \right) * 100$$

$$d_o = 2.2[mm]$$

$$d_d = 2.1[mm]$$

$$\%CW = \left( \frac{\frac{\pi(2.2 \times 10^{-3})^2}{4} - \frac{\pi(2.1 \times 10^{-3})^2}{4}}{\frac{\pi(2.2 \times 10^{-3})^2}{4}} \right) * 100$$

$$\%CW = 8.88\%$$

De esta manera se obtiene el porcentaje de trabajo en frío en relación al número de pasada como se puede observar en la figura 3.1.

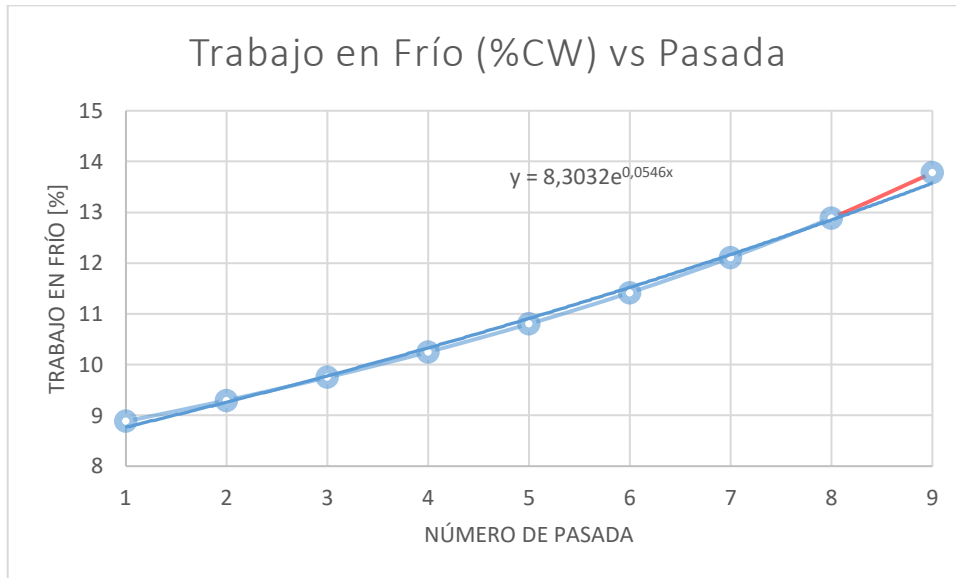


Figura 3.1 Porcentaje Trabajo en Frío vs N° Pasadas

De esta manera se hace uso de los gráficos de límite elástico, resistencia a la tracción y porcentaje de elongación, donde se trazaron líneas color negro y verde, las cuales corresponden al inicio del proceso de trefilado y al final del proceso respectivamente. En la figura 3.2 se puede observar el límite elástico aproximado en función del porcentaje de trabajo en frío, donde  $S_{yo}$  es correspondiente al inicio del proceso y  $S_{yd}$  corresponde al final del proceso de trefilado.

$$S_{yo} \approx 199 [MPa]$$

$$S_{yd} \approx 220 [MPa]$$



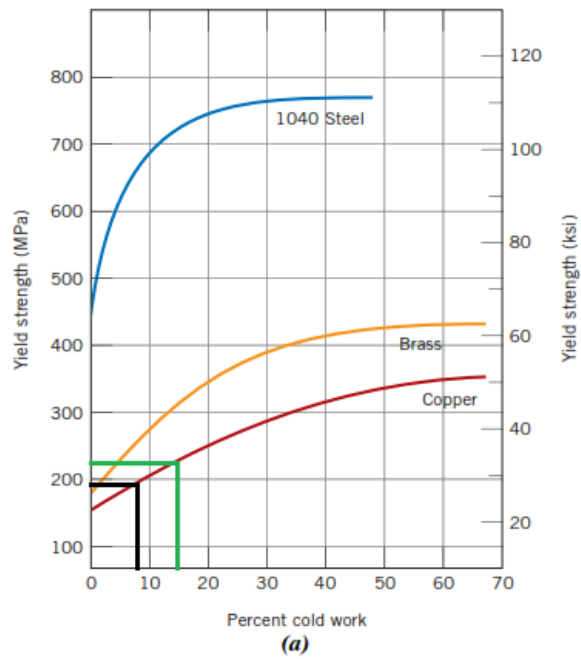


Figura 3.2 Límite Elástico vs Porcentaje Trabajo en Frío [2]

En la figura 3.3 se observa la resistencia a la tracción en función del porcentaje de trabajo en frío.

$$S_{r,o} \approx 250 [MPa]$$

$$S_{r,d} \approx 280 [MPa]$$

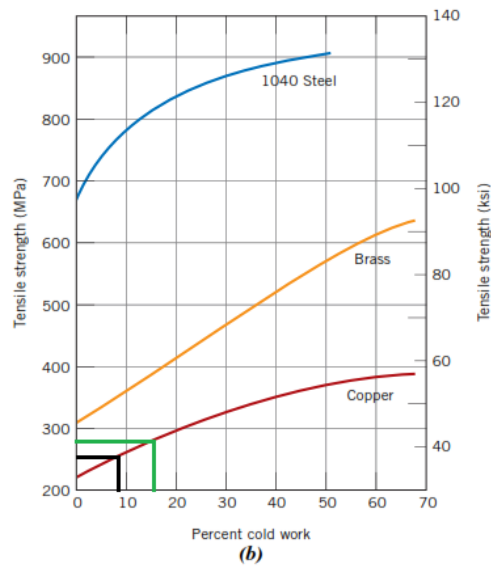


Figura 3.3 Resistencia a la Tracción vs Porcentaje de Trabajo en Frío [2]

En la figura 3. se observa el porcentaje de elongación en función del porcentaje de trabajo.

$$\%EL_o = 28\%$$

$$\%EL_d = 21\%$$

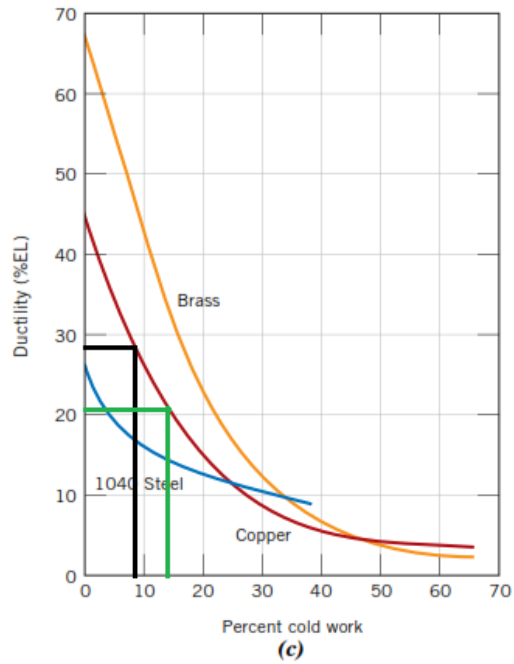


Figura 3.4 Porcentaje Elongación vs Porcentaje Trabajo en Frío

### 3.1.3. Estabilidad Geométrica

Tabla 3.1 Comparación de Diámetros

Probeta	Medida [mm]	Diámetro Promedio	Diámetro Dado Trefilación	Error [%]
P1 T2,2	2.1	2.10	2.2	4.45
	2.15			
	2.12			
	2.09			
	2.05			
P3 T2,0	1.88	1.93	2.0	3.6
	1.89			
	1.94			
	1.95			
	1.98			
P5 T1,8	1.70	1.73	1.8	3.78
	1.71			
	1.73			
	1.78			

	1.74			
P7 T1,6	1.57	1.55	1.6	2.87
	1.56			
	1.54			
	1.56			
	1.54			
P9 T1,4	1.37	1.35	1.4	3.86
	1.30			
	1.39			
	1.35			
	1.32			

### 3.1.4. Ensayo de Chispa – Espectrometría

En la figura 3.5, se observan el resto de elementos que componen al alambre de Cobre, en mayor porcentaje se presenta valores de 99.81%, de esta manera se establece que el alambre para conducción eléctrica adquirido en el Laboratorio de Conformado Mecánico con 99.81% de Cobre puede conducir electricidad sin ningún problema.

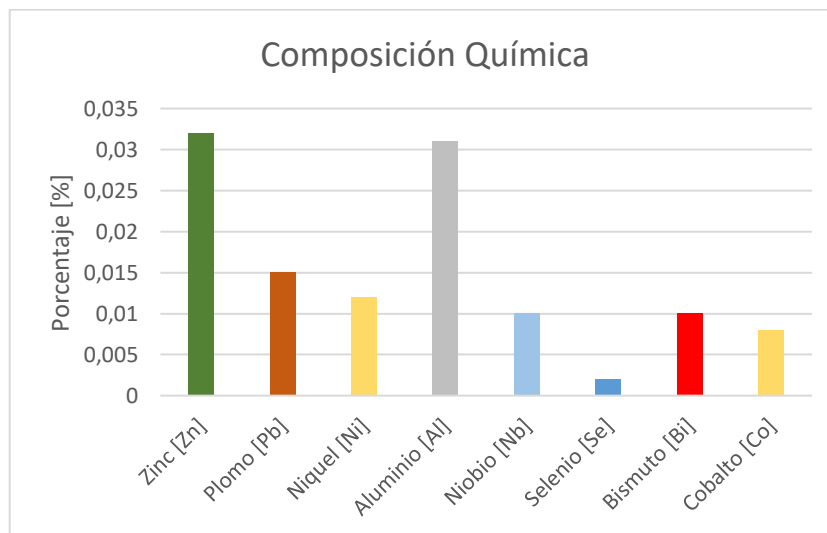


Figura 3.5 Composición química alambre

### 3.1.5. Ensayo de Micro Dureza Vickers

Tabla 3.2 Dureza probeta sin trefilado

Probeta Sin Proceso de Trefilado – SP				
Lugar de Indentación	Diagonal 1 [μm]	Diagonal 2 [μm]	Promedio Diagonales [μm]	Dureza [HV]
Centro	32.16	31.96	32.06	90.18
Borde	31.10	32.77	31.94	90.88

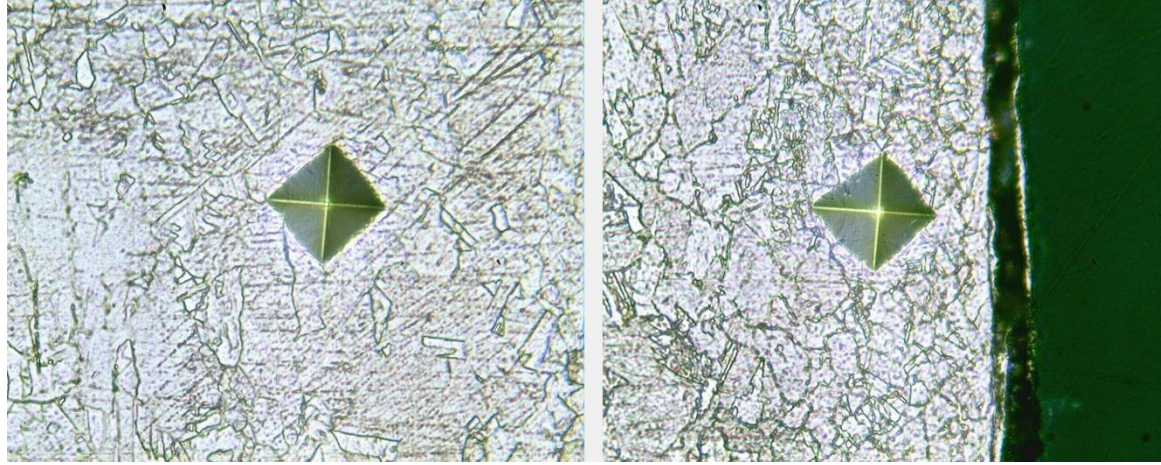


Tabla 3.3 Dureza probeta P1 T2.2

Probeta P1 T2.2				
Lugar de Indentación	Diagonal 1 [μm]	Diagonal 2 [μm]	Promedio Diagonales [μm]	Dureza [HV]
Centro	34.66	34.31	34.49	77.94
Borde	32.26	30.04	31.15	95.52

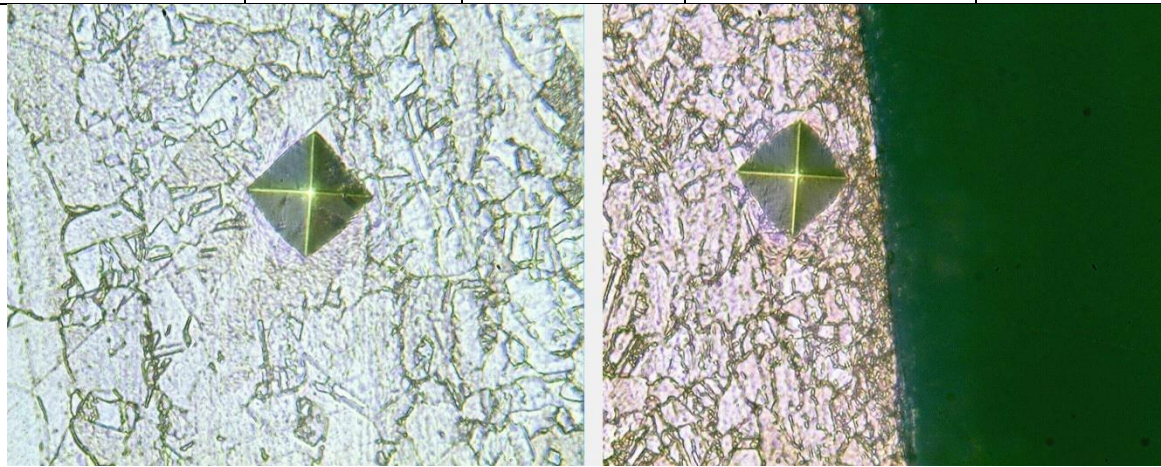




Tabla 3.4 Dureza probeta P3 T2.0

Probeta P3 T2.0				
Lugar de Indentación	Diagonal 1 [μm]	Diagonal 2 [μm]	Promedio Diagonales [μm]	Dureza [HV]
Centro	29.10	29.11	29.11	109.42
Borde	27.28	24.93	26.11	136.03

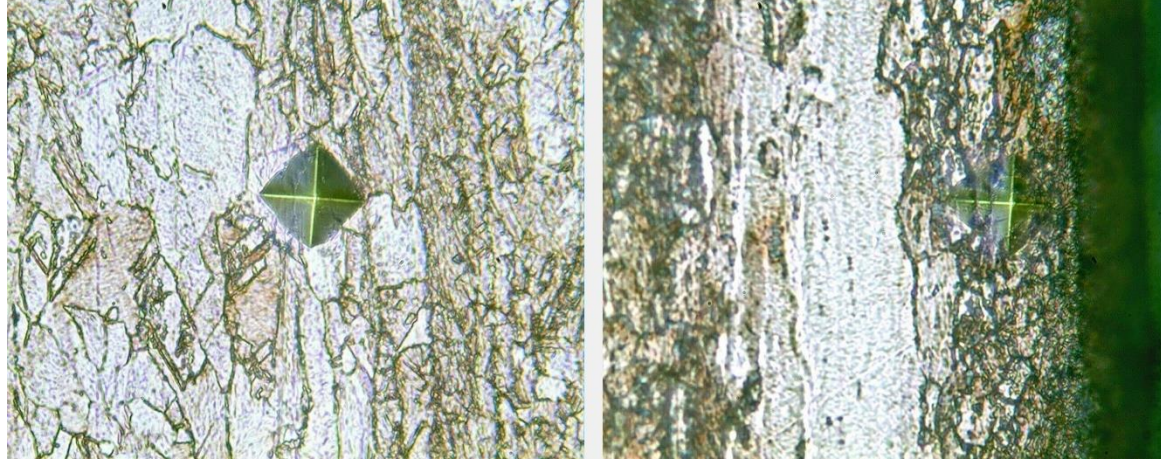


Tabla 3.5 Dureza probeta P5 T1.8

Probeta P5 T1.8				
Lugar de Indentación	Diagonal 1 [μm]	Diagonal 2 [μm]	Promedio Diagonales [μm]	Dureza [HV]
Centro	38.10	37.41	37.75	65.04
Borde	28.24	28.86	28.55	113.73

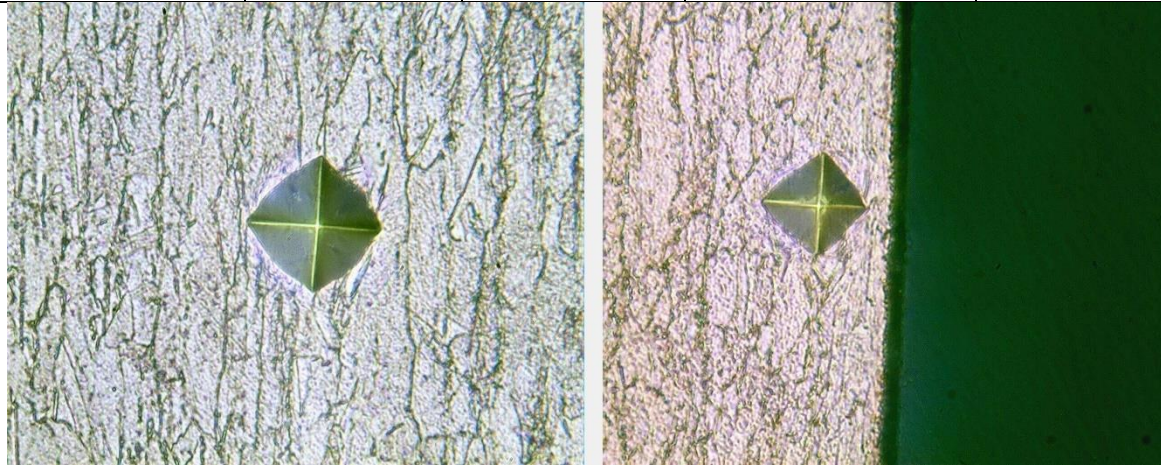




Tabla 3.6 Dureza probeta P7 T1.6

Probeta P7 T1.6				
Lugar de Indentación	Diagonal 1 [μm]	Diagonal 2 [μm]	Promedio Diagonales [μm]	Dureza [HV]
Centro	28.13	28.16	28.14	117.03
Borde	26.60	27.55	27.07	126.48

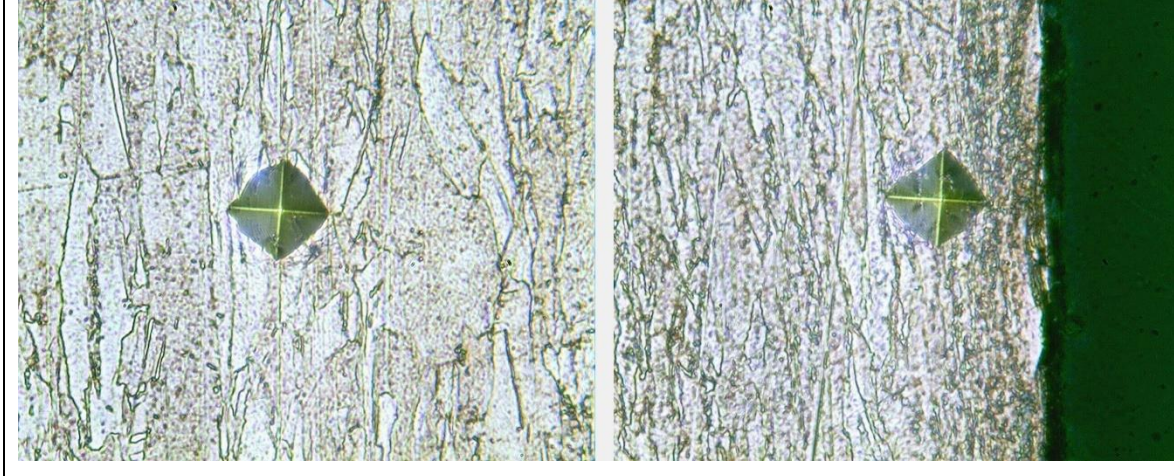
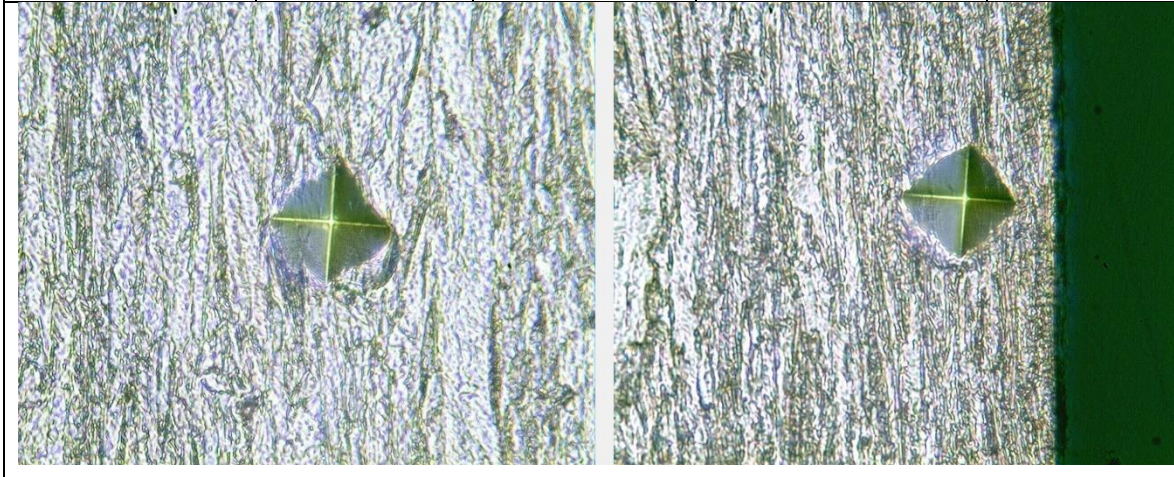


Tabla 3.7 Dureza probeta P9 T1.4

Probeta P9 T1.4				
Lugar de Indentación	Diagonal 1 [μm]	Diagonal 2 [μm]	Promedio Diagonales [μm]	Dureza [HV]
Centro	32.64	31.36	32	90.52
Borde	30.65	29.72	30.18	101.75



En la figura 3.6, se observa la variación de dureza con respecto al número de pasada.

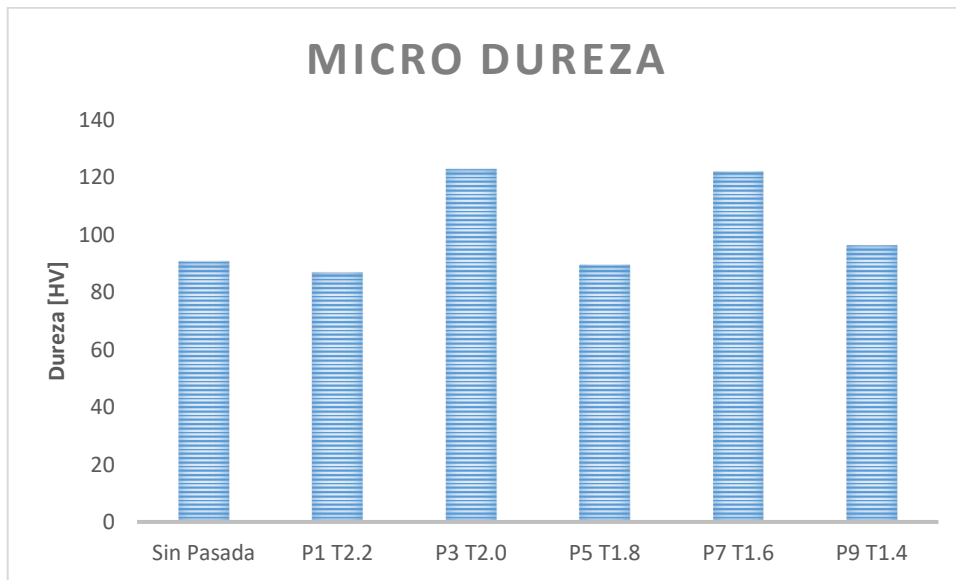


Figura 3.6 Micro dureza alambre sin lubricación

La figura 3.7 muestra la variación de la dureza con respecto al parámetro de lubricación, indicando la dureza cuando se realiza el proceso de trefilado sin lubricación, y utilizando lubricantes como son la grasa y el aceite automotriz.

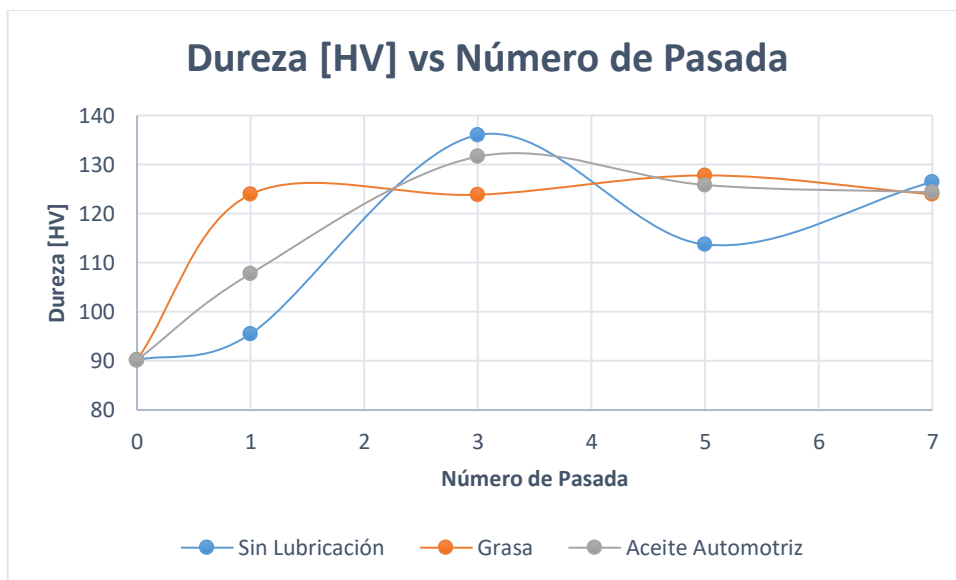


Figura 3.7 Comparación dureza sin lubricación, lubricación con grasa y aceite automotriz

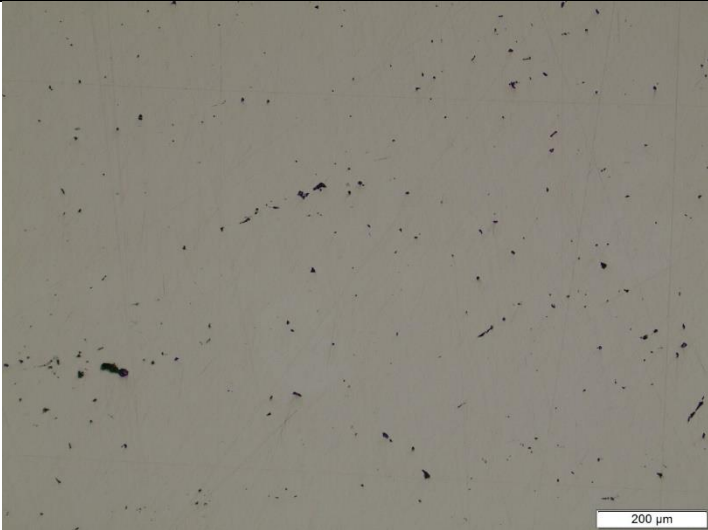
### 3.1.6. Micro Estructura

En la tabla 3.8 se presentan las micrografías de las distintas probetas sin ataque químico. En todas las micrografías se presentan puntos negros, los cuales se deben al efecto del contenido de oxígeno en la microestructura, debido a que es una aleación Cu-O, en porcentajes de oxígeno de aproximadamente 0.024%

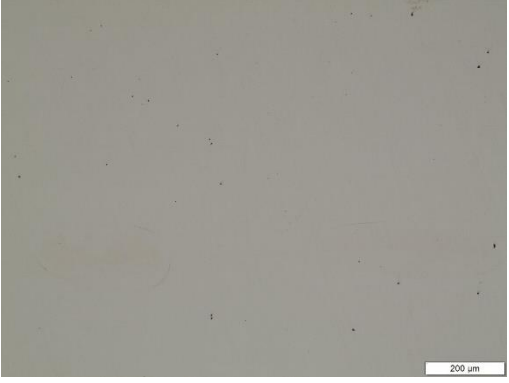

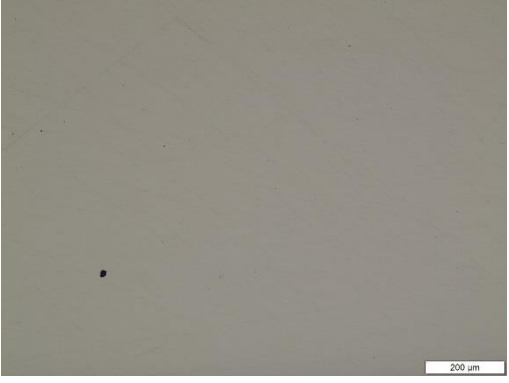

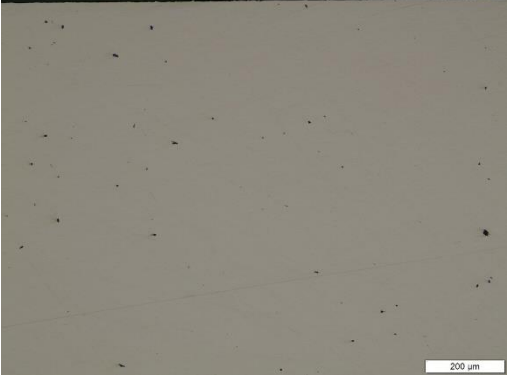
En las probetas P1 T2.2, P3 T2.0 y P5 T1.8 se presentan en menor cantidad dichas inclusiones de oxígeno, debido a la compactación de los granos. La probeta P7 T1.6, presenta imperfecciones más notables, esto debido a la naturaleza propia del material, inclusive se pueden presentar dichas fallas por el proceso de pulido, ya que las imperfecciones debido al oxígeno tienden a presentarse de manera puntual o como círculos.

Todas las micrografías de las probetas que han sido trefiladas con respecto a la probeta del alambre sin trefilar presentan menor índice de inclusiones de oxígeno, a excepción de la probeta P7 T1.6.

*Tabla 3.8 Microestructura sin ataque químico*

Probeta Sin Proceso de Trefilado – SP	
	
Probeta P1 T2.2	Probeta P3 T2.0



	
Probeta P5 T1.8	Probeta P7 T1.6
	
Probeta P9 T1.4	
	

Para una mejor visualización de las micrografías sin Ataque Químico se puede observar el Anexo I

En la tabla 3.9 se presentan las micrografías de las distintas probetas con ataque químico, con aumentos de x100 y x500, el aumento de x500 se lo ha realizado tanto en el centro como en el borde del alambre.

Para la probeta sin trefilación: en el centro, se evidencia tamaños de grano grandes, sin ningún tipo de líneas de flujo con pequeñas imperfecciones ocasionadas por la presencia

de oxígeno. En el borde, se presentan granos más pequeños en relación al centro, no se presentan líneas de flujo, existen imperfecciones debido a la presencia de oxígeno.

En la probeta P1 T2.2: se presentan líneas de flujo, debido al proceso de trefilado. En el centro, los granos se encuentran alargados en la dirección de las líneas de flujo. En el borde, los granos se encuentran alargados en dirección del flujo, presentan tamaños más pequeños en comparación de los granos del centro, presentan límites de grano más notorios.


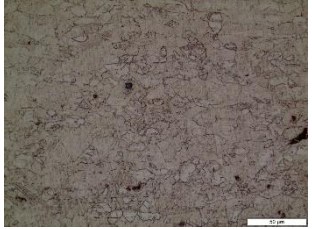
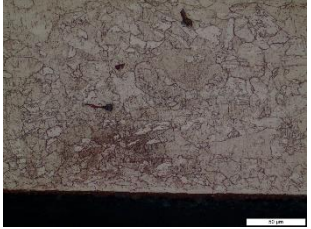

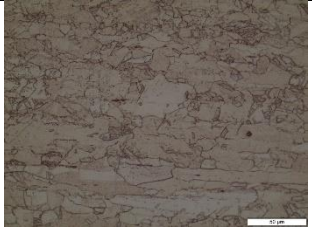
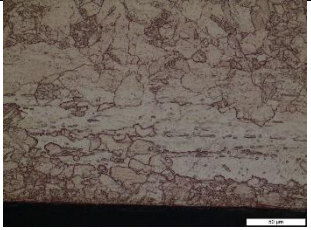
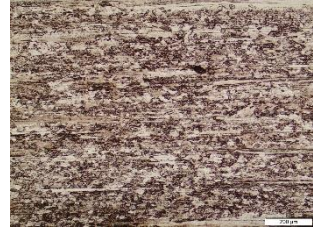
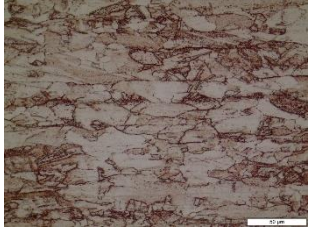
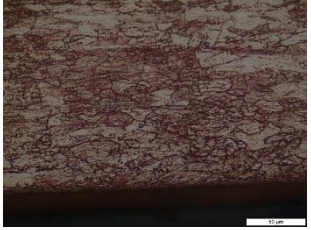

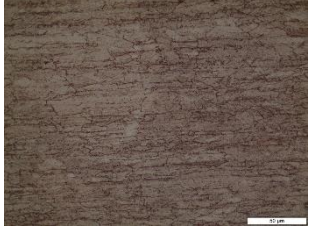
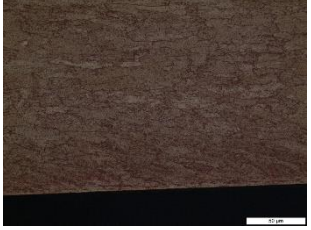


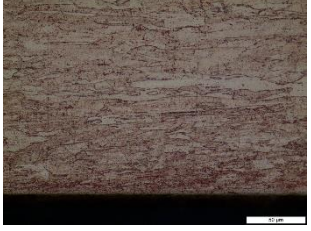

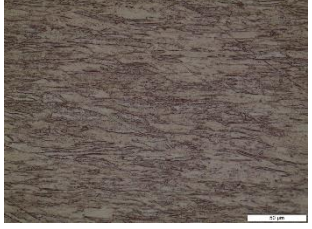
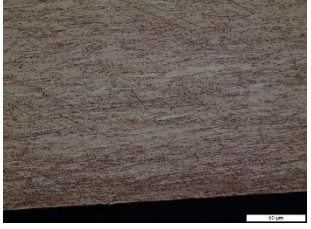
En la probeta P3 T2.0: las líneas de flujo son más evidentes debido al proceso de trefilado. En el centro, los granos se encuentran más alargados y sus límites de grano son más notorios. En el borde, los granos tienen formas más compactas y alargadas, los límites de grano tienen un grosor mayor.

En la probeta P5 T1.8: aparecen líneas de flujo marcadas en dirección de la deformación plástica ejercida por el proceso de trefilado. En el centro, los granos se encuentran más alargados que en las micrografías anteriores, los límites de grano tienen grosores de menos dimensión. En el borde, se presentan granos alargados, no es muy visible los límites de grano debido a la compactación de la deformación plástica.

En la probeta P7 T1.6: las líneas de flujo son más visibles, se presentan ciertas líneas ajenas al flujo del material debido al proceso de pulido. En el centro, los granos se encuentran más alargados y los límites de grano no son tan evidentes. En el borde, los granos están más alargados que en el centro, los límites de grano son visibles de mejor manera y presentan pequeños espesores.

En la probeta P9 T1.4: las líneas de flujo son aún mayores en dirección de la deformación plástica. En el centro, los granos están alargados en mayor proporción que en las anteriores micrografías en dirección de las líneas de flujo. Los granos son casi imperceptibles y se nota una gran cantidad de líneas de flujo.

Tabla 3.9 Microestructura con ataque químico, aumento x100 y x500

Probeta	Aumento		
	X100	X500	
		Centro	Borde
Sin Pasada			
P1 T2.2			
P3 T2.0			
P5 T1.8			
P7 T1.6			
P9 T1.4			

Las figuras agrandadas de las micrografías con Ataque Químico se puede observar el Anexo II

### **3.2 Análisis de Resultados**

Mediante el ensayo metalográfico basado en la norma ASTM E3 – 11, se logró observar las características importantes y sus variaciones en el proceso de trefilado en cada pasada, se observaron las líneas características, denominadas líneas de flujo, las cuales indican que el material ha sido sometido a un proceso de deformación plástica, el tener dos puntos de análisis los cuales fueron el centro y borde del alambre dieron resultados que si bien están en lo correcto con la teoría de la deformación plástica también indica que en los bordes se presenta una organización de los granos más compacta, esto debido a la fricción del alambre trefilado con el dado de trefilación. El análisis de la microestructura partiendo del material base sin ningún proceso de deformación indica que existen ciertas inclusiones ocasionadas netamente por la presencia de sustancias ajenas al cobre, la más importante es la presencia de oxígeno.

Los diámetros de la trefila en comparación con los diámetros de los alambres trefilados presentan cierto error de medida, si bien el alambre en casos presenta diámetros menores al diámetro de la trefila, se tomaron los mismos valores presentes en set de dado trefilador de tungsteno, esto debido a que no se cuenta con el equipo necesario para medir de manera más precisa el diámetro de cada agujero de trefilación.

Mediante el ensayo de micro dureza se logró determinar la dureza del alambre durante el proceso de trefilación, mediante la norma ASTM E384 – 17, se realizó el número de indentaciones en el alambre obteniendo dos valores que indican el comportamiento de la dureza frente a un proceso de deformación plástica como es el proceso de trefilado, se visualizó que la dureza en el centro del alambre es menor en comparación a la de los bordes, esto se puede explicar gracias al ensayo metalográfico donde se evidenció que los granos están más compactados en dirección de las líneas de flujo, y los límites de grano tienen un mayor espesor en comparación con los granos y límites de grano del centro.

Los parámetros de trefilado influyen de manera directa sobre el proceso, en este proyecto se tomaron en cuenta dos de los varios parámetros que existen, siendo estos el porcentaje de trabajo en frío o porcentaje de reducción de trefilado y el parámetro de no lubricación. Mediante el parámetro de trabajo en frío se lograron determinar propiedades como la resistencia a la tracción, límite elástico, dando como resultado que a mayor porcentaje de trabajo en frío estas propiedades aumentan es decir son directamente

proporcionales en la deformación plástica del cobre, además de una característica importante del trefilado que es la ductilidad indicando que a mayor porcentaje de trabajo en frío la ductilidad disminuye, provocando que el material adquiera mayor dureza sacrificando su ductilidad.

Utilizando los datos de dureza del otro componente de este proyecto el cuál para el proceso de trefilado utilizó dos tipos de lubricantes, se logra visualizar que existe una mayor dureza durante el proceso de trefilado en comparación con el proceso sin lubricación, esto debido a que el lubricante provee un mejor flujo del material disminuyendo la fricción del material, logrando así que la fricción no afecte de manera directa; el proceso de trefilado con el uso de lubricante en específico el aceite automotriz es el ideal para el análisis de este proyecto, ya que presenta una mayor dureza con respecto al número de pasadas, si bien al final del número de pasadas máxima presenta una disminución de la dureza esto es debido a la deformación plástica ya que el material ha sobrepasado su límite plástico y está a punto de fracturarse

### **3.3 Conclusiones**

Mediante la revisión bibliográfica del estado del arte se logró obtener resultados interesantes referente al análisis de los parámetros de trefilado en alambre para conducción eléctrica bajo condiciones de no lubricación como es el comportamiento de los granos después de cada reducción de diámetro y la variación de la dureza en zonas distintas del alambre.

Con el uso de la norma ASTM E3 – 11, se logró la obtención de la microestructura del alambre sin trefilar y del alambre con trefilado, obteniendo así distintas micrografías las cuales revelan la influencia del proceso de trefilado sin lubricación en el alambre para conducción eléctrica en sus distintas reducciones de diámetro.

Utilizando medidas nominales establecidas por el fabricante y diámetros de los alambres trefilados, se logró obtener una comparación entre los diámetros de trefila y el alambre en la cuál se evidencia cierto error en la estabilidad geométrica.

Utilizando la norma ASTM E384 – 17, se logró obtener la micro dureza en el alambre trefilado antes y después del proceso de trefilación, realizando micro indentaciones en el borde y centro del alambre se obtuvo la variación de la dureza en estas zonas analizadas.

Los objetivos para el desarrollo sostenible planteados por la ONU adaptados al proyecto brindan ciertos criterios que hace que el presente trabajo sea sostenible, cumpliendo criterios como el de la energía asequible y no contaminante ya que el proceso de trefilado

es un proceso netamente manual y la energía utilizada es por parte de mano de obra humana la cual no provoca ningún agente contaminante.

Con respecto al objetivo del trabajo decente y crecimiento económico, el proceso de trefilado fue realizado de manera que no se realizaron ningún tipo de acciones denigrantes, con ello la ejecución del proceso no tiene ningún inconveniente. Planteando el objetivo 9 donde se establece la construcción de infraestructura resiliente, el proyecto fue realizado en una zona totalmente controlada el cual es el Laboratorio de Conformado Mecánico, con los instrumentos y equipos necesarios.

La producción y consumo responsables vinculados al objetivo 12 de los ODS, el proceso de trefilado fue realizado con los elementos suficientes para su producción (trefilado) utilizando medidas acordes a normas de manera que la materia prima fue utilizada de manera controlada y consciente.

Las alianzas para lograr los objetivos planteados en el objetivo 17 de los ODS, en el proceso de trefilado y caracterización del material fue realizado en base a normas de estándares internacionales, los cuales promueven cierta normativa que regula el uso de recursos, la inversión de tiempo y energía dando una guía de la realización de procesos, estandarizando tiempo, resultados e insumos a utilizar. De esta manera el proceso de trefilado realizado en este proyecto cumple con los Objetivos para el Desarrollo Sostenible más acordes a la naturaleza del mismo, verificando que es sostenible en el tiempo.

### **3.4 Recomendaciones**

Se recomienda analizar el comportamiento del alambre trefilado después de someterlo a un tratamiento térmico y observar si valores de dureza o la microestructura cambia referente al tratamiento térmico.

La caracterización del material al presentar varios procesos como la espectroscopia de chispa hace que el material este en contacto directo a altas temperaturas para poder medir su composición química, por ello es recomienda utilizar un diámetro de alambre más grueso y como mínimo de 12 [mm] para poder realizar el proceso de la mejor manera y evitar crear matrices para un solo trabajo.

Para tomar probetas de material, optimizando el mismo, la máquina del laboratorio de Conformado Mecánico debe ser modificada, esto debido a que la distancia entre la trefila y el eje para enrollar el alambre es considerable y esto ocasiona el alargamiento forzoso del alambre para poder adjuntar al eje giratorio.

Para tener una mejor comparación metrológica referente a la medida de diámetros tanto de trefila como del dado de trefilación, la utilización de instrumentos calibrados e inclusive la realización de esta medida debería ser realizada por una entidad que acredite la trazabilidad de sus resultados como puede ser el INEN.

## 4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. Kalpakjian y S. Schmid, Manufacturing Engineering and Technology, Pearson, 2009.
- [2] W. Callister y D. Rethwisch, Materials Science and Engineering and Introduction, Wiley, 2014.
- [3] R. Loza Barillas, «Teoría sobre Trefilado,» [En línea]. Available: <https://www.antaac.org.mx/assets/03-teoria-sobre-trefilado.pdf>. [Último acceso: 10 Julio 2022].
- [4] Organización de las Naciones Unidas, «Objetivos de Desarrollo Sostenible,» 25 Septiembre 2015. [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>. [Último acceso: 12 Febrero 2023].
- [5] Organización de las Naciones Unidas, «Objetivo 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna,» 25 Septiembre 2015. [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>. [Último acceso: 12 Febrero 2023].
- [6] Organización de las Naciones Unidas, «Objetivo 8: Promover el crecimiento económico inclusivo y sostenible, el empleo y el trabajo decente para todos,» 25 Septiembre 2015. [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/economic-growth/>. [Último acceso: 12 Febrero 2023].
- [7] Organización de las Naciones Unidas, «Objetivo 9: Construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización sostenible y fomentar la innovación,» 25 Septiembre 2015. [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/infrastructure/>. [Último acceso: 12 Febrero 2023].
- [8] Organización de las Naciones Unidas, «Objetivo 12: Garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles,» 25 Septiembre 2015. [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-consumption-production/>. [Último acceso: 12 Febrero 2023].
- [9] Organización de las Naciones Unidas, «Objetivo 17: Revitalizar la Alianza Mundial para el Desarrollo Sostenible,» 25 Septiembre 2015. [En línea]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/globalpartnerships/>. [Último acceso: 12 Febrero 2023].

- [10] ASM International, Properties and Selection: Noferrous Alloys and Special-Purpose Materials, ASM International Handbook Committee, 1990.
- [11] R. Creese, Introduction to Manufacturing Processes and Materials, New York: Marcel Dekker, Inc, 1999.
- [12] ASTM International, «Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials,» ASTM International, 2016.
- [13] ASTM International, «Standard Practice for Microetching Metals and Alloys,» ASTM Int'l, 2015.

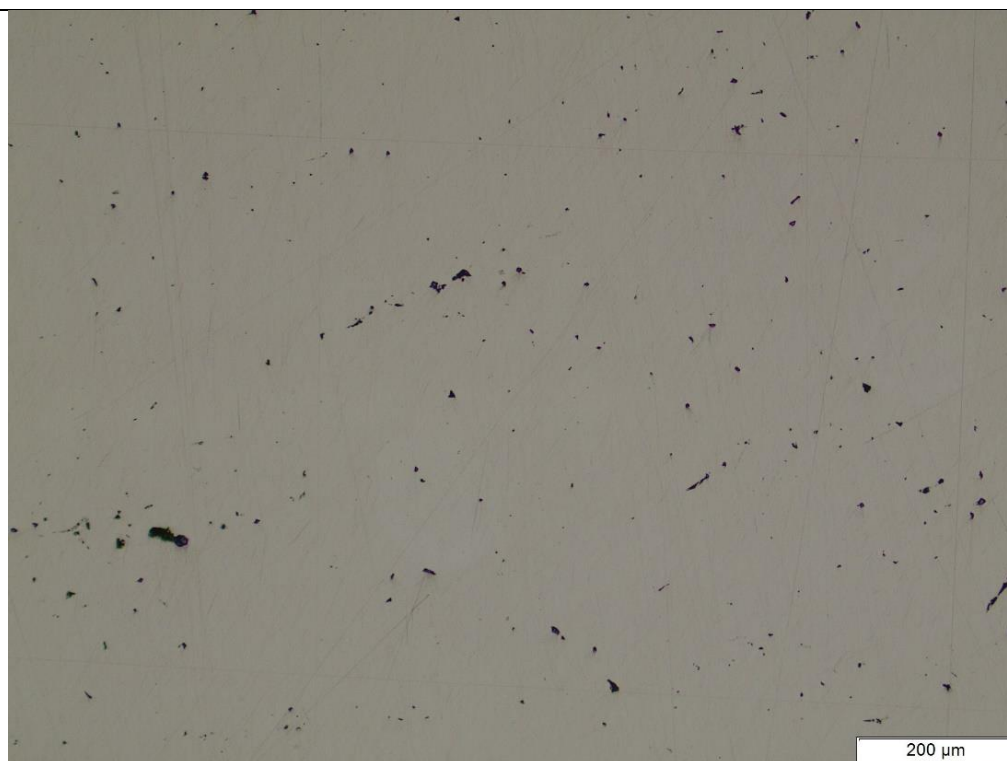


# **ANEXOS**

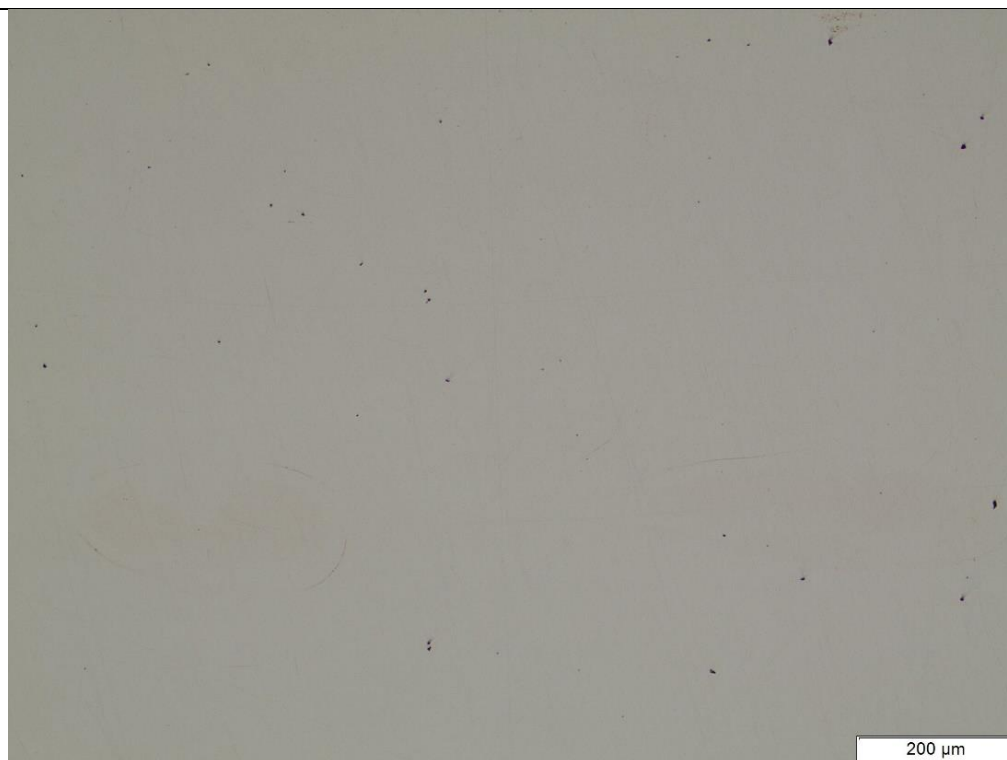
## Anexo I. Micrografías sin Ataque Químico

Micrografías de las distintas probetas sin ataque químico.

Probeta Sin Proceso de Trefilado – SP



Probeta P1 T2.2



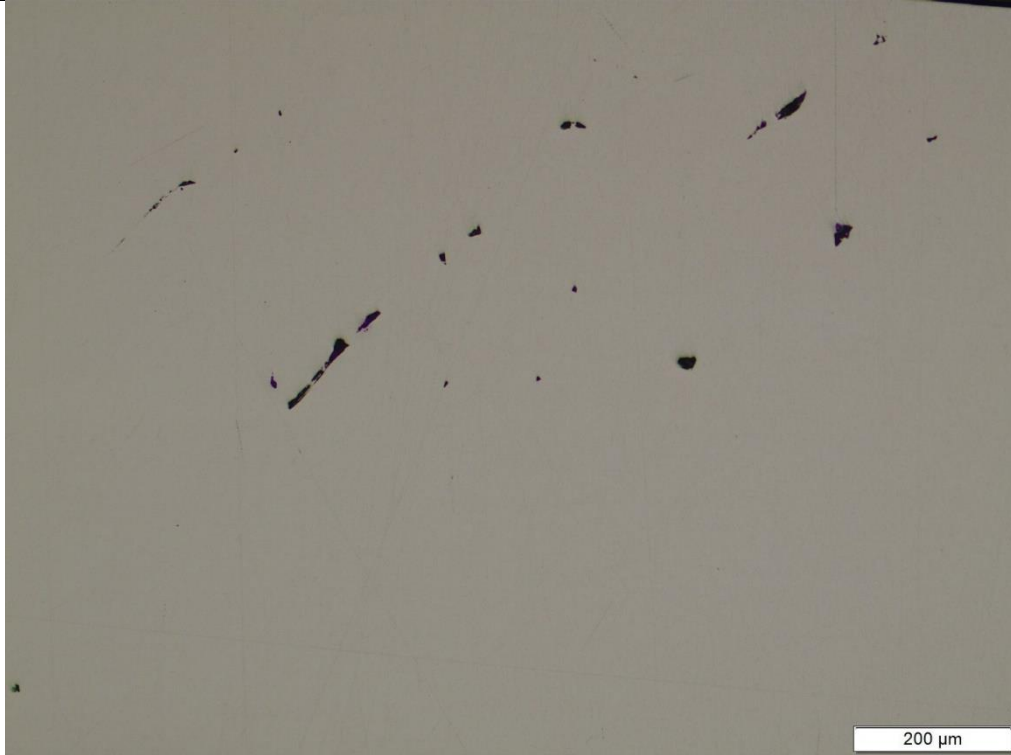
Probeta P3 T2.0



Probeta P5 T1.8



Probeta P7 T1.6



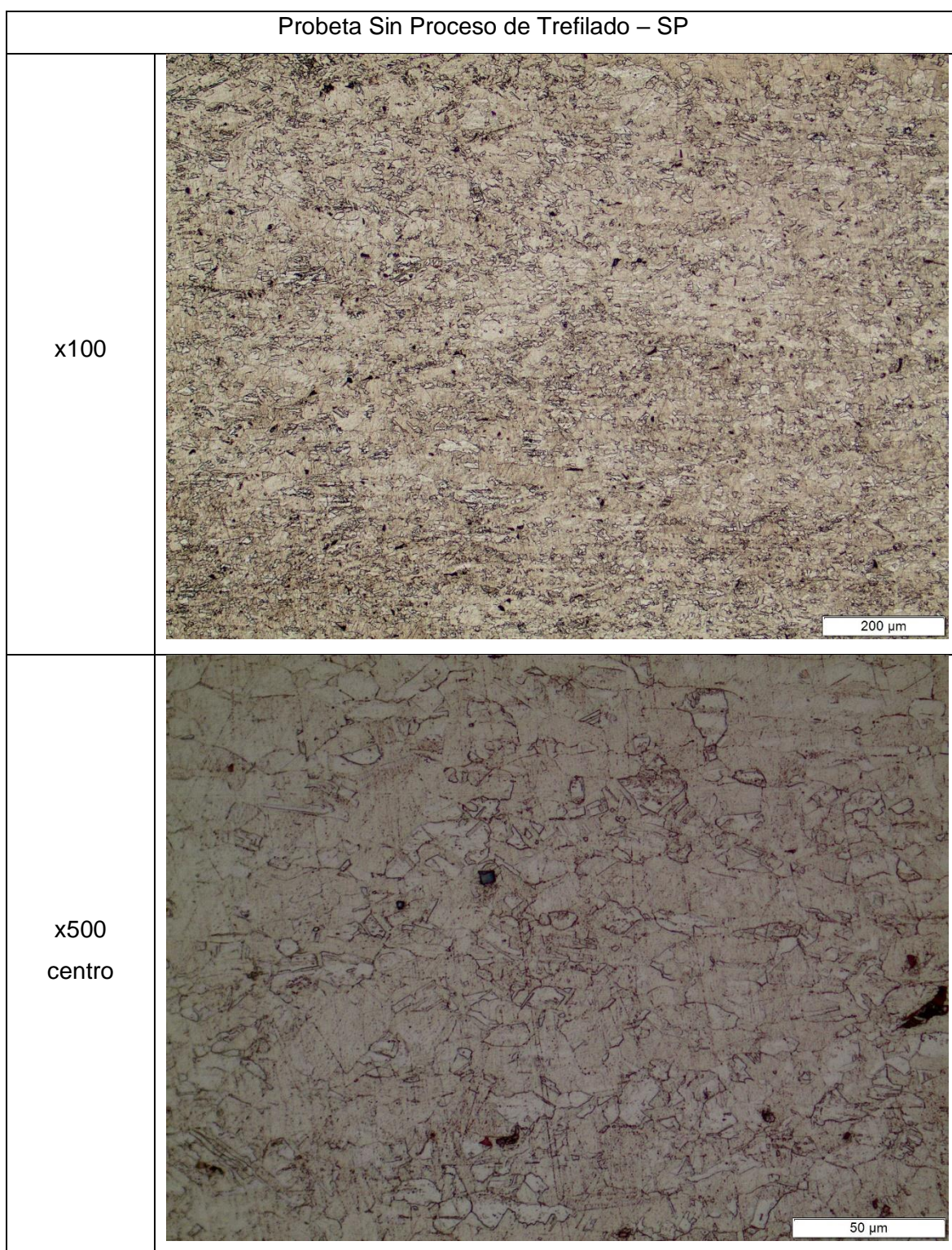
Probeta P9 T1.4



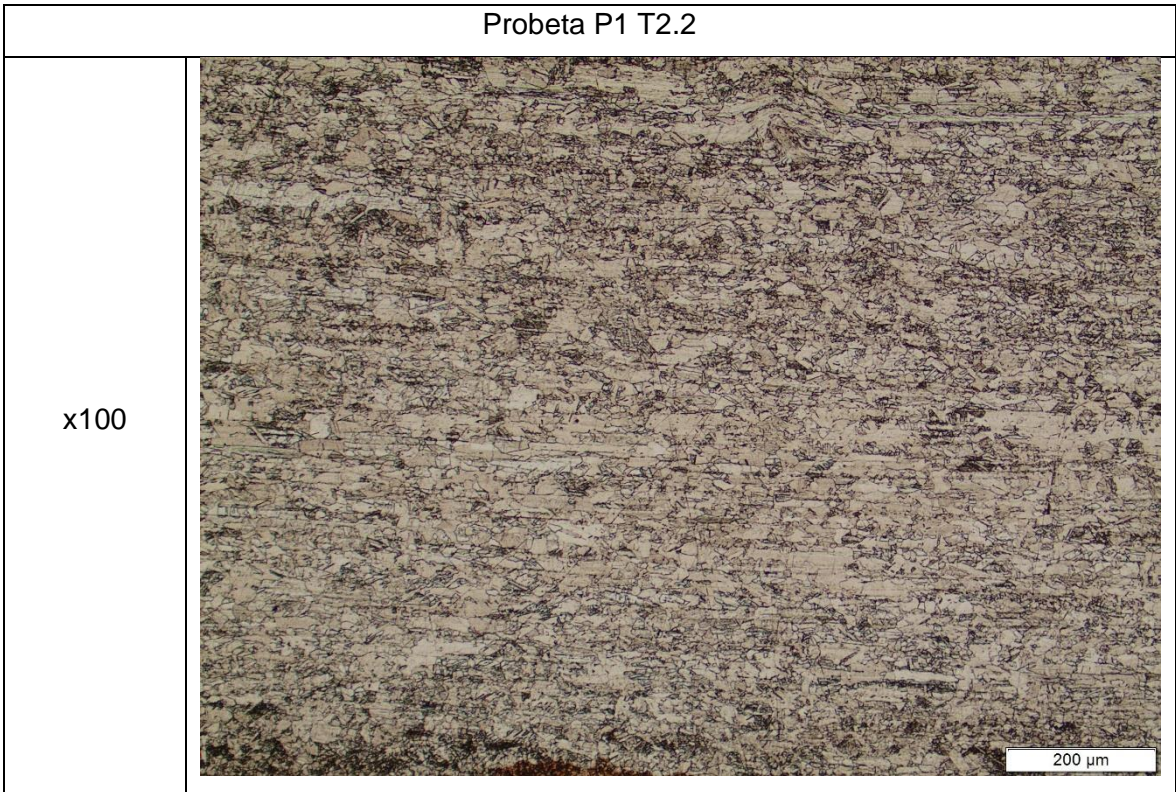
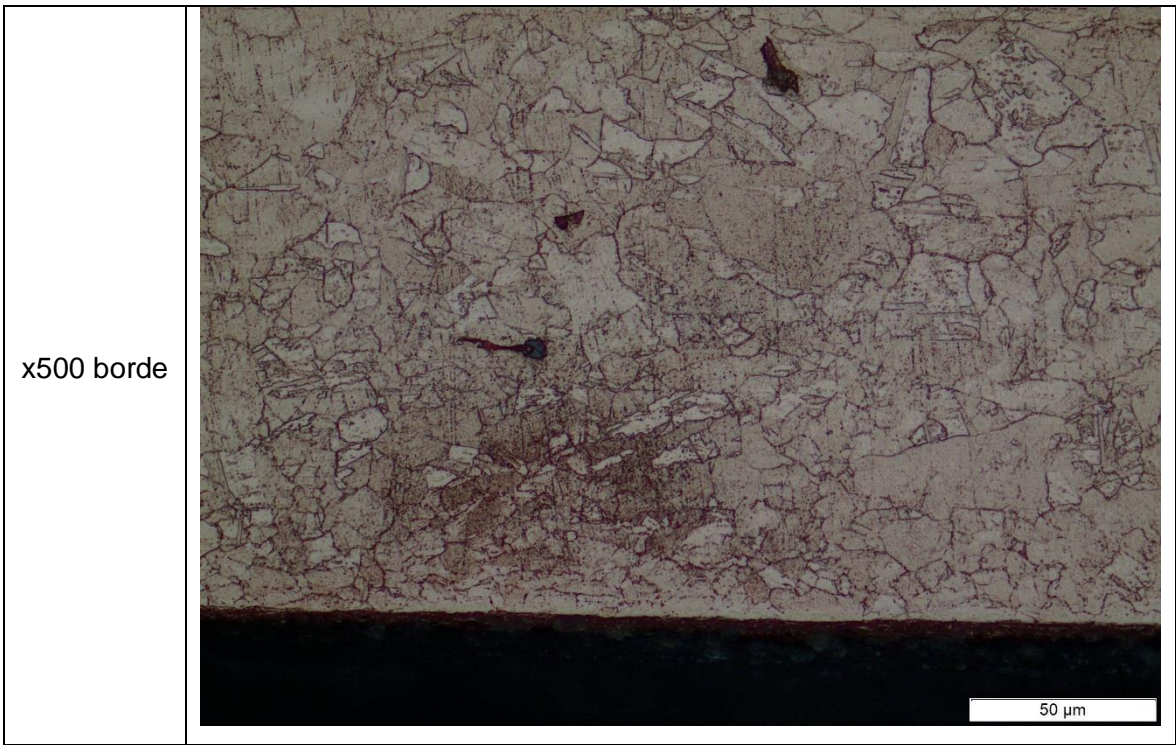


## Anexo II. Micrografías con Ataque Químico

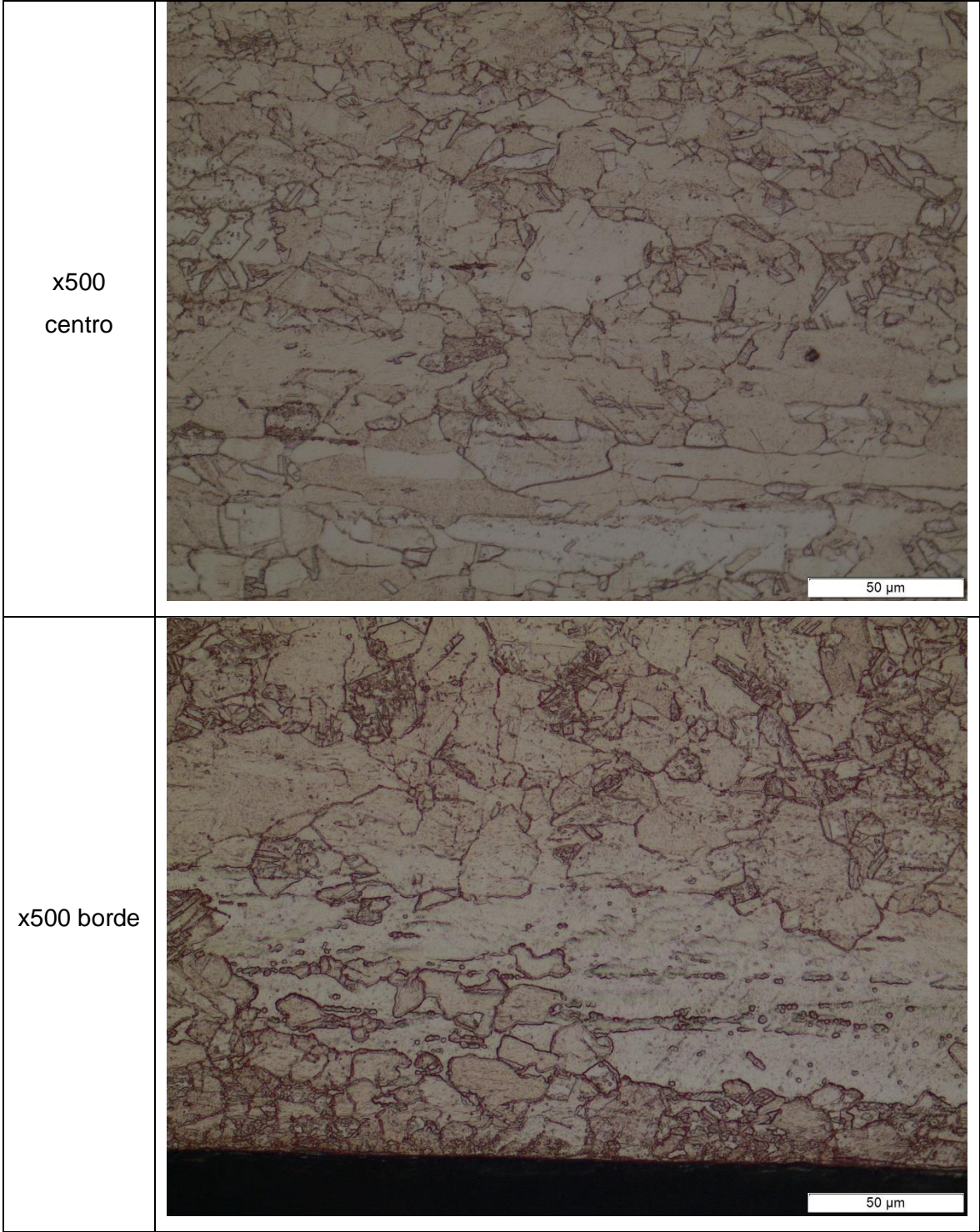
Micrografías de las distintas probetas con ataque químico.







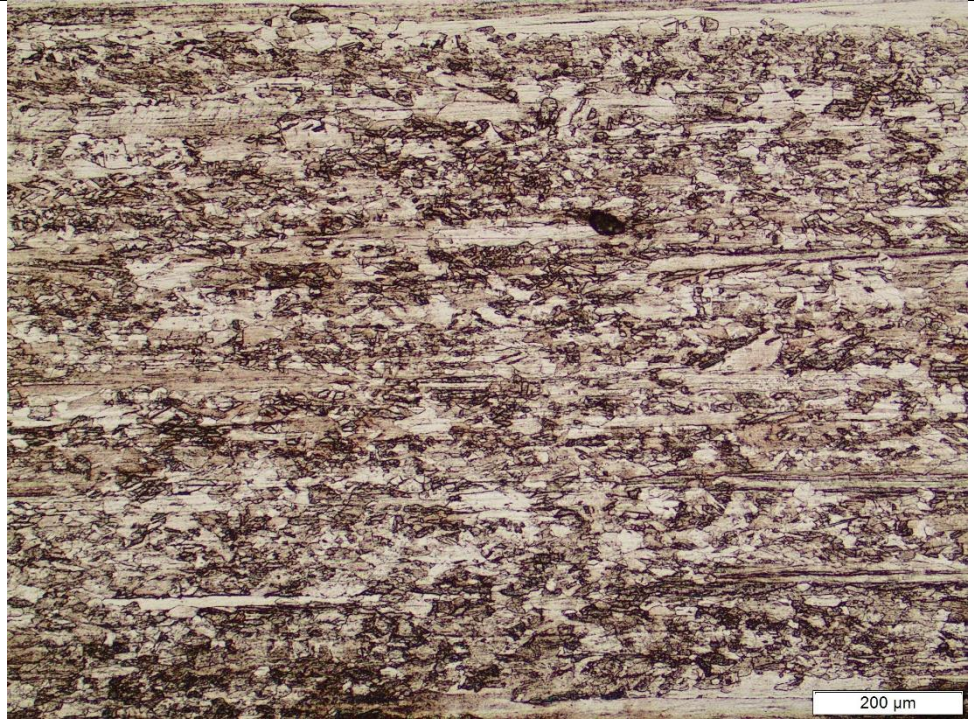




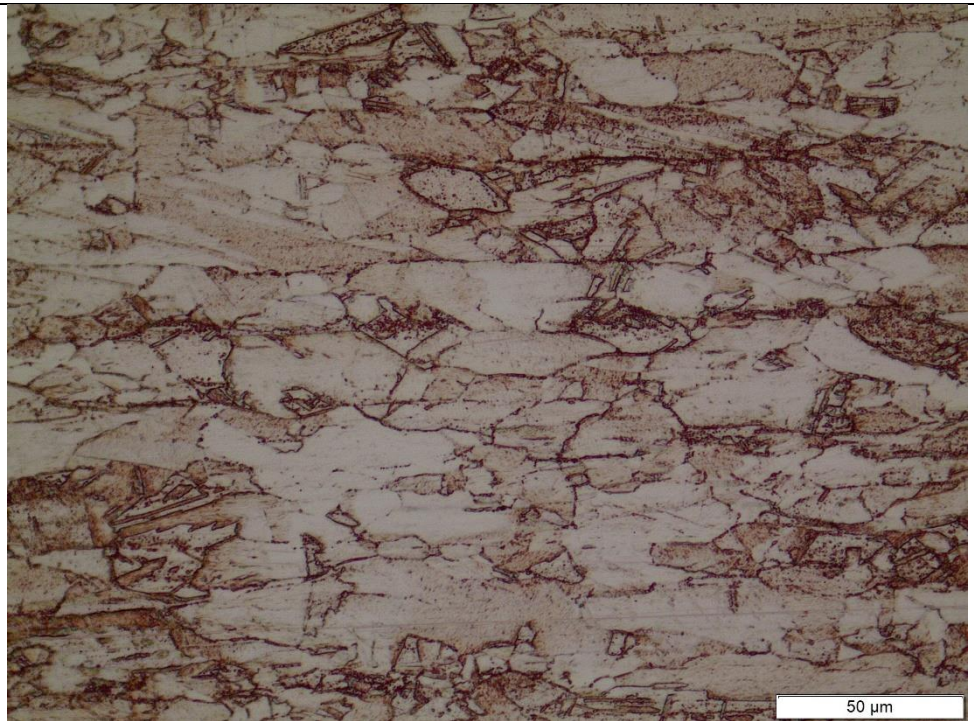


Probeta P3 T2.0

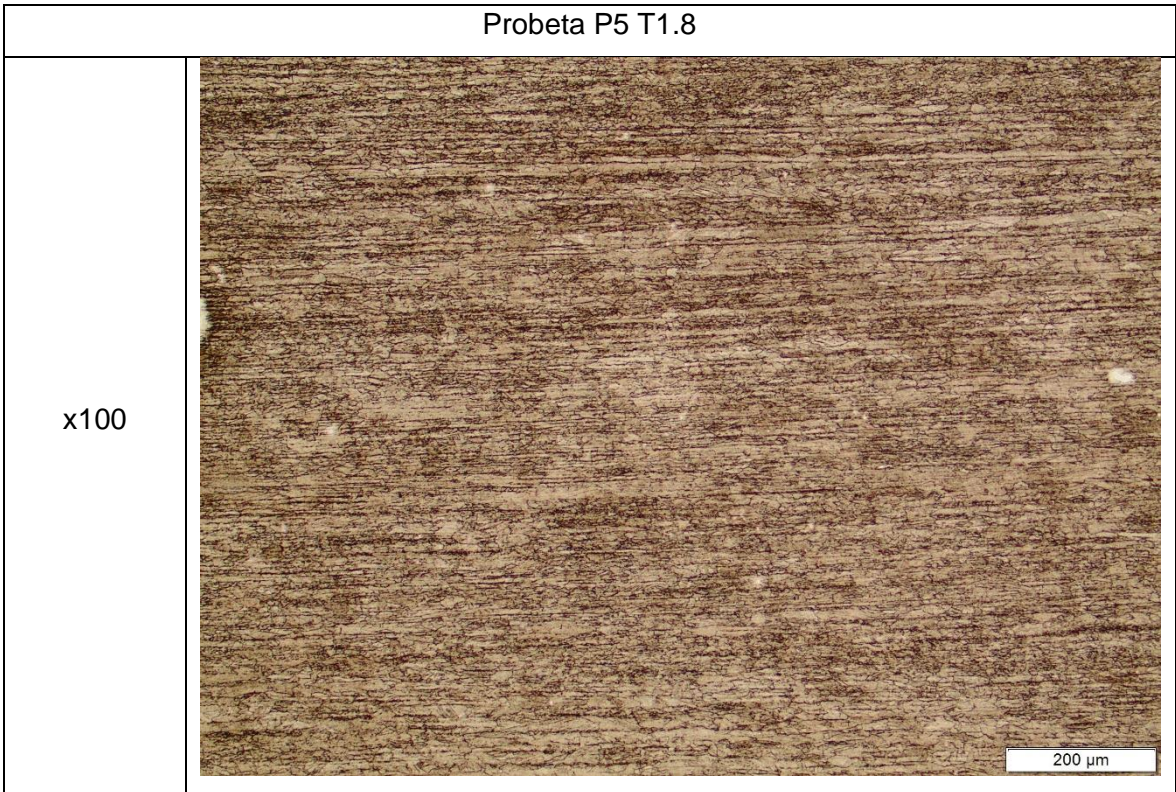
x100



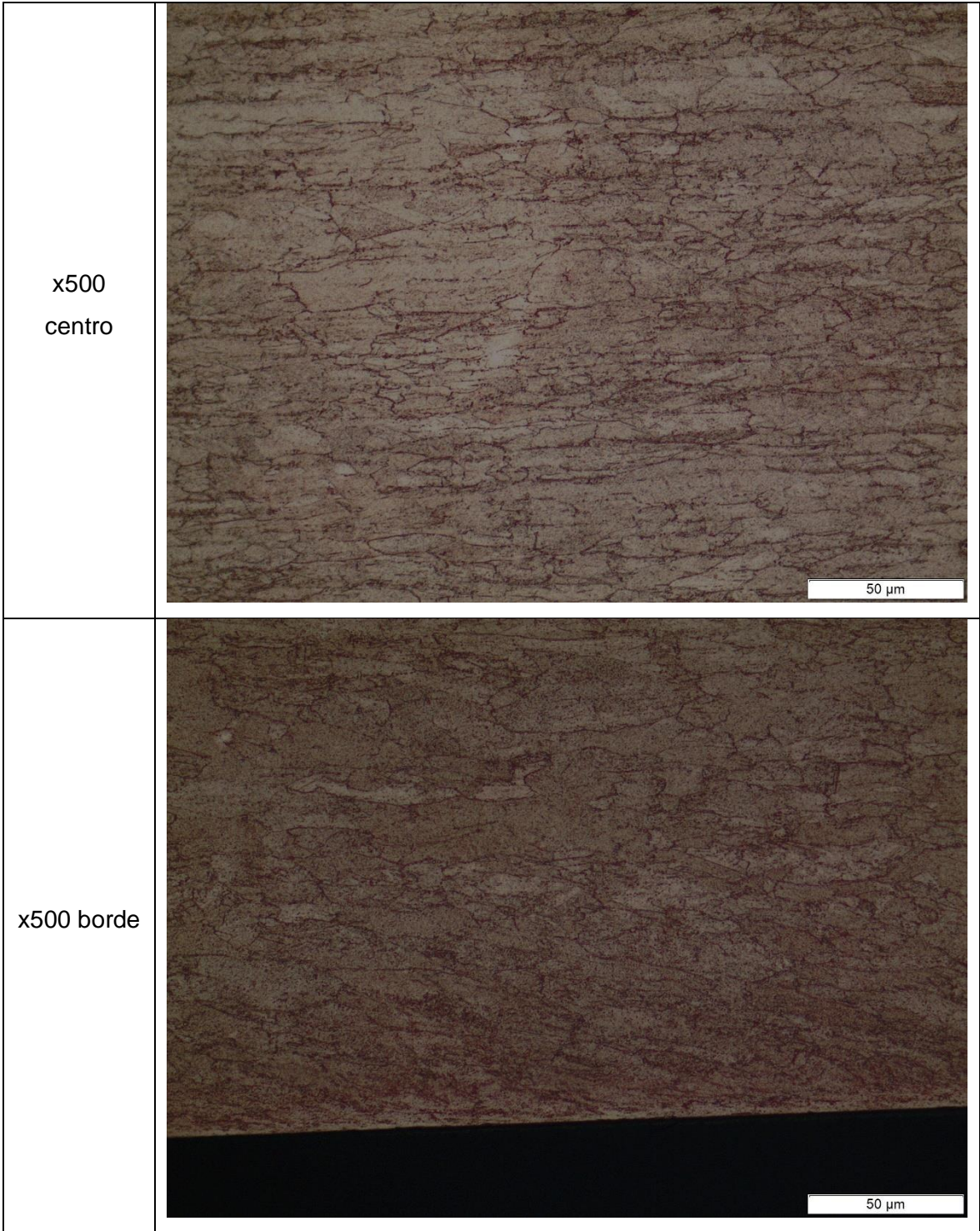
x500  
centro













Probeta P7 T1.6

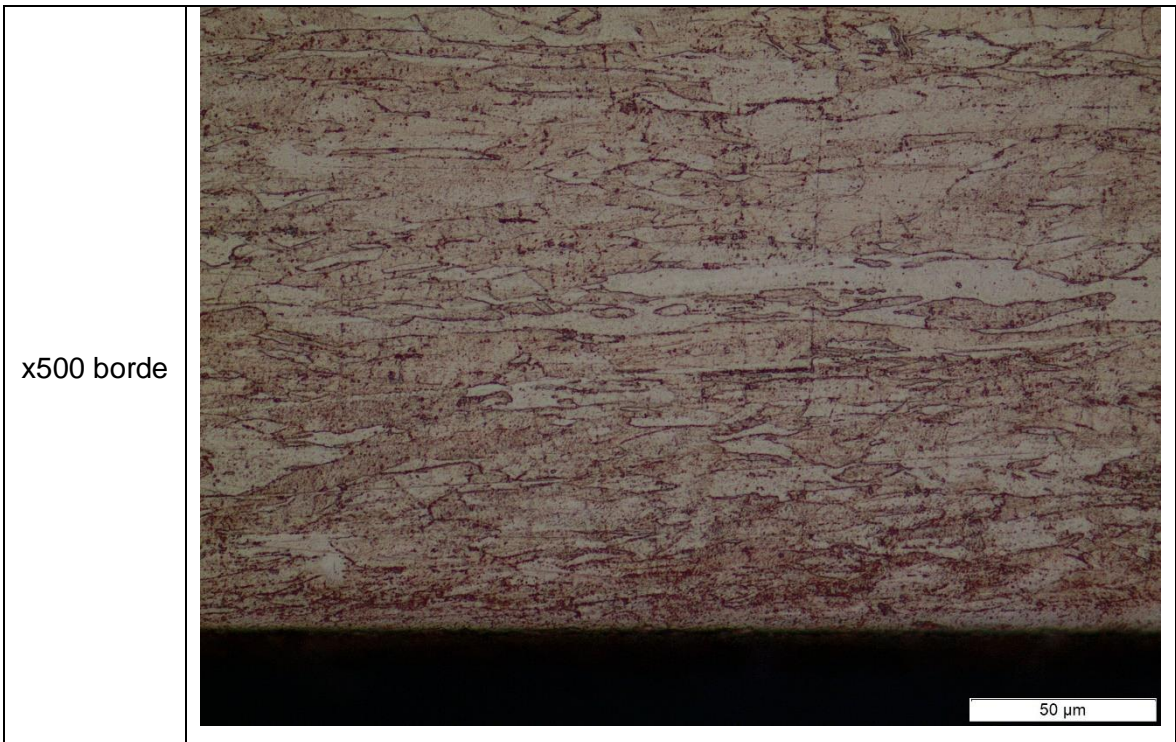
x100



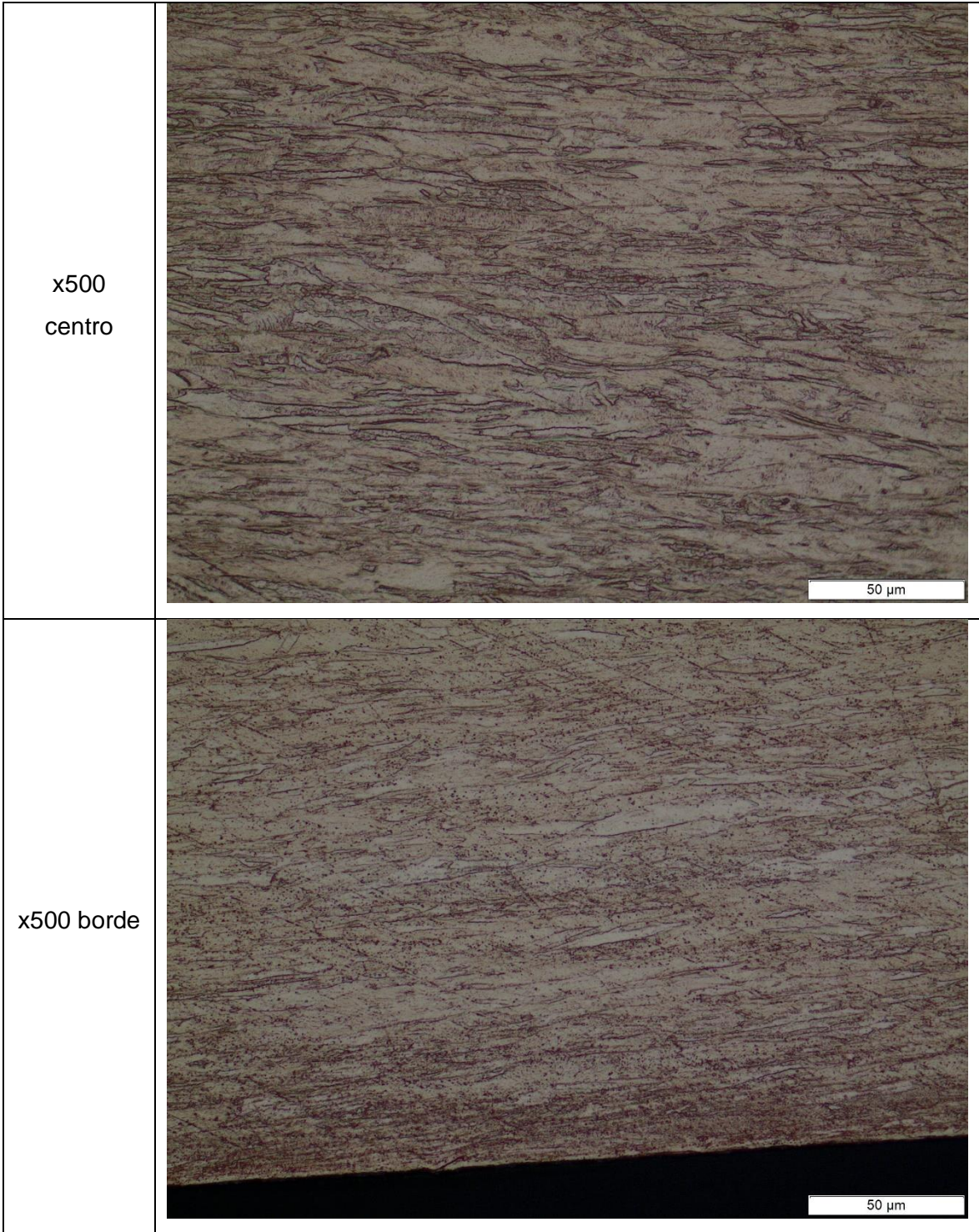
x500  
centro











## Anexo III. Resultado Espectrometría



### ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL DEPARTAMENTO DE METALURGIA EXTRACTIVA



#### Resultados de análisis por Espectrometría de Chispa

**Solicitante** : Sres. Víctor Tacan / Martín 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
Niquel (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



## Anexo IV. Resultado Micro dureza y Microestructura

	ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF)	Revisión: 000	
		Fecha: 22/09/2019	
		Página: Pág. 1 de 3	
	INFORME DE RESULTADOS N° OTI0019-23		
		RT-LMDF-0701	

### INFORME DE RESULTADOS N° OTI0019-23

#### 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





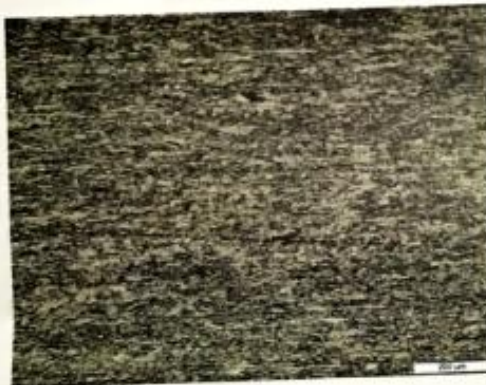


	<b>ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL</b> Laboratorio de Metalografía Desgaste y Falla (LMDF)	Revisión: 000	
		Fecha: 22/09/2019	
		Página: Pág. 3 de 3	
<b>INFORME DE RESULTADOS</b>		<b>RT-LMDF-0701</b>	
N° 0T10019-23			

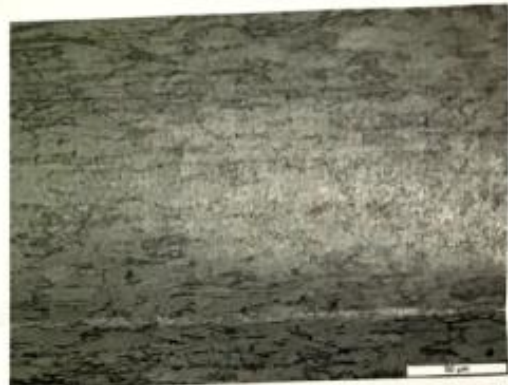
#### 4. RESULTADO METALOGRAFICO

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:

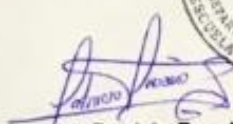
Informe

Elaborado por:



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

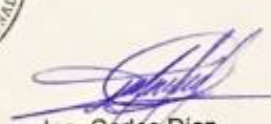
Revisado por:



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



Aprobado por:



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