

# E.T.S. de Ingeniería Industrial, Informática y de Telecomunicación

Caracterización y mejora del proceso de trefilado y tratamiento térmico de nuevas aleaciones de Aluminio para la fabricación de conductores eléctricos de líneas aéreas de alta tensión.



Grado en Ingeniería Mecánica

Trabajo Fin de Grado

Javier Sanz Sanz

Lucas Álvarez Vega

Pamplona, Junio 2018



## DEDICATORIA

Este proyecto se lo dedico en especial a toda mi familia, a mis padres y a mi pareja Andrea, por toda la confianza y ánimos que han depositado en mí, ya que sin ese apoyo no hubiese llegado hasta aquí.

También se lo dedico a todas las personas que han hecho de mi estancia en Cabelte Incasa una experiencia llena de conocimientos nuevos y buenos momentos, en especial a mi tutor en la empresa ,David, quién desde el primer momento me trató como uno más y me ayudó en todo lo que pudo.

Además de mi tutor académico por aceptar mi propuesta de proyecto y de todos mis amigos con quienes codo a codo hemos sacado la carrera adelante.



## RESUMEN

En el presente proyecto se realiza un estudio sobre la mejora del proceso productivo de conductores de alta tensión en la empresa CABELTE INCASA debido a la utilización de nuevas aleaciones de Aluminio en sus productos.

Estas nuevas Aleaciones dan problemas a la hora de trefilar, como por ejemplo numerosas roturas del hilo en el proceso de trefilado o que no se optimicen correctamente sus características después de pasar el tratamiento térmico en el horno.

En el proyecto, se analizan los efectos de estas nuevas materias primas en las fases productivas de trefilado del alambón y su posterior tratamiento térmico para conseguir las características y resultados deseados.

Mediante los ensayos requeridos en la normativa aplicable, por ejemplo (carga rotura, resistividad y conductividad, enrollamiento) así como otras pruebas adicionales que se han considerado como ensayos metalográficos de la materia prima, se valoran los resultados obtenidos para establecer las conclusiones.

## ABSTRACT

In the present project a study is made about improvement of the productive process of high voltage conductors in the company CABELTE INCASA due to the use of new aluminum alloys in their products.

These new alloys give problems when drawing, as for example numerous breakages of the wire in the drawing process or that its characteristics are not correctly optimized after passing the heat treatment in the furnace.

In the project, the effects of these new raw materials are analyzed in the production phases of wire rod drawing and its subsequent thermal treatment to achieve the desired characteristics and results.

Through the tests required in the applicable regulations, for example (break load, resistivity and conductivity, winding) as well as other additional tests that have been considered as metallographic tests of the raw material, the results obtained to establish the conclusions are valued.



## PALABRAS CLAVE

- Trefilado
- Hilera
- Copa y cono
- Chevron
- Aluminio
- Aleación de Aluminio
- Cristalización
- Tratamiento térmico
- Cara de rotura
- Conductividad
- Parámetro Delta  $\Delta$
- Ensayo metalográfico





## INDICE

### I MEMORIA

I MEMORIA .....	8
INDICE FIGURAS .....	10
ÍNDICE DE TABLAS .....	12
1 INTRODUCCIÓN .....	16
1.1 Marco del trabajo .....	16
1.2 Antecedentes .....	16
2 OBJETIVOS .....	17
2.1 Objetivos del proyecto .....	17
2.2 Problemática actual.....	17
2.3 Objeto de estudio .....	18
3 NORMATIVA APLICABLE .....	19
4 MATERIA PRIMA.....	20
4.1 Aluminio .....	20
4.2 Aleaciones de aluminio.....	22
4.2.1 Aleaciones de Aluminio forjado sin tratamiento térmico .....	23
4.2.2 Aleaciones de Aluminio forjado con tratamiento térmico.....	24
4.3 Tratamientos térmicos de las aleaciones .....	26
4.4 Aleación de aluminio: ALMELEC .....	27
4.5 Alambrón.....	29
5 PROCESO PRODUCTIVO.....	30
5.1 Actividad del establecimiento industrial .....	30
5.2 Diagrama de flujo .....	31
6 ESTUDIO DEL TIPO ROTURAS.....	32
6.1 Roturas debidas a imperfecciones de la materia prima .....	32
6.1.1 Rotura con fisura en el alambre.....	32
6.1.2 Roturas con corte a 45° .....	34
6.1.3 Roturas por escamas.....	36
6.2 Roturas debidas al proceso de trefilado .....	37
6.2.1 Roturas debidas a ralladuras excesivas del alambre.....	37
6.2.2 Roturas por cristalización interna del alambre .....	38
6.2.3 Roturas en forma de copa y cono .....	40

7	TREFILADO .....	43
7.1	Concepto de trefilado.....	43
7.2	Trefiladoras.....	44
7.3	Lubricante .....	50
7.4	Hileras .....	51
7.4.1	Reducción de sección .....	54
7.4.2	Alargamiento .....	54
7.5	Parámetros que influyen en el trefilado .....	55
7.5.1	Ángulo de trabajo muy grande.....	55
7.5.2	Ángulo de trabajo muy pequeño.....	56
7.5.3	Parámetro Delta ( $\Delta$ ).....	57
7.5.4	Trabajo redundante ( $\Phi$ ).....	59
7.5.5	Desgaste de la hilera ( $P/\sigma$ ).....	60
7.5.6	Reglas para un buen diseño de la hilera.....	61
7.5.7	Criterio para evitar el agrietamiento central.....	62
8	DISEÑO DE LAS NUEVAS HILERAS .....	63
9	TRATAMIENTO TÉRMICO .....	77
10	ENSAYOS Y MEDICIONES.....	79
10.1	Índice de roturas .....	79
10.2	Ensayo metalográfico.....	80
10.2.1	Ensayo macrográfico .....	80
10.2.1	Ensayo metalográfico .....	85
10.3	Ensayo Laboratorio.....	87
11	CONCLUSIONES.....	100
12	BIBLIOGRAFÍA.....	101

## ANEXOS

### II PLANOS

- Planos primer diseño juego hileras
- Planos diseño final juego hileras

## INDICE FIGURAS

Imagen 1: Rollo de Alambión.....	29
Imagen 2: Rotura fisura en alambre.....	32
Imagen 3: Rotura fisura en alambre, Cabelte Incasa.....	33
Imagen 4: Rotura corte 45°.....	34
Imagen 5: Desgarro alambre y anillo desgaste hilera.....	34
Imagen 6: Desgarro superficial, Cabelte Incasa.....	35
Imagen 7: Anillo de desgaste, Cabelte Incasa.....	35
Imagen 8: Rotura por escama, Cabelte Incasa.....	36
Imagen 9: Ralladura superficie alambre.....	37
Imagen 10: Ralladura superficie alambre, Cabelte Incasa.....	37
Imagen 11: Rotura por cristalización, Cabelte Incasa.....	38
Imagen 12: Rotura cristalización, doblado Cabelte Incasa.....	39
Imagen 13: Prueba doblado correcto, Cabelte Incasa.....	39
Imagen 14: Rotura copa y cono.....	40
Imagen 15: Rotura copa y cono, Cabelte Incasa.....	40
Imagen 16: Flujo discontinuo.....	41
Imagen 17: Estallido central.....	41
Imagen 18: Roturas copa y cono, Cabelte Incasa.....	42
Imagen 19: Niehoff M 85.....	44
Imagen 20: Niehoff MSM 85.....	44
Imagen 21: Disposición elementos internos trefiladora.....	45
Imagen 22: Cabrestante y Bailarino.....	45
Imagen 23: Bobinador.....	46
Imagen 24: Carretes finales.....	46
Imagen 25: Pantalla de datos trefiladora.....	47
Imagen 26: Hilera.....	51
Imagen 27: Perfil Longitudinal hilera.....	52
Imagen 28: Zonas hilera.....	53
Imagen 29: Reducción de sección.....	54
Imagen 30: Alargamiento.....	54
Imagen 31: Ángulo trabajo muy grande.....	55
Imagen 32: Angulo de trabajo muy pequeño.....	56

Imagen 33: Criterio agrietamiento central .....	62
Imagen 34: Cotas internas hilera.....	64
Imagen 35: Situación agrietamiento central antes.....	65
Imagen 36: Situación agrietamiento central después .....	67
Imagen 37: Primer juego diseño de hileras .....	68
Imagen 38: Pantalla Par motor 02/03/18 vs 27/03/2018 .....	69
Imagen 39: Consumos Par motor.....	70
Imagen 40: Segundo juego diseño hileras.....	72
Imagen 41: Horno Berco industrial.....	78
Imagen 42: Muestra fractura Cemitec .....	80
Imagen 43: Muestra fractura Cemitec .....	81
Imagen 44: Copa y cono Cemitec .....	81
Imagen 45: Copa Cemitec .....	82
Imagen 46: Cono Cemitec .....	82
Imagen 47: M.E.B 200 um .....	83
Imagen 48: M.E.B 100 um .....	83
Imagen 49: M.E.B 10 um .....	84
Imagen 50: M.E.B zona leñosa .....	84
Imagen 51: Probetas .....	85
Imagen 52: Copa y cono seccionado.....	85
Imagen 53: Muestras seccionadas.....	86
Imagen 54: Estufas y muestras .....	87
Imagen 55: Enderezador de rodillos .....	88
Imagen 56: Resistomat .....	88
Imagen 57: Máquina de tracción .....	89
Imagen 58: Resultados Carga 140°C .....	90
Imagen 59: Resultados Carga 150°C .....	91
Imagen 60: Resultados Carga 160°C .....	92
Imagen 61: Resultados Carga 170°C .....	93
Imagen 62: Resultados Carga 180°C .....	94
Imagen 63: Gráficas Ø 2,32 mm.....	96
Imagen 64: Gráficas Ø 3,03 mm.....	97
Imagen 65: Gráficas Ø 3,20 mm.....	98

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Propiedades Aluminio Puro .....	20
Tabla 2: Aleantes Del Aluminio.....	22
Tabla 3: Composición aleaciones.....	25
Tabla 4: Reducciones M85 Aluminio .....	48
Tabla 5: Reducciones M85 Aleación .....	48
Tabla 6: Reducciones MSM85 Aluminio .....	49
Tabla 7: Reducciones MSM85 Aleación .....	49
Tabla 8: Lubricante FUCHS .....	50
Tabla 9: Calculo juego hilera tradicional .....	63
Tabla 10: Primer diseño hileras .....	66
Tabla 11: Consumos Par motor .....	70
Tabla 12: Diseño final ángulo 12°.....	74
Tabla 13: Diseño final ángulo 14°.....	74
Tabla 14: Diseño final ángulo 16°.....	75
Tabla 15: Tabla orientativa .....	75
Tabla 16: Norma UNE-EN 50183.....	77
Tabla 17: Norma ASTM B398 6201 .....	78
Tabla 18: Índice de roturas.....	79
Tabla 19: Carga Ø 2,32mm .....	96
Tabla 20: Conductividad Ø 2,32mm.....	96
Tabla 21: Carga Ø 3,03mm .....	97
Tabla 22: Conductividad Ø 3,03 mm .....	97
Tabla 23: Carga Ø 3,20 mm .....	98
Tabla 24: Conductividad Ø 3,20 mm .....	98
Tabla 25: Resultados horno .....	99



# I MEMORIA





# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Marco del trabajo

El presente Trabajo de Fin de Grado (TFG) ha sido realizado por Javier Sanz Sanz, alumno de Ingeniería Mecánica en la Universidad Pública de Navarra, con el fin de obtener el título académico.

El proyecto ha sido realizado en la empresa Cabelte Incasa, Industria Navarra de Cables S.A.U, ubicada en el Polígono Industrial de Egüés, durante el periodo de tiempo comprendido entre el 5 de Febrero de 2018 y el 15 de Junio de 2018.

Esto ha sido posible gracias al convenio realizado entre la Universidad Pública de Navarra y Cabelte Incasa para la realización de prácticas curriculares durante el semestre académico.

## 1.2 Antecedentes

La empresa Cabelte Incasa, Industria Navarra de Cables S.A.U fue fundada en 1994 por un grupo de empresas y accionistas españoles, relacionados con el suministro de material eléctrico a las principales compañías eléctricas, con el fin de continuar la actividad industrial de la División de Cables de Inasa-Reynolds, que fue fundada en 1957 y desarrollaba su actividad en Irurtzun (Navarra).

Desde abril de 1999, Cabelte Incasa perteneciente al grupo Cabelte, de capital portugués, y se encarga de suministrar cables eléctricos de bajo, medio y alto voltaje para las principales empresas eléctricas del mercado ibérico.

En los últimos años los segmentos más importantes han sido las Redes de Transporte de Energía y Distribución en alta, media y baja tensión.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivos del proyecto

Los objetivos de este proyecto van a ser principalmente realizar un estudio en profundidad del proceso de trefilado de aleaciones de Aluminio y sus correspondientes tratamientos térmicos para solventar los problemas actuales e intentar mejorar el proceso lo mejor posible.

### 2.2 Problemática actual

El problema que se estaba dando era que, debido a estas materias primas nuevas, que son Aleaciones de Aluminio que vienen con una carga muy superior (a lo que se trefilaba hasta el momento), se daban numerosos problemas en el proceso de trefilado que se achacaban a la materia prima en su totalidad.

Estos problemas en el proceso de trefilar el alambión, se dan en forma de roturas del hilo, mayormente en el interior de la máquina mientras está en marcha y se producen de una forma característica, en forma de **copa y cono**.

Esto implica parar la máquina y abrirla para identificar en que zona se ha producido la rotura, a partir de la zona de rotura se procede a enhebrar la máquina de nuevo, soldar el hilo y volver a poner en marcha la máquina.

Este proceso de enhebrado es muy laborioso, cuando la máquina se enhebra desde la primera hilera hasta la de salida (se explica más adelante el concepto de hileras y trefilado) puede costar entre 1 hora y media y 2 horas en condiciones normales, lo que pasaba muchas veces era que en el mismo proceso de enhebrado desde cero o debido a una rotura, a la hora de ir pasando el hilo por las sucesivas hileras rompía por **copa y cono** en hileras anteriores lo que hacía volver a retroceder y volver a enhebrar.

El problema aparte de las roturas en la trefiladora era que, aunque al haber pasado por el posterior tratamiento térmico a veces no se conseguía las propiedades deseadas y podía romper en procesos posteriores como por ejemplo en la cableadora o lo que es peor, cuando se va a realizar el tendido del cable completo.

Todo este proceso de roturas (por unas causas desconocidas hasta el momento) y enhebrado consume una cantidad de tiempo y esfuerzo por parte de los operarios muy grande. Además, otra trefiladora de la planta tiene que parar para que ese operario venga a ayudar al compañero de la trefiladora con rotura o que va a enhebrarse por un cambio de orden.

Al achacar el problema de la rotura tipo **copa y cono** directamente al material, se rechazaron **30 Toneladas** entre Enero y principios de Febrero de materia prima que se apartaron y se guardaron en el almacén puesto que en algunos casos no se llegó ni a poder enhebrar la máquina con ellos.

Por lo tanto, además de la desmotivación que se estaba creando en los operarios, el desgaste de las hileras, la pérdida de producción que incrementaba los tiempos de fabricación reduciendo la productividad, y toda la materia prima que se estaba rechazando, se estaba creando un **cuello de botella** en el proceso de trefilado puesto que las fases siguientes de producción como son el tratamiento térmico, el cableado y extrusión que tienen como primera fase el trefilado. Esta situación era crítica, llegando a tener retrasos importantes en plazos de entrega de productos que usan esta materia prima.

## 2.3 Objeto de estudio

Ante la problemática que se ha mencionado, se procede a realizar un estudio en profundidad de la materia prima, de las causas de las roturas, el proceso de trefilado y el posterior tratamiento térmico.

De esta manera se pondrá en conocimiento el origen de los problemas y se intentará corregirlo de la mejor manera posible para optimizar el proceso.

### **3 NORMATIVA APLICABLE**

La normativa que afecta a este proyecto y que se ha tenido en cuenta para elaborar esta memoria es la siguiente:

- **UNE-EN ISO 9000:2015** - Sistemas de gestión de la calidad. Fundamentos y vocabulario.
- **UNE-EN ISO 9001:2015** - Sistemas de gestión de la calidad. Requisitos.
- **UNE-EN ISO 14001:2015** - Sistemas de gestión ambiental. Requisitos con orientación para su uso.
- **UNE-EN 50182** - Conductores para líneas eléctricas aéreas. Conductores de alambres redondos cableados en capas concéntricas.
- **UNE-EN 50183** - Conductores para líneas eléctricas aéreas. Alambres en aleación de aluminio-magnesio-silicio.
- **UNE-EN 573-3** - Aluminio y aleaciones de aluminio. Composición química y forma de los productos de forja. Parte 3: Composición química y forma de los productos.
- **UNE-EN 1715-1** - Aluminio y aleaciones de aluminio. Alambrón. Parte 1: Requisitos generales y condiciones técnicas para la inspección y suministro.
- **ASTM B398** - Standard Specification for Aluminum-Alloy 6201-T81 Wire for Electrical Purposes.

## 4 MATERIA PRIMA

### 4.1 Aluminio

El aluminio es un metal no ferromagnético, cuyo símbolo químico es “Al” y su número atómico es 13. Debido a su gran abundancia, ya que es el tercer elemento más común encontrado en la superficie de la Tierra, y a sus propiedades que se exponen a continuación, hacen del Aluminio el segundo metal más usado en el mundo desde mediados del siglo XX, después del acero.

PROPIEDADES ALUMINIO PURO (RIQUEZA DEL 99,5%)	
Estructura Cristalina	FCC (cúbica centrada en caras)
Densidad (20°C)	2698,4 kg/m <sup>3</sup>
Punto Fusión	933,47 K (660°C)
Calor Específico	900 J/k*kg
Conductividad Eléctrica	61 % IACS
Conductividad Térmica	237 W/(K*m)
Módulo Elástico	70 GPa
Módulo Torsión	27 GPa
Coeficiente Poisson	0,34
Carga Rotura	50-80 MPa
Alargamiento	35-45 %
Límite Elástico	30-50 MPa
Dureza Brinell	15-20 HB

Tabla 1: Propiedades Aluminio Puro

El Aluminio solo se puede extraer de un mineral conocido como Bauxita, que es una roca compuesta por óxidos de aluminio hidratados, el cual mediante el proceso Bayer se transforma en Alúmina (óxido de Aluminio  $Al_2O_3$ ).

Una vez obtenida la Alúmina mediante un proceso de electrólisis se transforma en Aluminio metálico. Este metal gracias a las propiedades que se han mencionado en la tabla 1, lo hacen muy útil en la industria, destacando:

- Tiene una baja densidad (una tercera parte de lo que pesa el Acero).
- Muy buena resistencia a la corrosión.
- Es un excelente conductor de calor y electricidad.
- Se mecaniza con facilidad.
- Es económico.
- Aunque tiene una baja resistencia mecánica, mediante las aleaciones adecuadas se puede llegar a aumentar sensiblemente su resistencia mecánica hasta 690 MPa.

## 4.2 Aleaciones de aluminio

Gracias a las aleaciones de Aluminio se pueden mejorar propiedades como la resistencia mecánica o dureza, que en estado puro es un metal muy blando, aunque dejan de ser tan resistentes a la corrosión.

Estos son los principales elementos con los que se producen las aleaciones de Aluminio:

PRINCIPALES ALEANTES DEL ALUMINIO	
Cromo (Cr)	Aumenta la resistencia mecánica en combinación con Cu, Mn, Mg.
Cobre (Cu)	Aumenta las propiedades mecánicas pero a cambio reduce la resistencia a la corrosión.
Hierro (Fe)	Aumenta la resistencia mecánica y a la fatiga.
Magnesio(Mg)	Tiene una gran Resistencia tras el conformado en frío.
Manganeso (Mn)	Incrementa las propiedades mecánicas y reduce la calidad de embutición.
Silicio (Si)	Combinado con magnesio (Mg), tiene mayor resistencia mecánica.
Titanio (Ti)	Aumenta la resistencia mecánica.
Zinc ( Zn)	Aumenta la resistencia a la corrosión.
Escandio (Sc)	Mejora la soldadura.

Tabla 2: Aleantes Del Aluminio

Teniendo en cuenta los principales aleantes y sus ventajas se puede dividir en dos grupos las aleaciones de Aluminio forjado:

- Aleaciones de Aluminio forjado sin tratamiento térmico.
- Aleaciones de Aluminio forjado con tratamiento térmico.

#### 4.2.1 Aleaciones de Aluminio forjado sin tratamiento térmico

En las aleaciones sin tratamiento térmico, solo es posible elevar su carga de rotura mediante procesos de estirado en frío.

- **Aleaciones 1xxx (serie 1000):** aleaciones casi puras al 99,9%, principales elementos aleantes el Hierro (Fe) y el Silicio (Si), se les aporta 0.1% Cobre (Cu) para aumentar su resistencia que es de 90 MPa aproximadamente. Destinados principalmente para trabajos de laminación en frío.
- **Aleaciones 3xxx (serie 3000):** aleaciones cuyo principal elemento aleante es el Manganeseo (Mn) en torno al 1,2% y refuerza el Aluminio. Se caracterizan por tener una resistencia aproximada de 110 MPa y se usan para componentes que requieran buena maquinabilidad.
- **Aleaciones 4xxx (serie 4000):** aleaciones cuyo principal elemento aleante es el Silicio (Si) que se añade en cantidades medias-elevadas, por encima del 12%, con el fin de conseguir bajar el rango de fusión de la aleación. El objetivo es conseguir una aleación que funda a una temperatura más baja que el resto de aleaciones para usarlo como elemento de soldadura.
- **Aleaciones 5xxx (serie 5000):** aleaciones cuyo principal elemento aleante es el Magnesio (Mg) entre el 2 y 5 % para conseguir un reforzamiento en solución sólida, se caracterizan por tener una resistencia aproximada de 193 MPa en condiciones de recocido, buena soldabilidad, buena resistencia a la corrosión y baja capacidad de trabajo en frío.



#### 4.2.2 Aleaciones de Aluminio forjado con tratamiento térmico

Las aleaciones de Aluminio con tratamiento térmico, permiten elevar la carga de rotura mediante la aplicación de dichos tratamientos durante su fabricación, así como también sometiendo la aleación a un proceso de estirado en frío, o al conjunto de ambos. El nivel de tratamiento se representa mediante la letra T.

- **Aleaciones 2xxx (serie 2000):** aleaciones cuyo principal elemento aleante es el Cobre (Cu) y también el Magnesio (Mg). Las características de esta serie son: buena relación dureza-peso y mala resistencia a la corrosión. Con el debido tratamiento térmico (T6) alcanzan una resistencia a la tracción de 442 MPa, se usan en las estructuras de los aviones.
- **Aleaciones 6xxx (serie 6000):** serie de aleaciones cuyos principales elementos aleantes son el Magnesio (Mg) y el Silicio (Si). Esta serie se caracteriza por tener buena conformabilidad, soldabilidad, maquinabilidad, resistencia moderada y buena resistencia a la corrosión.

Con el debido tratamiento térmico T6 (madurado y envejecimiento artificial) alcanzan una resistencia a la tracción de 290 MPa. Se utilizan principalmente para estructuras y aplicaciones eléctricas.

- **Aleaciones 7xxx (serie 7000):** aleaciones cuyos principales elementos aleantes son el Zinc (Zn), el Magnesio (Mg) y el Cobre (Cu). Con la aplicación de un tratamiento térmico T6 consiguen llegar a tener una resistencia a la tracción aproximada de 540 MPa, por eso se usan en estructuras de aviones y deportes de alto nivel por su ligereza y flexibilidad.

De estas series la que se utiliza para la fabricación de conductores eléctricos de líneas aéreas de alta tensión es la serie **6000**.

Dentro de la serie 6000 las que se han utilizado para este proyecto han sido:

- Aleación **6201**
- Aleación **6101 AL3** y **6101 AL5**

Según la norma española **UNE-EN 573-3** la composición de estas aleaciones es la siguiente:

Descripción de la aleación		%											
Numérica	Simbólica	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ga	V	Al
EN AW-6101	EN AW-Al Mg Si	0,3-0,7	0,5	0,1	0,03	0,35-0,8	0,35-0,8	0,03	0,1	0,03	0,03	0,03	resto
EN AW-6201	EN AW-Al Mg 0,7 Si	0,5-0,9	0,5	0,1	0,03	0,6-0,9	0,03	0,03	0,1	0,03	0,03	0,03	resto

**Tabla 3: Composición aleaciones**

La designación de **AL3** y **AL5** es el tipo de aleación después del **tratamiento térmico** que debe cumplir unas características según la norma **UNE-EN 50183** como se verá en el punto número 9: tratamiento térmico.

### 4.3 Tratamientos térmicos de las aleaciones

Las aleaciones que han sido tratadas térmicamente se les asignan la letra T seguida de una numeración, que denomina aquellas que han sido endurecidas por tratamiento térmico con o sin endurecimiento por deformación posterior.

Quedando de la siguiente manera:

- **T1:** Enfriado desde un proceso de fabricación realizado a una elevada temperatura y envejecido de forma natural.
- **T2:** Enfriado desde un proceso de fabricación realizado a una alta temperatura, trabajado en frío y envejecido de forma natural.
- **T3:** Solución tratada térmicamente, trabajada en frío y envejecida a temperatura ambiente hasta alcanzar una condición estable.
- **T4:** Solución tratada térmicamente y envejecida a temperatura ambiente hasta alcanzar una condición estable.
- **T5:** Enfriado desde un proceso de fabricación a alta temperatura y envejecida artificialmente.
- **T6:** Solución tratada térmicamente y envejecida artificialmente. Se les da este tratamiento a aquellos productos que después de un proceso de conformado a alta temperatura no son endurecidos en frío, sino que sufren un envejecimiento artificial.
- **T7:** Solución tratada térmicamente y sobre envejecida para su completa estabilización.
- **T8:** Térmicamente tratada por disolución, trabajada en frío y envejecida artificialmente.
- **T9:** Solución tratada térmicamente, envejecida artificialmente y trabajada en frío.
- **T10:** Enfriado desde un proceso de fabricación realizado a una elevada temperatura, trabajado en frío y envejecido artificialmente hasta una condición de estabilidad.

#### 4.4 Aleación de aluminio: ALMELEC

El empleo del Aluminio como sustituto del Cobre en líneas aéreas data de finales del siglo pasado. Las líneas aéreas de transporte a principio de siglo eran a tensiones relativamente bajas y con vanos cortos, lo que hizo que se extendiera el uso de los cables de Aluminio puro, a pesar de su baja carga de rotura con respecto a la del Cobre por razones económicas.

Ya por entonces surgió la necesidad de incrementar las tensiones de transporte y las longitudes de los vanos, lo que hacía imposible el uso de los cables de Aluminio puro en muchos casos.

Por ello se decidió reforzar estos cables de Aluminio puro con alma de alambre de Acero galvanizado, con el objetivo de aumentar las características mecánicas. Comenzó así la utilización de los cables Aluminio-Acero que son los utilizados universalmente en las líneas aéreas.

Los cables de Aluminio-Acero, resuelven prácticamente todos los problemas de construcción de líneas aéreas, sin embargo, tienen algunos inconvenientes como los problemas derivados de la utilización de un conductor compuesto de dos metales, que son la **corrosión** en ocasiones por el par electrolítico que existe en medio húmedo entre el Acero y el Aluminio, a pesar de que el Acero va galvanizado. También la relativa baja dureza del Aluminio puro que rodea el alma de Acero, requiere una serie de atenciones especiales a la hora de realizar el tendido.

En la década de los años 20 se estudió la posibilidad de sustituir el conductor de Aluminio-Acero por una aleación de Aluminio que teniendo las mismas o parecidas características eléctricas y mecánicas, no tuviera las desventajas que presentaban los cables de Aluminio-Acero. De estos estudios salió como resultado el **ALMELEC**, una aleación de **Aluminio-Magnesio-Silicio** de una alta conductividad.

El ALMELEC recibe varios nombres debido a las diferentes patentes que existen por en el mundo del mismo. Por ejemplo:

- En Suiza recibe el nombre de ALDREY
- En Francia recibe el nombre de ALMELEC con denominación técnica AGS/L
- Según la norma UNE por L 3431
- En EEUU por 6201 –T81

A partir de su descubrimiento, el ALMELEC se empezó a desarrollar en Europa, especialmente en Francia, donde a partir de 1945 se consiguió que el ALMELEC fuera el conductor fundamental en las líneas aéreas con un consumo muy superior al del Aluminio-Acero debido a su menor diferencia de costo y a la experiencia del resultado obtenido en el funcionamiento de las primeras líneas.

Las aleaciones de Aluminio, por otra parte, permiten su utilización, en cuanto a carga de rotura se refiere, desde valores entre 6 y 7 ( $\frac{Kg}{mm^2}$ ) para el Aluminio puro (99,5% pureza) hasta 60 ( $\frac{Kg}{mm^2}$ ) y aún valores superiores, por lo tanto, las aleaciones de Aluminio pueden llegar a multiplicar por 10 la carga del Aluminio puro.

En cuanto a la conductividad, el máximo valor se obtiene con el Aluminio puro (61 % IACS o superior), ya que con cualquier aleación baja la conductividad a medida que aumenta su carga de rotura, son inversas.

## 4.5 Alambrón

La fabricación del hilo de máquina conocido como Alambrón, que sirve de materia prima para las máquinas de trefilado se lleva a cabo principalmente por dos procesos:

- El primero es **Mediante colada y laminación en continuo:**

La barra es colada mediante una rueda o un anillo de cobre, a continuación, la barra ya solidificada es guiada hacia una enderezadora de rodillos para entrar al tren laminador.

En el tren laminador se usan varios cabezales o laminadores individuales que van reduciendo paulatinamente la sección transversal de la barra hasta obtener el diámetro deseado, de **9,5 mm** en este caso, convirtiéndose en el **Alambrón** que será enfriado antes de enrollarlo y flejarlo en forma de bobina con un peso aproximado de **2200 Kg**. Este es el método más económico y desarrollado en la actualidad.

- El segundo es partiendo de lingotes obtenidos por **colada semicontinua y posterior laminación en caliente**, pero es el que se usa menos.



Imagen 1: Rollo de Alambrón

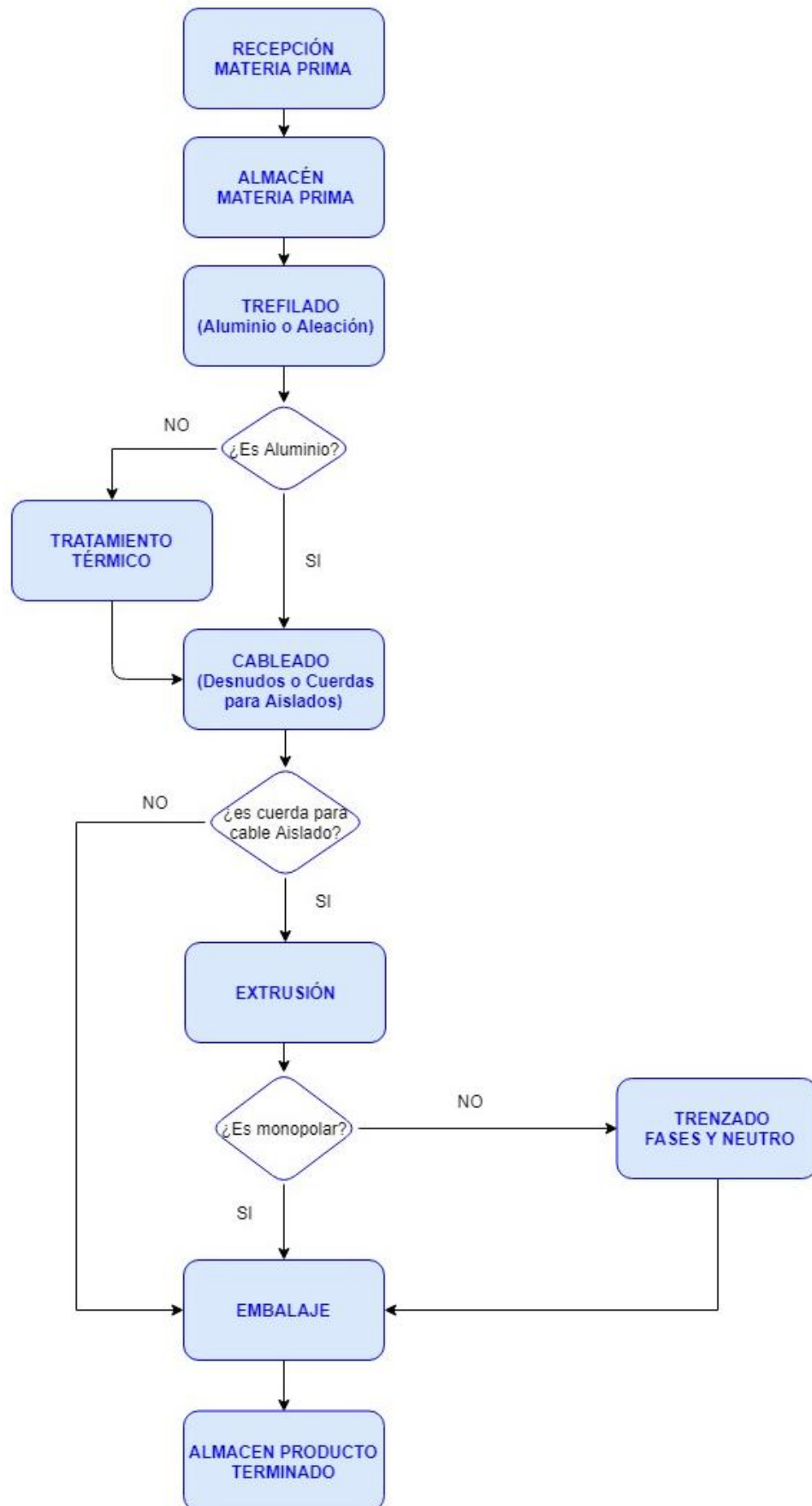
## 5 PROCESO PRODUCTIVO

### 5.1 Actividad del establecimiento industrial

La actividad industrial de esta empresa es la producción y comercialización de cables desnudos compuestos de aluminio y sus aleaciones, con y sin refuerzo de acero para líneas eléctricas de alta tensión. Cables aislados para baja tensión aéreos y subterráneos. Cables desnudos con fibra óptica. Comercialización de cables aislados de media tensión y dieléctricos con fibra óptica.

A continuación se muestra de una manera sencilla en un **diagrama de flujo** el proceso que conlleva la fabricación de los cables.

## 5.2 Diagrama de flujo





## 6 ESTUDIO DEL TIPO ROTURAS

Como ya se ha comentado ante todas las roturas sin una causa clara que lo explique, todas las hileras que se desgastaban y la pérdida de productividad del proceso, lo mejor para analizar estos problemas es estudiar el tipo de roturas que se está produciendo para así intentar resolverlos de la mejor manera posible.

Se va a distinguir entre las roturas debidas a imperfecciones de la materia prima y las roturas debidas al proceso de trefilado.

### 6.1 Roturas debidas a imperfecciones de la materia prima

Son aquellas que vienen dadas por las características de la materia prima que llega y ante las cuales no se pueden tomar acciones correctivas.

#### 6.1.1 Rotura con fisura en el alambre

Esta rotura se caracteriza por presentar una fisura muy característica en la superficie del alambre y un corte que no es a 45° como se puede observar en las siguientes imágenes tomadas de la literatura.

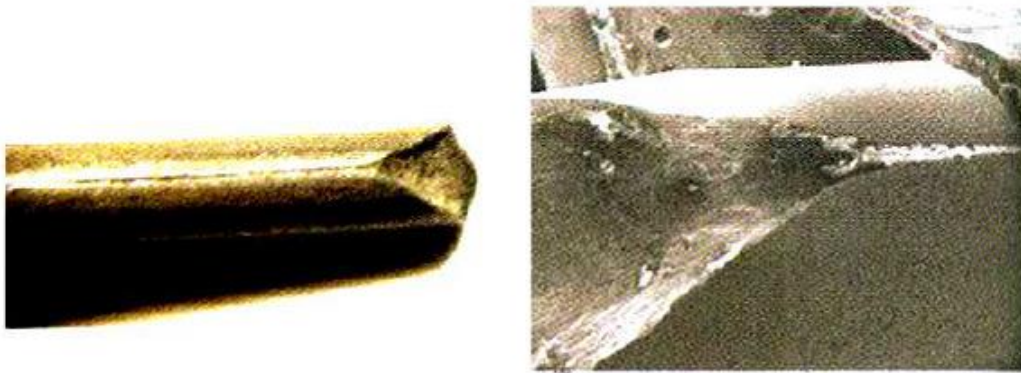


Imagen 2: Rotura fisura en alambre

Las posibles causas de estas roturas son:

- Problemas de incrustaciones en la varilla del aluminio (alambrón) que tras los sucesivos pasos por las hileras pueden provocar la fisura en la superficie.
- Problema geométrico del alambraón.
- Existencia de pliegues de laminación.
- Presencia de óxido de aluminio cuando se fabrica el alambraón.



Imagen 3: Rotura fisura en alambre, Cabelte Incasa

### 6.1.2 Roturas con corte a 45°

Esta rotura se caracteriza por tener presencia de desgarros o irregularidades en la superficie del hilo.

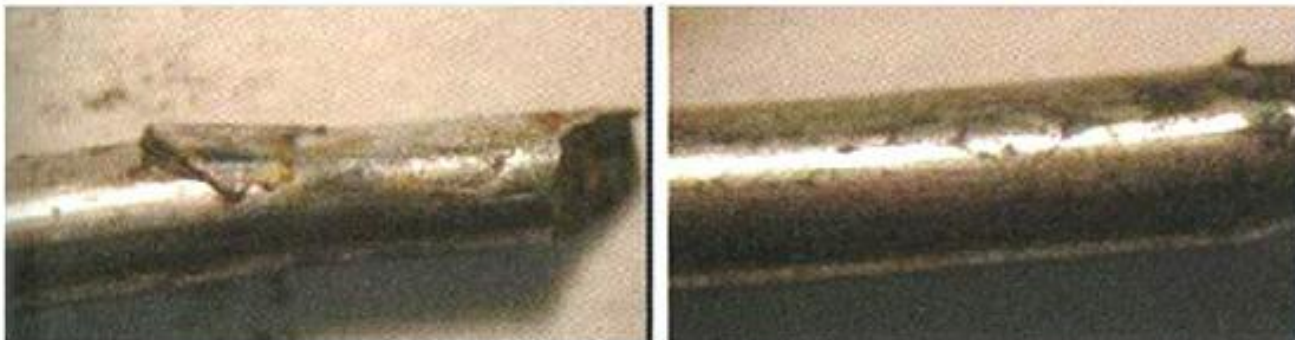


Imagen 4: Rotura corte 45°

Las posibles causas son:

- Una desalineación de las hileras en el proceso de trefilado.
- Incrustación o defectos de la materia prima que provocan desgarros superficiales.
- Problema interno de las hileras, con el mal uso se crean **anillos de desgaste** internos que desgarran el alambre a su paso.



Imagen 5: Desgarro alambre y anillo desgaste hilera



Imagen 6: Desgarro superficial, Cabelte Incasa

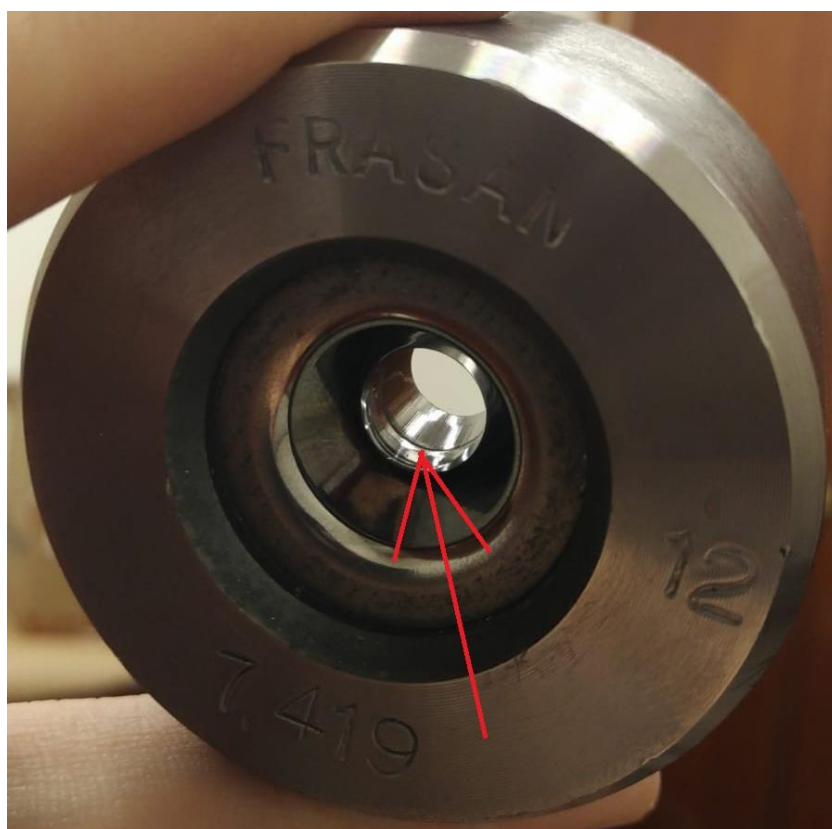


Imagen 7: Anillo de desgaste, Cabelte Incasa

### 6.1.3 Roturas por escamas

Estas roturas, que son menores, pueden deberse a múltiples causas de difícil detección, como problemas de inclusiones y/o incrustaciones (**escamas**) de material, problemas menores en la trefilación que, aunque se podrían disminuir, hay que convivir con ellos.



Imagen 8: Rotura por escama, Cabelte Incasa

## 6.2 Roturas debidas al proceso de trefilado

Son aquellas roturas que no tienen que ver con la materia prima, sino con el proceso que tiene lugar, y antes estas roturas si se pueden tomar acciones correctivas.

### 6.2.1 Roturas debidas a ralladuras excesivas del alambre

En estas roturas se puede observar claramente como la superficie del alambre tiene numerosas ralladuras y se notan las hendiduras al pasar el dedo.

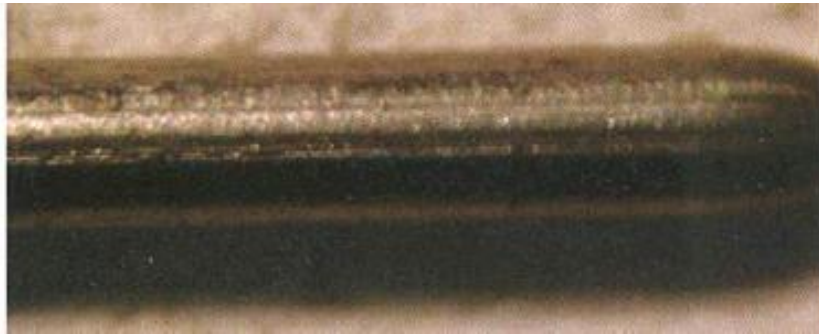


Imagen 9: Ralladura superficie alambre

Estas roturas se atribuyen al rallado de la hilera que puede ser originado por lo siguiente:

- Al pasar la soldadura se producen problemas con el esmerilado o cuando rompe debido a la soldadura, ambas producirían el rallado interno.
- Falta de lubricación a la hora de trefilar o enhebrar en la punteadora.
- Problema de pulido interno de las hileras.
- Hileras mal alineadas, hacen que no entre el alambre concéntrico y rayen las hileras.

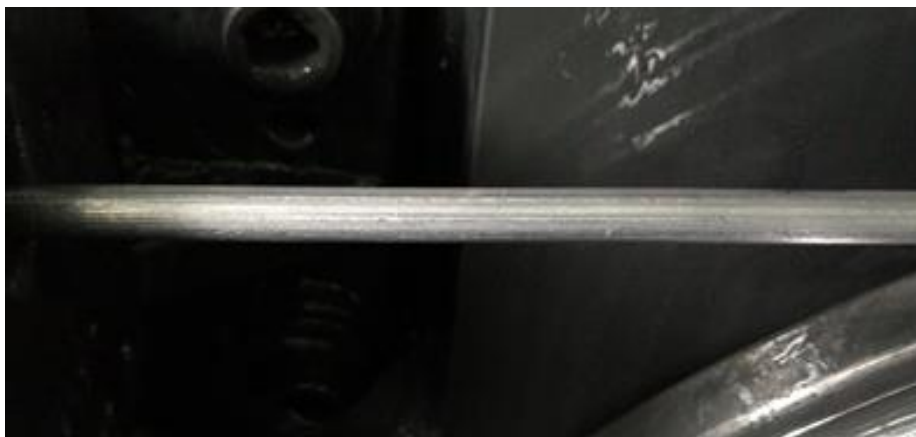


Imagen 10: Ralladura superficie alambre, Cabelte Incasa

### 6.2.2 Roturas por cristalización interna del alambre

Esta rotura se produce debido a un calentamiento excesivo del alambre a su paso por la hilera, que con ángulos ( $2\alpha$ ) muy pequeños ocasionan una mayor zona de contacto entre el alambre y la hilera. Esta situación, una menor lubricación y la velocidad de trefilado como factor que potencia este efecto, provocan que el alambre vaya cogiendo **acritud** hasta que finalmente cristaliza.

Esta cristalización produce una fragilidad extrema, pudiendo romper en el proceso del trefilado o en los posteriores como en el bobinador, o en la cableadora, ya que el alambre no soporta los efectos de doblado. Se caracteriza por dejar la superficie de rotura de color **blanco** y aspecto **crystalino**.

Tampoco cumple a la hora de hacer la **prueba de enrollamiento** ya que si se hace el pliegue con la propia mano se rompe el alambre, por lo que esta comprobación es el test para detectar este problema. Consiste en doblar el hilo sobre su propio diámetro 8 veces y que aguante.



Imagen 11: Rotura por cristalización, Cabelte Incasa



Imagen 12: Rotura cristalización, doblado Cabelte Incasa

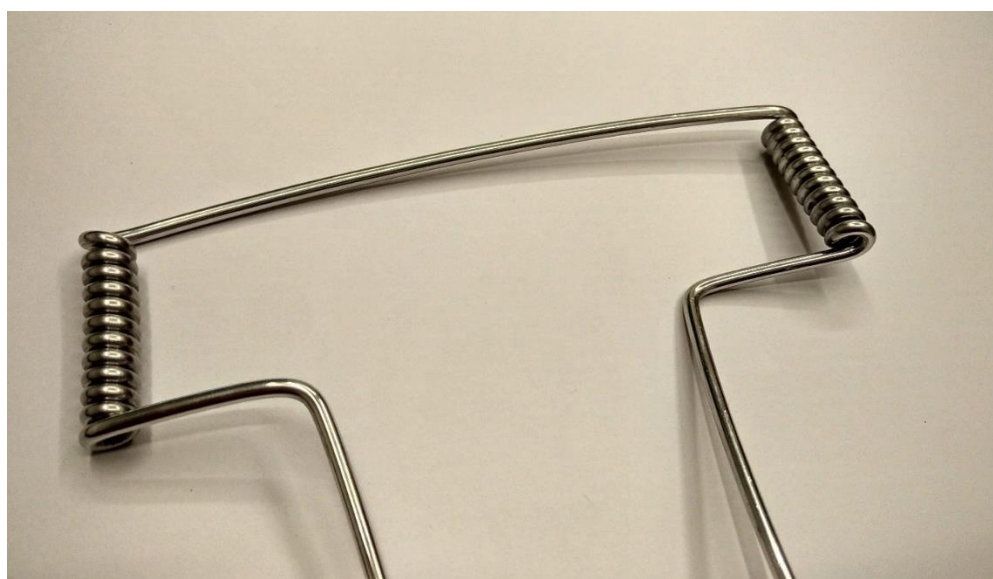


Imagen 13: Prueba doblado correcto, Cabelte Incasa



### 6.2.3 Roturas en forma de copa y cono



Imagen 14: Rotura copa y cono

Las roturas del tipo **copa y cono**, también llamadas del tipo **chevron**, se caracterizan por el agujero en forma de copa que deja en un extremo de la rotura y la punta del cono que deja en el otro.

Estas roturas están relacionadas exclusivamente a roturas ocasionadas por un mal diseño o fabricación de la hilera que se usa en el trefilado, y se pueden deber a las siguientes razones:

- Los ángulos del cono de reducción de las hileras no son los correctos generando tensiones internas que provocan el desgarramiento interior del hilo.
- El porcentaje de reducción de una hilera a otra no es el adecuado favoreciendo la generación de tensiones internas.
- Cuando se crean anillos de desgaste en el cono de reducción y llega a niveles excesivos, se pierde el dimensionamiento correcto del diámetro y del ángulo de reducción provocando grietas internas.

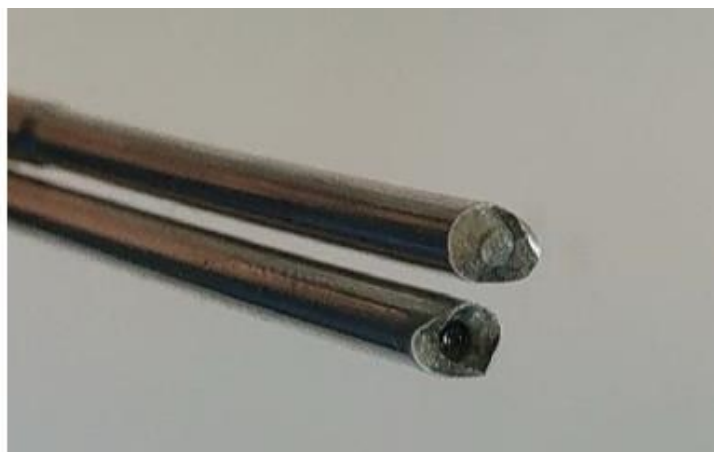


Imagen 15: Rotura copa y cono, Cabelte Incasa

Cuando se tiene un flujo discontinuo, donde la velocidad del alambre cuando sale de la hilera es mayor que cuando entra, y deja de cumplirse el balance de volumen del material entonces se puede dar el caso de que se produzca un agrietamiento interno.

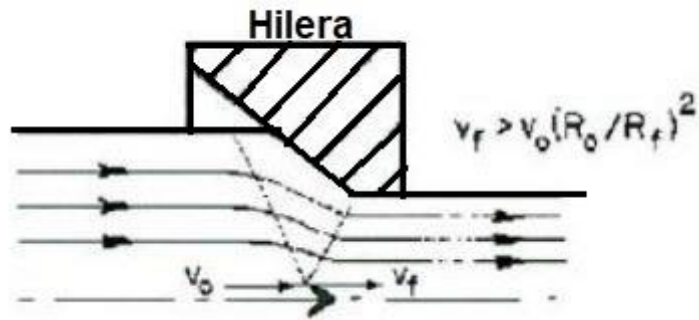


Imagen 16: Flujo discontinuo

Este agrietamiento interno que se produce por un **estallido central** en el alambre es axial y tiene la forma de cono. Una vez se produce el estallido, debido a las tensiones hidrostáticas dentro del alambre y el balance de volumen que por un instante no se cumple, las líneas de deformación logran alcanzar el centro del material hasta que seguidamente se vuelve a desajustar el sistema con un efecto cíclico.

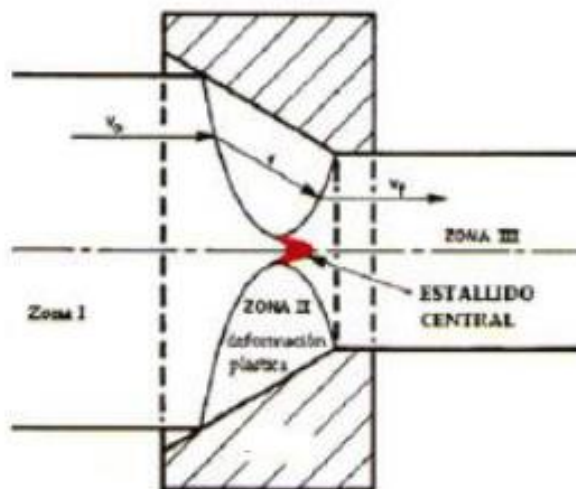


Imagen 17: Estallido central

Las grietas en el interior no logran ser detectadas a tiempo y por ello el material presenta roturas inesperadas cuando está en el proceso de trefilado. Las grietas internas que reciben el nombre de tipo **Chevron**, perjudican enormemente las propiedades del material provocando extrema fragilidad.

Las observaciones realizadas por investigadores señalan que este estallido interno ocurre con **reducciones** relativamente **bajas** y **amplios ángulos de reducción**.

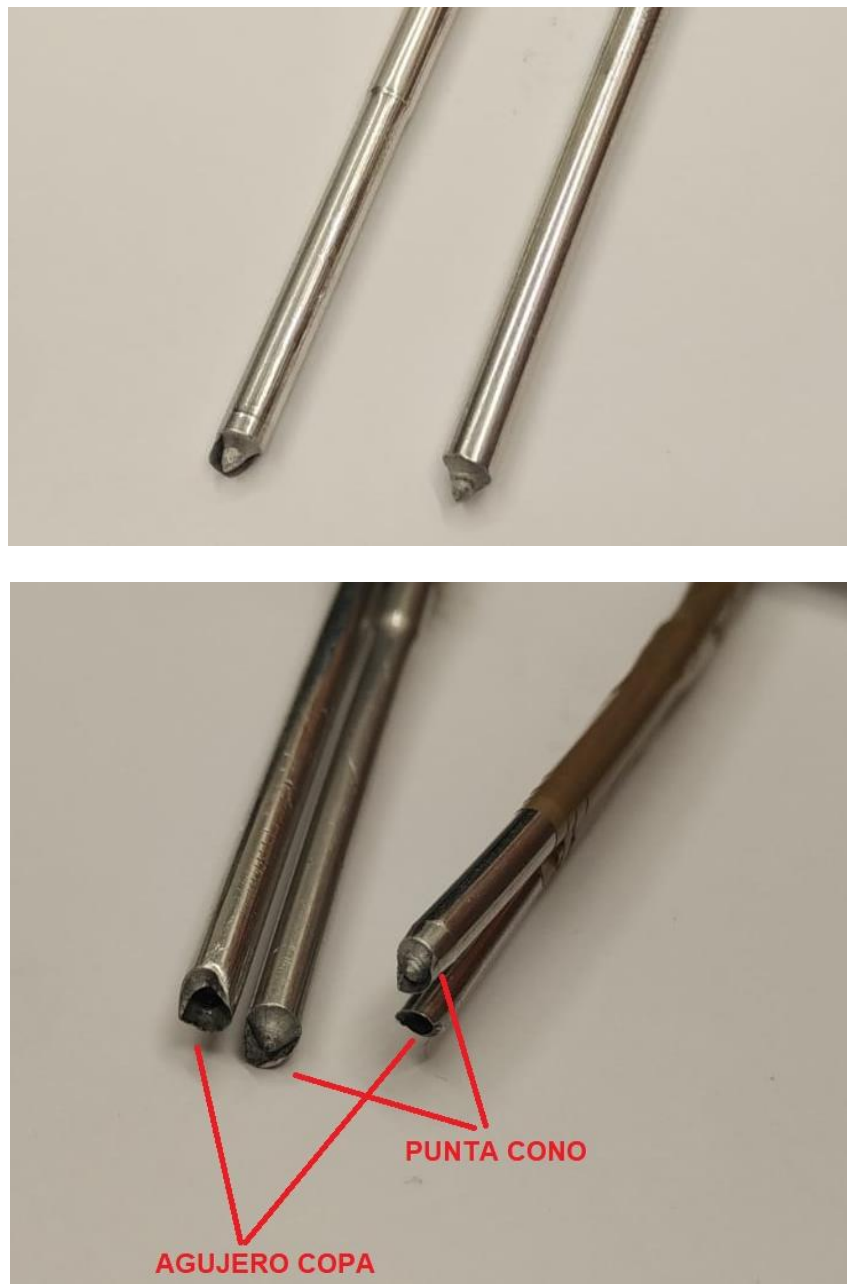


Imagen 18: Roturas copa y cono, Cabelte Incasa

## 7 TREFILADO

### 7.1 Concepto de trefilado

El proceso de trefilado de alambre es un proceso industrial de gran importancia, ya que sirve para fabricar elementos con un gran número de aplicaciones como alambres conductores, cables, clavos, tornillos, remaches, etc.

Es un proceso en el que tiene lugar una deformación plástica, producida por fuerzas de tracción y de compresión simultáneas, produciéndose un **alargamiento** del material.

Este proceso confiere al material las propiedades inherentes a los procesos de deformación plástica que se realizan en frío, como mayor dureza, un mejor acabado superficial y un aumento de la **resistencia mecánica**.

La rugosidad superficial que se obtiene es buena tanto en la dirección longitudinal como transversal, posibilitando que se puedan disminuir las tolerancias dimensionales.

Este tipo de proceso se aplica principalmente a la fabricación de alambre, haciendo pasar el material (el **alambrón**) a través de una **hilera**, que le da la forma requerida.

Por ser un trabajo en **frío**, estas reducciones de la sección no pueden conseguirse de una sola vez, por lo que es necesario reducir la sección en varios pasos de reducciones sucesivas, esto va a proporcionar **acritud** al material aumentando la resistencia mecánica.

Una vez se alcanza el límite de conformación del material, solo será posible continuar con el proceso tras someterlo a un **tratamiento térmico**.

## 7.2 Trefiladoras

Son las máquinas que se utilizan para trefilar el alambroón, constan de varias hileras, de diámetro decreciente por las que pasa el alambre sucesivamente.

En este proyecto se ha realizado el estudio con dos máquinas trefiladoras alemanas de la marca Niehoff, que son la **Niehoff M 85** y la **Niehoff MSM 85**.

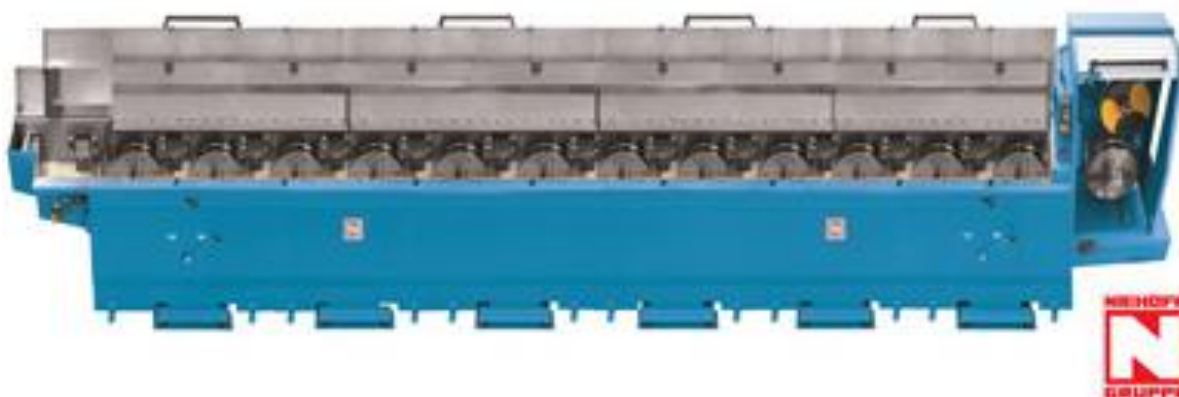


Imagen 19: Niehoff M 85



Imagen 20: Niehoff MSM 85

Ambas constan de 13 portahileras donde van alojadas las hileras de reducción y de sus correspondientes poleas, la diferencia entre las dos trefiladoras es que la M 85 tiene un motor para todas las poleas mientras que la MSM 85 consta de un motor individual para cada una, de esta manera en la MSM 85 se pueden variar las reducciones mientras que en la M 85 son fijas y vienen determinadas por la máquina.

El poder variar las reducciones es un dato importante a tener en cuenta a la hora de diseñar las hileras como se explica más adelante.

Aquí se puede observar la disposición de los distintos elementos del interior de la trefiladora:

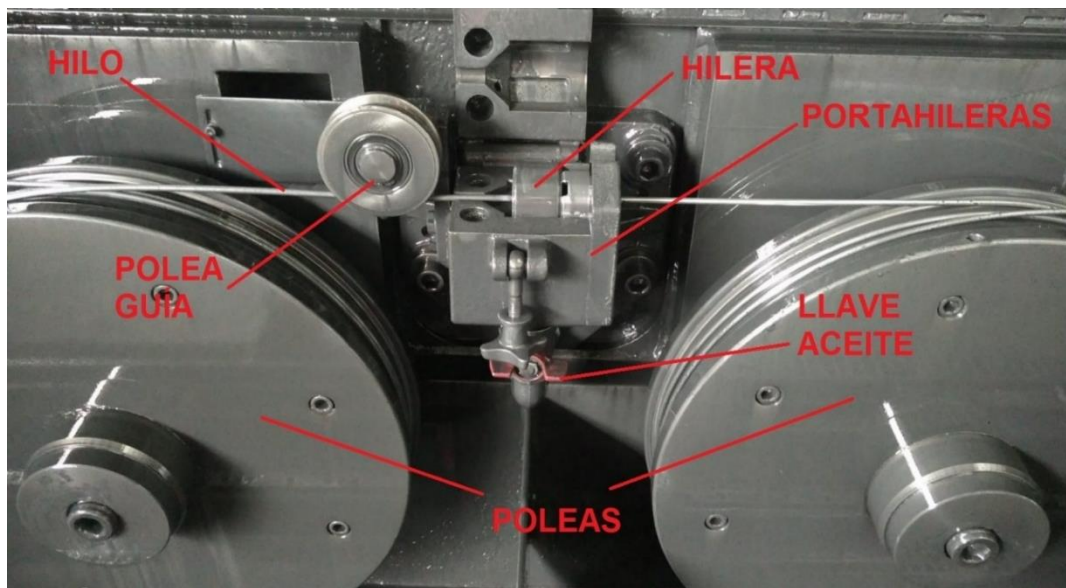


Imagen 21: Disposición elementos internos trefiladora

El hilo va enrollado sobre la polea que es la que ejerce la fuerza de tiro, generalmente va enrollado con 2 vueltas, de la polea mediante una polea guía más pequeña que hace que el hilo entre bien alineado y concéntrico entra al portahileras.

El portahileras dispone de unos orificios por los que entra el aceite y lo inyecta directamente sobre la hilera para su correcta lubricación. Al pasar por la hilera el hilo se estira y reduce su diámetro y continúa hacia la siguiente polea para seguir el mismo procedimiento hasta su diámetro final.

Por ultimo pasa por el **cabrestante** que ejerce la fuerza de tiro regulando la velocidad y el **bailarino** que regula la tensión, finalmente llega al **bobinador** donde se completan los carretes con el hilo.



Imagen 22: Cabrestante y Bailarino



Imagen 23: Bobinador

En el bobinador es donde se colocan los carretes vacíos y se llenan conforme se trefila el alambre.



Imagen 24: Carretes finales

Por último se preparan los carretes para llevarlos a la siguiente fase, el tratamiento térmico en el horno.

Cada máquina trefiladora dispone de una pantalla en la que se pueden ver a tiempo real datos como las reducciones, el alargamiento del hilo de una hilera a otra, el consumo de los motores, la temperatura del aceite o la velocidad entre otros.

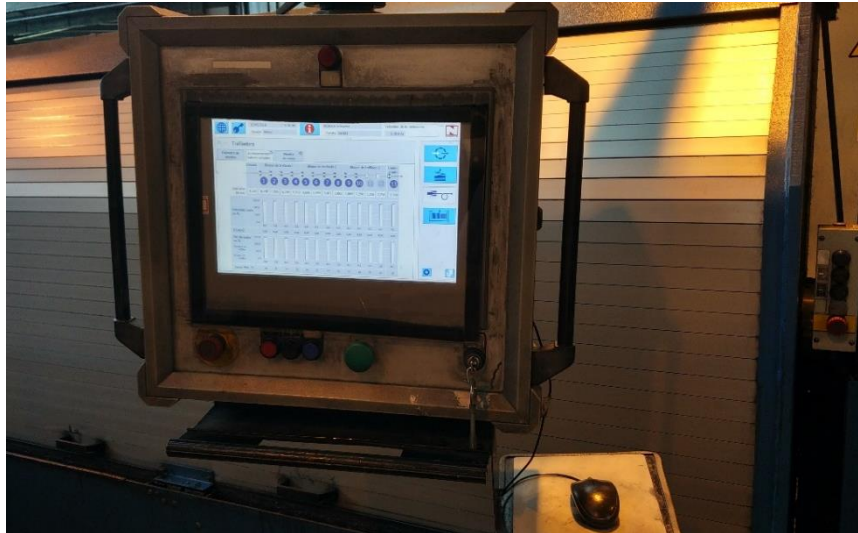


Imagen 25: Pantalla de datos trefiladora

Las dos máquinas trefiladoras tienen establecidas los juegos de hileras con sus respectivas reducciones en función del diámetro final deseado y de si la materia prima es Aluminio o ALMELEC (aleación de Aluminio), así como la velocidad recomendada a la que tiene que funcionar la máquina trefiladora.

En el caso de la M 85 al ser de reducciones fijas, tiene el mismo juego de hileras tanto para Aluminio como para el ALMELEC.



VAR	HILERAS													VELOC
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	TREFIL
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	m/s
9,52	8,548	7,676	6,892	6,189	5,558	4,99	4,481	4,024	3,613	3,245	2,91	2,61	2,38	35
9,52	8,548	7,676	6,892	6,189	5,558	4,99	4,481	4,024	3,613	3,245	2,91	2,61	2,46	35
9,52	8,548	7,676	6,892	6,189	5,558	4,99	4,481	4,024	3,613	3,245	2,91	2,61	2,5	35
9,52	8,548	7,676	6,892	6,189	5,558	4,99	4,481	4,024	3,613	3,245	2,91	2,61	2,55	33
9,52	8,548	7,676	6,892	6,189	5,558	4,99	4,481	4,024	3,613	3,245	2,91		2,75	31
9,52	8,548	7,676	6,892	6,189	5,558	4,99	4,481	4,024	3,613	3,245	2,91		2,82	30
9,52	8,548	7,676	6,892	6,189	5,558	4,99	4,481	4,024	3,613	3,245			2,9	30
9,52	8,548	7,676	6,892	6,189	5,558	4,99	4,481	4,024	3,613	3,245			3,08	26
9,52	8,548	7,676	6,892	6,189	5,558	4,99	4,481	4,024	3,613	3,245			3,15	26
9,52	8,548	7,676	6,892	6,189	5,558	4,99	4,481	4,024	3,613				3,35	23
9,52	8,548	7,676	6,892	6,189	5,558	4,99	4,481	4,024	3,613				3,41	22
9,52	8,548	7,676	6,892	6,189	5,558	4,99	4,481	4,024	3,613				3,44	22
9,52	8,548	7,676	6,892	6,189	5,558	4,99	4,481	4,024					3,78	18
9,52	8,548	7,676	6,892	6,189	5,558	4,99	4,481						4,04	16
9,52	8,548	7,676	6,892	6,189	5,558	4,99							4,63	12
9,52	8,548	7,676	6,892	6,189	5,558	4,99							4,77	12

Tabla 4: Reducciones M85 Aluminio

VAR.	HILERAS													VELOC
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	TREFIL
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	m/s
9,52	8,548	7,676	6,892	6,189	5,558	4,99	4,481	4,024	3,613	3,245	2,91	2,61	2,4	20
9,52	8,548	7,676	6,892	6,189	5,558	4,99	4,481	4,024	3,613	3,245	2,91	2,61	2,52	20
9,52	8,548	7,676	6,892	6,189	5,558	4,99	4,481	4,024	3,613	3,245			3	16
9,52	8,548	7,676	6,892	6,189	5,558	4,99	4,481	4,024	3,613	-			3,15	15
9,52	8,548	7,676	6,892	6,189	5,558	4,99	4,481	4,024	3,613	-			3,17	15
9,52	8,548	7,676	6,892	6,189	5,558	4,99	4,481	4,024	3,613				3,36	14
9,52	8,548	7,676	6,892	6,189	5,558	4,99	4,481	4,024	3,613				3,47	12
9,52	8,548	7,676	6,892	6,189	5,558	4,99	4,481	4,024	3,613				3,5	12
9,52	8,548	7,676	6,892	6,189	5,558	4,99	4,481						4	10
9,52	8,548	7,676	6,892	6,189	5,558	4,99	4,481						4,3	8
9,52	8,548	7,676	6,892	6,189	5,558	4,99	4,481						4,38	8
9,52	8,548	7,676	6,892	6,189	5,558	4,99							4,65	8

Tabla 5: Reducciones M85 Aleación

VAR.	HILERAS													VELOC
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	TREFIL
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	m/s
9,52	8,148	7,065	6,126	5,312	4,606	3,994	3,463	3,003	2,604	2,258	1,958	1,697	1,5	35
9,52	8,148	7,065	6,126	5,312	4,606	3,994	3,463	3,003	2,604	2,258	1,958		1,7	35
9,52	8,148	7,065	6,126	5,312	4,606	3,994	3,463	3,003	2,604	2,258			2,03	35
9,52	8,148	7,065	6,126	5,312	4,606	3,994	3,463	3,003	2,604	2,258			2,12	35
9,52	8,148	7,065	6,126	5,312	4,606	3,994	3,463	3,003	2,604				2,27	35
9,52	8,148	7,065	6,126	5,312	4,606	3,994	3,463	3,003	2,604				2,4	33
9,52	8,148	7,065	6,126	5,312	4,606	3,994	3,463	3,003	2,604				2,48	33
9,52	8,148	7,065	6,126	5,312	4,606	3,994	3,463	3,003	2,604				2,53	30
9,52	8,148	7,065	6,126	5,312	4,606	3,994	3,463	3,003					2,75	28
9,52	8,148	7,065	6,126	5,312	4,606	3,994	3,463	3,003					2,84	28
9,52	8,148	7,065	6,126	5,312	4,606	3,994	3,463	3,003					2,88	28
9,52	8,148	7,065	6,126	5,312	4,606	3,994	3,463						2,91	25
9,52	8,148	7,065	6,126	5,312	4,606	3,994	3,463						3,1	22
9,52	8,148	7,065	6,126	5,312	4,606	3,994	3,463						3,17	22
9,52	8,148	7,065	6,126	5,312	4,606	3,994							3,41	18
9,52	8,148	7,065	6,126	5,312	4,606	3,994							3,47	18
9,52	8,148	7,065	6,126	5,312	4,606	3,994							3,8	14
9,52	8,148	7,065	6,126	5,312	4,606								4,38	10
9,52	8,148	7,065	6,126	5,312									4,63	8
9,52	8,148	7,065	6,126	5,312									4,78	8

Tabla 6: Reducciones MSM85 Aluminio

VAR.	HILERAS													VELOC
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	TREFIL
mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	m/s
9,52	8,495	7,55	6,731	5,996	5,342	4,759	4,239	3,777	3,364	2,997	2,67	2,379	2,11	24
9,52	8,495	7,55	6,731	5,996	5,342	4,759	4,239	3,777	3,364	2,997	2,67	2,379	2,28	24
9,52	8,495	7,55	6,731	5,996	5,342	4,759	4,239	3,777	3,364	2,997	2,67		2,4	20
9,52	8,495	7,55	6,731	5,996	5,342	4,759	4,239	3,777	3,364	2,997	2,67		2,52	20
9,52	8,495	7,55	6,731	5,996	5,342	4,759	4,239	3,777	3,364				3	16
9,52	8,495	7,55	6,731	5,996	5,342	4,759	4,239	3,777	3,364				3,15	15
9,52	8,495	7,55	6,731	5,996	5,342	4,759	4,239	3,777	3,364				3,17	15
9,52	8,495	7,55	6,731	5,996	5,342	4,759	4,239	3,777					3,36	14
9,52	8,495	7,55	6,731	5,996	5,342	4,759	4,239	3,777					3,47	12
9,52	8,495	7,55	6,731	5,996	5,342	4,759	4,239	3,777					3,5	12
9,52	8,495	7,55	6,731	5,996	5,342	4,759	4,239						4	10
9,52	8,495	7,55	6,731	5,996	5,342	4,759							4,3	8
9,52	8,495	7,55	6,731	5,996	5,342	4,759							4,38	8

Tabla 7: Reducciones MSM85 Aleación

### 7.3 Lubricante

Para realizar el proceso de trefilado de la manera más óptima las máquinas trefiladoras dotan de un baño de aceite al alambre que se va reduciendo por las sucesivas hileras.

De esta manera se evita la fricción excesiva entre el alambre y la hilera y un aumento de la temperatura en el alambre que puede provocar anillos de desgaste en la hilera y cristalización interna del alambre.

El lubricante empleado en este proyecto ha sido el **RENOFORM MF 3125** de la marca FUCHS, un lubricante de alto rendimiento para aplicaciones como el trefilado, con una viscosidad a 40°C de **125 mm<sup>2</sup>/s**.

#### Trefilado

PRODUCTOS PUROS PARA ACERO, ACERO INOXIDABLE Y ALUMINIO			
Producto	Viscosidad cSt 40°C mm <sup>2</sup> /s	Aditivación	Propiedades y Aplicaciones
RENOFORM MF 313	13		Embutición ligera de Aluminio, Diluyente Re. MF 3125.
RENOFORM MF 3125	125	-	Trefilado de Aluminio, Embutición ligera y media.
RENOFORM MF 332	32		Estirado de tubo y perfil, reducciones pequeñas.
RATAK EMP 170	70	S,Cl	Trefilado Acero Inoxidables, también Estampación.
RATAK TRP 2170	1700		Trefilado Inoxidable diámetro grueso, Estampación.
RENOFORM TRS 1453	35	-	Emulsionable, Trefilado de Fe. Hileras sumerg. 6 - 12%.
RATAK TRP 2500	5000	S,Cl	Embutición difícil de Inox. Trefilado severo.

Tabla 8: Lubricante FUCHS

## 7.4 Hileras

La hilera es el utillaje fundamental del proceso de trefilado y la que sufre mayor desgaste. Es un útil de precisión con un orificio a través del cual se obliga a pasar el alambre para salir a la medida deseada reduciéndose así la sección del material. Los materiales empleados en su fabricación suelen ser Metal Duro o Diamante (natural o sintético).

Para un correcto diseño de la hilera hay que tener en cuenta lo siguiente:

- Debe permitir una deformación adecuada del material.
- Debe respetar la función del lubricante para así reducir los esfuerzos internos y los calentamientos bruscos, evitar ralladuras y de esta manera prolongar su vida útil y conseguir un buen estado superficial del material trefilado.
- El ataque del alambre sobre el cono de reducción debe tener suficiente margen de seguridad para que trabaje correctamente, se recomienda que sea entre el **33%** y el **66%** de la altura del cono de reducción.
- Debe tener buena resistencia y rigidez para que no se produzcan roturas provocadas por esfuerzos de trabajo.

La hilera con la que se ha realizado el proyecto está constituida por un **núcleo** de Metal Duro que tiene una dureza excepcional y gran resistencia al desgaste, esta zunchada con una **montura** de acero que le hace trabajar a compresión.



Imagen 26: Hilera

El componente principal del Metal Duro es el carburo de Tungsteno (WC) que junto partículas de carburos de titanio (TiC) tantalio (TaC) y niobio (NbC) consiguen esa dureza y resistencia al desgaste. Con la adición de cobalto (Co) se consigue tenacidad de tal manera que a mayor contenido de Co, menor dureza y mayor tenacidad.

Normalmente en la fabricación de hilera se usan unos contenidos de Co que varían entre el 3% y el 15%.

EL **perfil longitudinal de una hilera** tiene la siguiente forma:

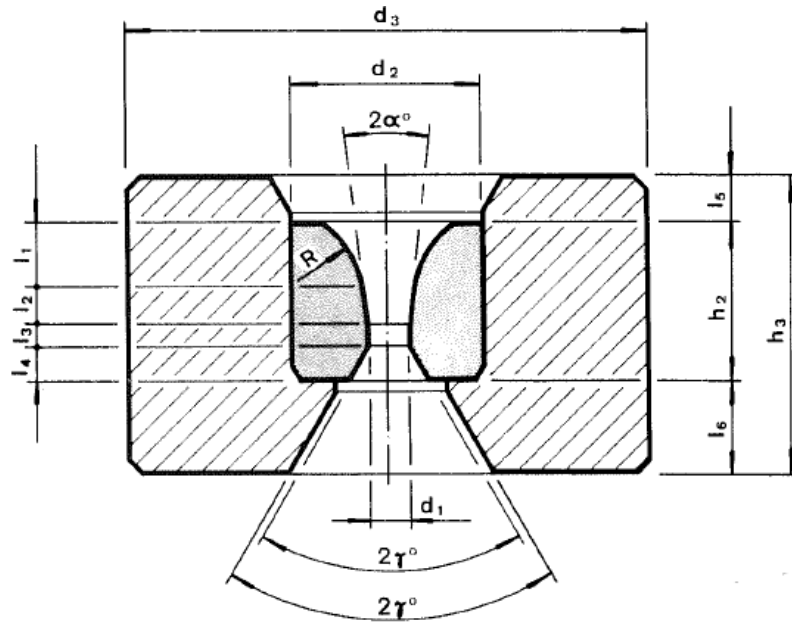


Imagen 27: Perfil Longitudinal hilera

- d.1 = calibre
- d.2 = diámetro exterior del núcleo
- d.3 = diámetro exterior montura
- h.2 = altura del núcleo
- h.3 = altura montura
- l.1 = altura cono entrada
- l.2 = altura cono reducción
- l.3 = altura de calibre
- l.4 = altura cono salida
- l.5 = altura entrada montura
- l.6 = altura salida montura
- $2\alpha$  = ángulo cono reducción

De todas, las más importantes son 4:

- **Embocadura o entrada del núcleo:** es la zona de la hilera donde se recoge el lubricante, tiene como objetivo que el alambre y el lubricante entren de la mejor manera posible en el cono de reducción, consiguiendo una capa suficientemente gruesa de lubricante para favorecer así las condiciones hidrodinámicas. La embocadura puede tener forma de tronco de cono o puede ser redondeado en forma de boca de trompeta.
- **Cono de reducción:** es la zona de la hilera donde se obliga al material a ir reduciendo su sección provocándole una deformación plástica permanente conforme avanza, tiene forma de tronco cónico y está determinada por un ángulo  $2\alpha$  que variará según el material que se vaya a trefilar, generalmente está entre  $12^\circ$  y  $20^\circ$ .
- **Calibre:** es la zona de la hilera donde el alambre sale con la sección deseada, es cilíndrica y también asegura el acabado superficial.
- **Cono de salida:** es la zona de la hilera que está formada por otro tronco cónico con ángulo de  $30^\circ$  de alivio para evitar posibles roces entre el material y la hilera debidos a los esfuerzos de expansión del material.

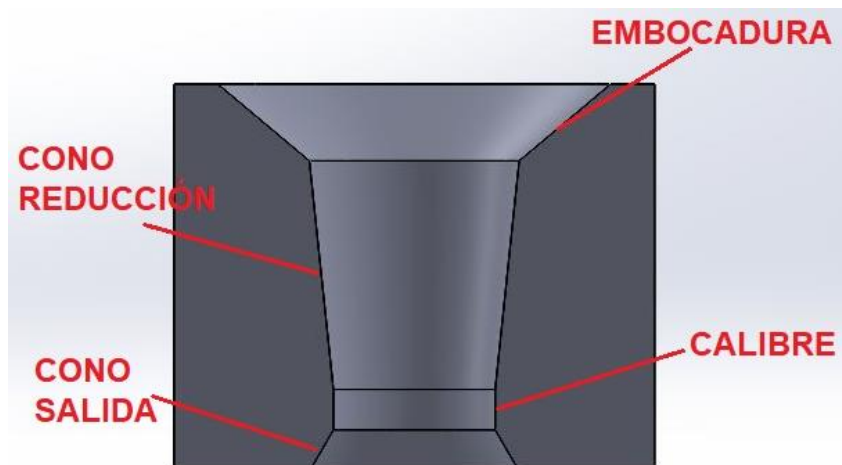


Imagen 28: Zonas hilera

Además, según las cotas que se determinen en el núcleo de la hilera, hay dos factores importantes a tener en cuenta, el **alargamiento** que sufre el material y la **reducción de sección**.

### 7.4.1 Reducción de sección

Es el % de la sección transversal del material de entrada que se reduce al pasar por la hilera.

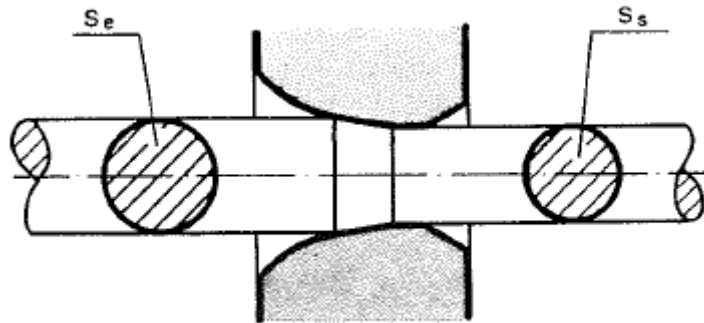


Imagen 29: Reducción de sección

Siendo:

- Se: sección transversal entrada.
- Ss: sección transversal salida.
- R: % reducción de la sección.

$$R = \frac{Se - Ss}{Se} \times 100$$

### 7.4.2 Alargamiento

Es el % del material de entrada que se alarga al pasar por la hilera. No se recomienda pasar de un **33%** de alargamiento del material.

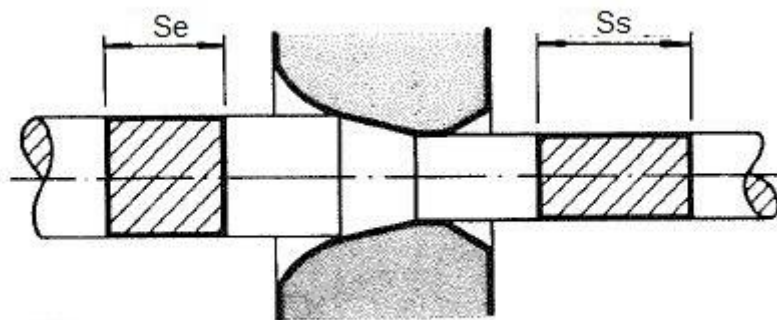


Imagen 30: Alargamiento

Siendo:

- Se: sección transversal entrada.
- Ss: sección transversal salida.
- A: % alargamiento del material.

$$A = \frac{Se - Ss}{Ss} \times 100$$

## 7.5 Parámetros que influyen en el trefilado

Muchas veces los problemas que se dan en el trefilado se atribuyen a la materia prima (alambión) o al lubricante entre otros, sin estar seguros de que las hileras que se están utilizando son las correctas, ya que el trefilado depende muchísimo de una buena geometría y diseño de la hilera.

El primer parámetro que influye en el trefilado es el ángulo  $2\alpha$  del cono de reducción de la hilera puesto que si tenemos un ángulo de trabajo muy grande o muy pequeño las condiciones de trefilado van a cambiar el resultado final.

### 7.5.1 Ángulo de trabajo muy grande

Si el ángulo de trabajo  $2\alpha$  es muy grande lo que se consigue es al contrario de lo que se podría pensar, una lubricación muy pobre ya que el lubricante no llega de manera contundente.

Por consiguiente, esto provoca un desgaste rápido de las hileras y formación de anillos de desgaste en la zona del cono de reducción.

Además los ángulos de trabajo muy grandes favorecen a las roturas centrales del material en forma de **copa y cono** (tipo **chevron**) debido a que las tensiones internas axiales que se forman son muy grandes.

También se puede observar como la zona de reducción representada en color azul en la siguiente imagen es muy pequeña, esto no ayuda a que el material se deforme adecuadamente y hace que el ataque del hilo sobre el cono de reducción sea muy bajo, lo que al final deriva en pérdidas dimensionales del calibre.

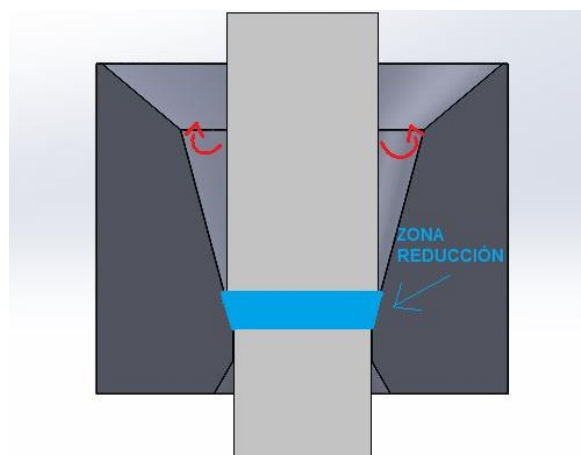


Imagen 31: Ángulo trabajo muy grande



### 7.5.2 Ángulo de trabajo muy pequeño

Si por el contrario el ángulo de trabajo  $2\alpha$  es muy pequeño esto ocasiona una falta de lubricación entre el material y la hilera.

Por consiguiente, esta falta de lubricación va a producir una **alta fricción** entre el material y la hilera y un **calentamiento excesivo** provocando desprendimiento del material y rallado.

Se ve reflejado en la siguiente imagen, como al disminuir el ángulo  $2\alpha$  la zona de reducción en color azul ahora es muy grande (mayor contacto) y hace que el ataque del hilo sobre el cono de reducción sea muy alto.

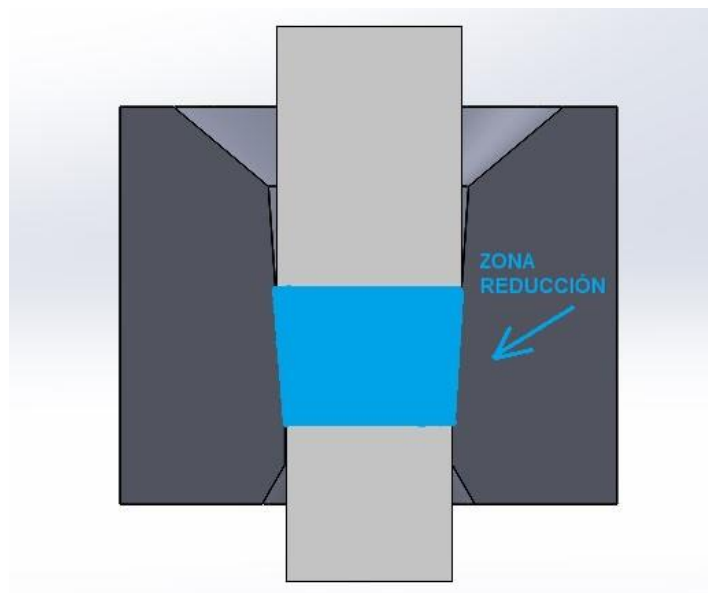


Imagen 32: Ángulo de trabajo muy pequeño

### 7.5.3 Parámetro Delta ( $\Delta$ )

A la hora de hablar del diseño de la hilera, a parte del ángulo  $2\alpha$  del cono de reducción, el parámetro más importante a tener en cuenta y del que dependen los dos siguientes, es el parámetro **Delta ( $\Delta$ )**.

De él dependen los dos siguientes parámetros que son el trabajo redundante ( $\Phi$ ) y el desgaste de la hilera ( $P/\sigma$ ).

Este parámetro **Delta ( $\Delta$ )** es la forma de deformación plástica que define la hilera, relaciona a la vez el semi-ángulo ( $\alpha$ ) del cono de reducción junto con la reducción de sección ( $R$ ).

$$\Delta = \frac{\alpha}{R} [1 + \sqrt{1 - R}]^2$$

Siendo:

- **$\Delta$** : deformación plástica definida por la hilera, Delta.
- **$\alpha$** : semi-ángulo del cono de reducción en radianes.
- **R**: reducción de la sección.

De esta manera:

- **Un valor bajo de Delta ( $\Delta$ )**: significa que la zona de contacto en la que el material se deforma en el cono de reducción es menor y muy larga con lo que se incrementa el contacto entre la hilera y el material y provoca un trabajo de fricción excesivo. Pero también se consigue que las tensiones hidrostáticas axiales en el centro del alambre se reduzcan o desaparezcan, y que el trabajo redundante ( $\Phi$ ) sea bajo.
- **Un valor alto de Delta ( $\Delta$ )**: significa que la zona de contacto en la que el material se deforma en el cono de reducción es alta y corta, con lo que el contacto entre el material y la hilera es limitado, las tensiones hidrostáticas axiales no se ven reducidas y el trabajo redundante es excesivo.

El objetivo es trabajar con un valor de Delta ( $\Delta$ ) que consiga el mínimo esfuerzo de trefilado en el proceso, que viene dado por la siguiente fórmula:

$$(\Delta) = 4.9 \times \sqrt{\frac{\mu}{\ln \frac{1}{1-R}}}$$

Siendo:

- $\mu$ : coeficiente de fricción.
- R: reducción de la sección.

Aunque para muchos procesos industriales el valor de ( $\Delta$ ) está sobre 3 porque así se minimiza el esfuerzo, hay que tener en cuenta que un valor bajo de ( $\Delta$ ) significa que la zona de contacto va a ser mayor, lo que va a provocar un aumento de la fricción y temperatura que sin la lubricación adecuada producirá fallo como se ha comentado en el punto anterior.

Por el contrario, como ya se ha comentado anteriormente, un valor bajo de ( $\Delta$ ) contribuye a que no se produzcan o se minimicen las tensiones hidrostáticas en el interior del hilo que provocan el estallido central desembocando en fallos tipo **copa-cono** o tipo **chevron** durante el proceso de trefilado.

Estas roturas provocan que el material quede con una ductilidad reducida aun habiendo recibido el tratamiento térmico en el horno y se puedan producir roturas en las fases siguientes, como es el cableado del cable o en las extrusoras de plástico si el cable es aislado.

#### 7.5.4 Trabajo redundante ( $\Phi$ )

El trabajo redundante ( $\Phi$ ) se define como la relación existente del trabajo total de deformación que se produce en el cambio dimensional.

Contribuye a que se produzca por la deformación un excesivo endurecimiento durante el proceso de trefilado, en especial en la superficie del hilo lo que limita el número de pasos por las hileras de reducción que se pueden hacer antes de que el tratamiento térmico tenga lugar.

$$(\Phi) = \frac{\Delta}{4.4} + 0.8$$

Siendo:

- $\Delta$ : parámetro Delta.

Al depender de Delta ( $\Delta$ ) cuanto más grande es este, mayor es el trabajo redundante ( $\Phi$ ) que se produce.

### 7.5.5 Desgaste de la hilera ( $P/\sigma$ )

Este parámetro que recibe el nombre de desgaste de la hilera, se asocia con la presión (P) que se genera en la hilera y que se hace más grande conforme aumenta el parámetro Delta ( $\Delta$ ).

Se puede dar en forma de ralladuras o de formaciones de anillos de desgaste en el cono de reducción de la hilera.

Se produce cuando ocurre lo siguiente:

- Se da un valor alto de Delta ( $\Delta$ ) en el proceso.
- Se dan reducciones pequeñas en el proceso.
- Se dan reducciones altas y ángulos grandes en el proceso.

El desgaste de la hilera tiene la siguiente forma:

$$\frac{P}{\sigma} = \frac{\Delta}{4} + 0.6$$

Siendo:

- P: presión generada en la hilera.
- $\sigma$ : resistencia promedio del material en tensión.
- $\Delta$ : parámetro Delta.

### 7.5.6 Reglas para un buen diseño de la hilera

En función de los parámetros vistos y de cómo afectan al proceso de trefilado, se pueden considerar estas reglas para un diseño correcto de la hilera:

- Ángulo ( **$2\alpha$** ) del cono de reducción: ni muy grande ( $>16^\circ$ ) ni muy pequeño ( $<12^\circ$ )
- Parámetro Delta ( **$\Delta$** ): intentar mantenerlo alrededor de 1.5.
- Trabajo redundante ( **$\Phi$** ): tiene que ser menor a 3.
- Desgaste de la hilera ( **$P/\sigma$** ): tiene que estar tan cerca de 1 como sea posible.

### 7.5.7 Criterio para evitar el agrietamiento central

Esta gráfica ha sido obtenida del libro “Z.Zimmerman-Wire Journal” y en ella de una forma orientativa, ya que no es para una aleación y carga de rotura en concreto, y la curva representada estará más arriba o más abajo en función de las propiedades del material, se da un criterio para evitar el **agrietamiento central**.

Se puede observar cómo según la **reducción de área en %** (eje vertical) y el **ángulo de reducción** que se esté aplicando (eje horizontal), la zona en la que se está moviendo.



Imagen 33: Criterio agrietamiento central

Del tal manera que podemos ver si se está en una zona en la que se produce el agrietamiento central o en una zona teóricamente segura en la que se evita este problema.

Este criterio y las anteriores reglas de los parámetros se han tenido en cuenta a la hora de crear el nuevo diseño de las hileras.

## 8 DISEÑO DE LAS NUEVAS HILERAS

Una vez estudiados los problemas que ocasionan los diferentes tipos de rotura del alambre, y los parámetros que afectan en el proceso de trefilado tales como % reducción de área, % alargamiento del hilo, los parámetros Delta ( $\Delta$ ), Trabajo redundante ( $\Phi$ ), Desgaste de la hilera ( $P/\sigma$ ) y la importante influencia del ángulo ( $2\alpha$ ) del cono de reducción, se procede a diseñar unas nuevas hileras para mejorar el proceso y evitar el tipo de rotura por **copa y cono**.

Para empezar se contactó con el proveedor de las hileras, Industrias Frasan S.L, para determinar las cotas internas de las hileras que se estaban utilizando hasta ese momento y así determinar las características que afectan en el proceso de trefilado para el juego de hileras de la MSM 85 y M85. Aunque el primer diseño de hileras y la primera prueba fue para la trefiladora MSM 85 ya que permite utilizar hileras con reducciones más altas.

HILERAS														
Ángulo	16	Bloque 1				Bloque 2				Bloque 3				Salida
HILERAS	Entrada	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Ø (mm)	9,52	8,495	7,550	6,731	5,996	5,342	4,759	4,239	3,777	3,364	2,997	2,670	2,379	2,110
radio (mm)		4,25	3,78	3,37	3,00	2,67	2,38	2,12	1,89	1,68	1,50	1,34	1,19	1,06
Área(mm²)	71,18	56,68	44,77	35,58	28,24	22,41	17,79	14,11	11,20	8,89	7,05	5,60	4,45	3,50
%Reducc.		0,204	0,210	0,205	0,206	0,206	0,206	0,206	0,206	0,207	0,206	0,206	0,206	0,213
% Alarga.		0,256	0,266	0,258	0,260	0,26	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,260	0,270
Delta		2,45	2,37	2,43	2,42	2,42	2,42	2,42	2,42	2,41	2,42	2,42	2,42	2,33
Desgaste		1,21	1,19	1,21	1,20	1,21	1,20	1,20	1,21	1,20	1,21	1,20	1,21	1,18
Trab.Redund.		1,41	1,40	1,41	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,39
Ataque		35%	32%	27%	32%	25%	22%	19%	17%	15%	13%	12%	10%	9%

Tabla 9: Calculo juego hilera tradicional

Para calcular esta tabla se hizo cada hilera en 3D mediante el software **Solidworks** y así poder determinar en cada una, el ataque del hilo sobre el cono de reducción y los demás parámetros.

Por defecto el proveedor disponía de un núcleo con un ángulo de embocadura de **60º** y lo mecanizaba con una altura de calibre del **35%** del diámetro de salida para cada hilera. El núcleo tiene unas dimensiones de **25x20 mm** hasta reducciones de diámetro 6 mm y de **17x20 mm** a partir de diámetro 6 mm hacia abajo.



Un ejemplo del cálculo de la primera hilera sería este:

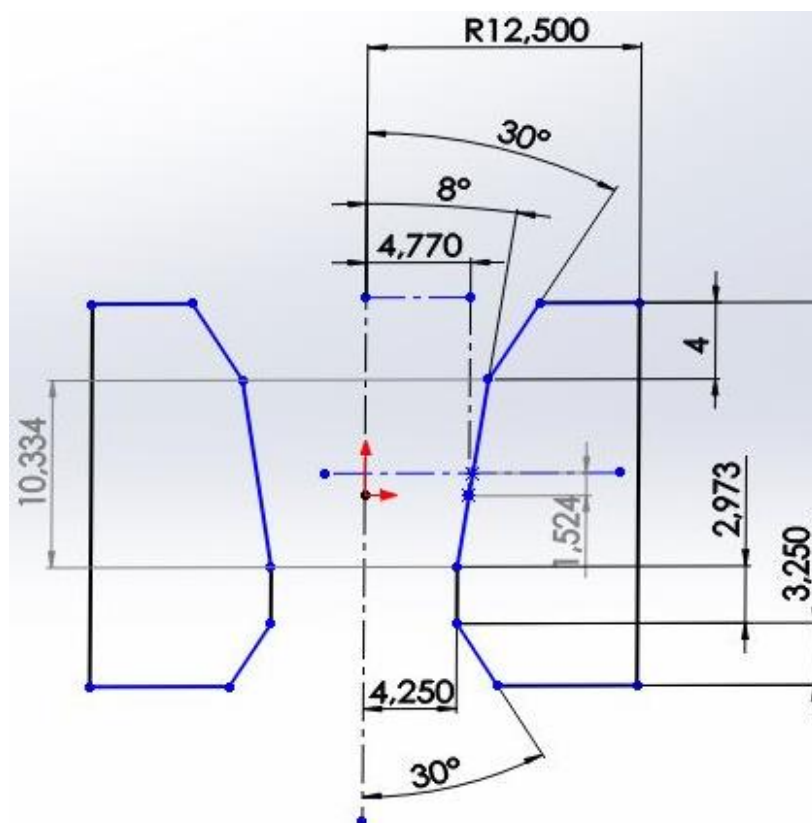
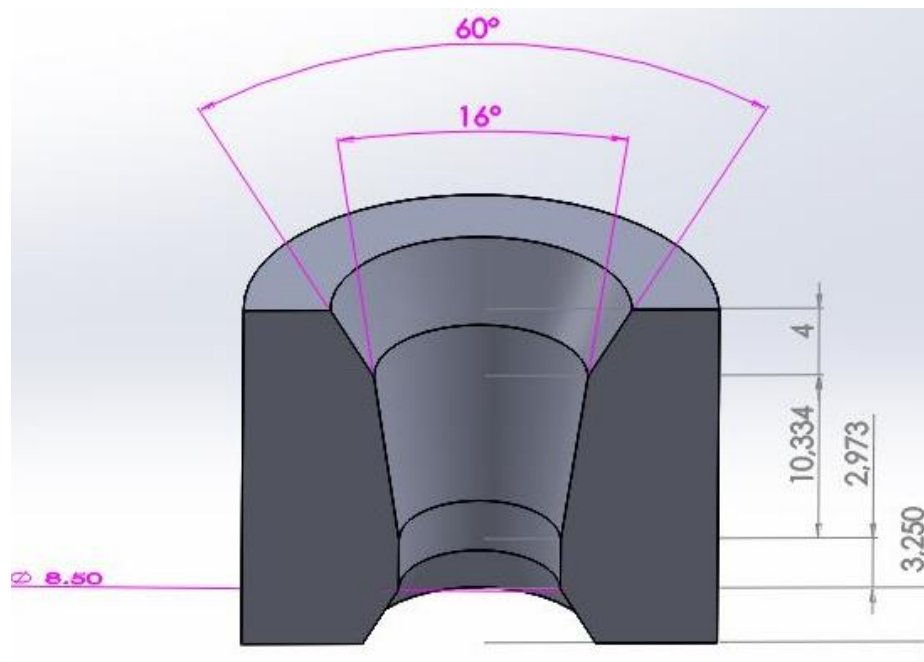


Imagen 34: Cotas internas hilera

Con las medidas de las cotas internas y sabiendo el diámetro del hilo que entra en la hilera, se calcula el % de la altura del cono de reducción donde pega el hilo de entrada.

Se puede observar en la tabla número 9 cómo se mantiene una reducción de área constante del 20,4% y un alargamiento del 26%.

Un parámetro Delta ( $\Delta$ ) de 2,42, un Desgaste ( $P/\sigma$ ) de 1,21 y un Trabajo Redundante ( $\Phi$ ) de 1,40.

Además se aprecia como el ataque del hilo sobre el cono de reducción es muy bajo, empezando en un 35% y bajando hasta el 9% en la última hilera, lo que ayuda a la creación anillos de desgaste internos, ya que como se había mencionado tiene que estar entre un 33% y un 66%.

Si se estima la zona en la que está este juego de hileras con estas reducciones y ángulo de  $16^\circ$  para evitar el agrietamiento central, se llega al siguiente resultado:

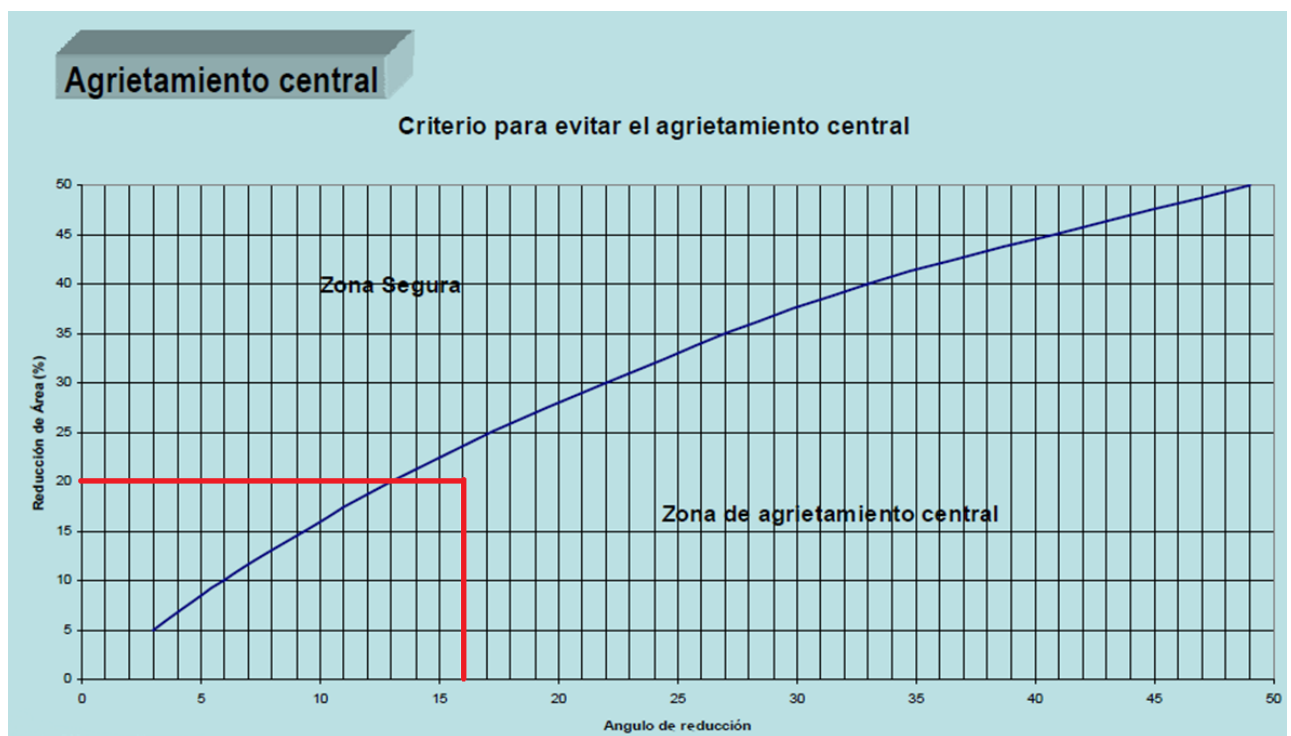


Imagen 35: Situación agrietamiento central antes

Por lo tanto, se encuentra en una zona propicia para el agrietamiento central y rotura de tipo **copa y cono**.

Ante esta situación, la medida que se tomó para el nuevo diseño de las hileras de la MSM 85 fue primero bajar el ángulo del cono de reducción a **12º** y **aumentar las reducciones de área** ya que está máquina lo permite.

A continuación se redujo la zona del calibre a un **25%** del diámetro final de salida para cada hilera, con el fin de tener menos zona de rozamiento.

Metiendo los datos en el programa Solidworks se obtienen los siguientes datos para el diseño del primer juego de hileras:

HILERAS														
Angulo	12	Bloque 1				Bloque 2				Bloque 3				salida
HILERAS	entrada	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Ø (mm)	9,54	8,414	7,419	6,532	5,740	5,034	4,405	3,830	3,320	2,890	2,566			2,340
radio (mm)		4,21	3,71	3,27	2,87	2,52	2,20	1,92	1,66	1,45	1,28			1,17
Área(mm²)	71,48	55,60	43,23	33,51	25,88	19,90	15,24	11,52	8,66	6,56	5,17			4,30
%Reducción		0,222	0,223	0,225	0,228	0,231	0,234	0,244	0,250	0,242	0,212			0,168
% Alargamiento		0,286	0,286	0,290	0,295	0,300	0,306	0,323	0,331	0,320	0,268			0,202
Delta		1,67	1,67	1,65	1,62	1,60	1,57	1,50	1,47	1,51	1,76			2,27
Desgaste		1,02	1,02	1,01	1,01	1,00	0,99	0,97	0,97	0,98	1,04			1,17
Trabajo Redund.		1,28	1,28	1,27	1,27	1,27	1,26	1,25	1,24	1,25	1,29			1,38
Ataque (%cono)		50%	43%	38%	42%	36%	32%	29%	25%	21%	16%			11%

Tabla 10: Primer diseño hileras

Con el juego de hileras propuesto para el primer diseño se ha conseguido reducir a **11 hileras** el juego, además podemos ver cómo han evolucionado los siguientes parámetros respecto a las que se tenían inicialmente:

- Las reducciones de área son mayores, de un 20,4% de antes a un **22,2 - 25%** ahora.
- El alargamiento también es mayor, en vez de ser constante de 26%, ahora empieza en **28,6%** y sube hasta un **33,1%**.
- Parámetro Delta ( $\Delta$ ): de 2,42 de antes pasa a un 1,67 incluso llegando a 1,46 en alguna hilera.
- Trabajo redundante ( $\Phi$ ): de 1,40 pasa a **1,24-1,28**.
- Desgaste de la hilera ( $P/\sigma$ ): de 1,21 pasa a **1**.
- El ataque del hilo ha mejorado, empezando en un **50%** y llegando a un **11%** frente al 35-9% de antes.

Si se estima la zona en la que está este juego de hileras con las nuevas reducciones y ángulo de **12°** para evitar el agrietamiento central, se llega al siguiente resultado:

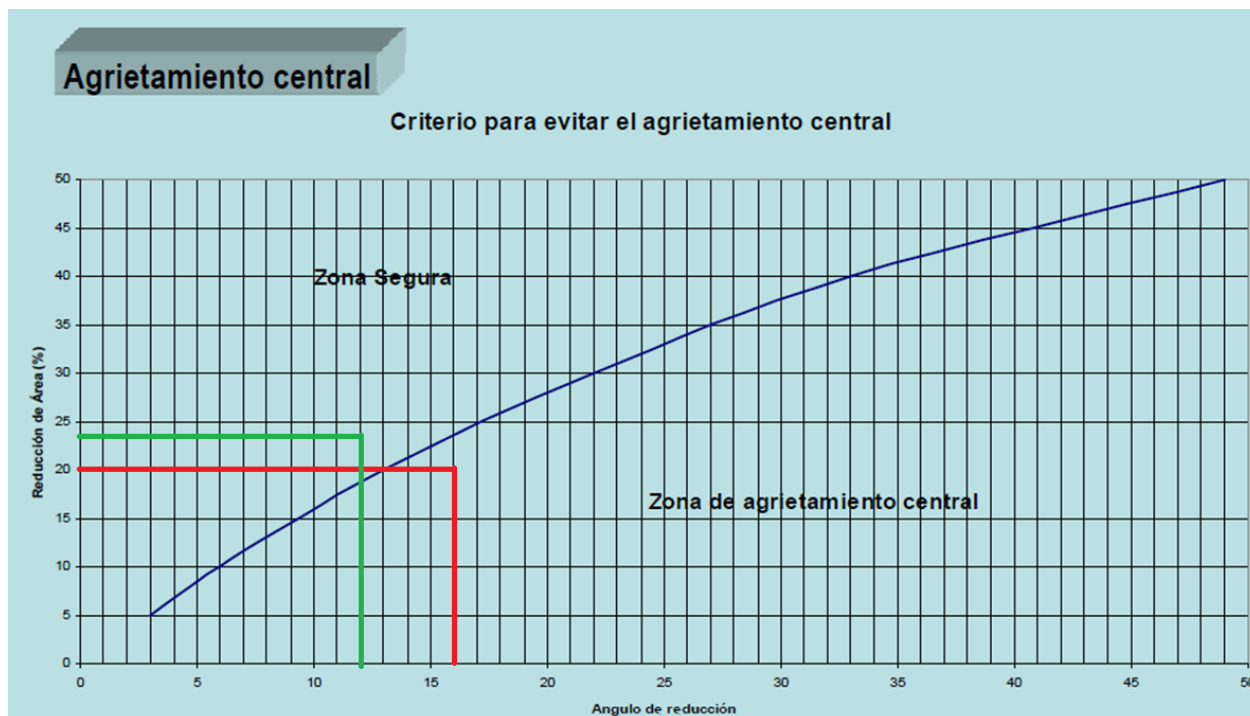


Imagen 36: Situación agrietamiento central después

Se observa mejoría respecto a la situación anterior (color rojo) que estaba en zona en la que se produce agrietamiento central y la del nuevo juego de hileras (color verde) que se encuentra en **zona segura**.



Imagen 37: Primer juego diseño de hileras

Este es el juego de hileras que se diseñó para la trefiladora MSM 85 que se recibió el 22 de Marzo de 2018, cuyos **planos de fabricación** se encuentran en el Anexo de este documento.

Con este juego nuevo se realizaron las primeras pruebas en la MSM 85, y se trefiló en el primer día un rollo del proveedor MIDAL de **aleación 6201** y una carga de 197 MPa para un diámetro de 2,32 mm a una velocidad de 14 m/s y después se intentó trefilar un rollo que no se pudo trefilar en la M 85 del proveedor OAPIL de **aleación 6101 AL5** con una carga de 191,2 MPa pero se producían roturas continuamente del tipo **cristalización**, por lo que se decidió trefilarlo a un diámetro final de 3,32 mm ,menos problemático, y se consiguió.

Se continuó haciendo pruebas para diferentes diámetros de salida durante esas semanas, con resultados satisfactorios en lo que a roturas por **copa y cono** se refiere, puesto que no volvió salir ninguna, y se notó mejoría en el **rendimiento de los motores** que realizaban menos esfuerzo para un mismo diámetro de salida y velocidad.

Un ejemplo del esfuerzo de los motores para un diámetro de 3,15mm y 8m/s antes de poner el juego nuevo y después, obtenido de la pantalla de la máquina trefiladora:

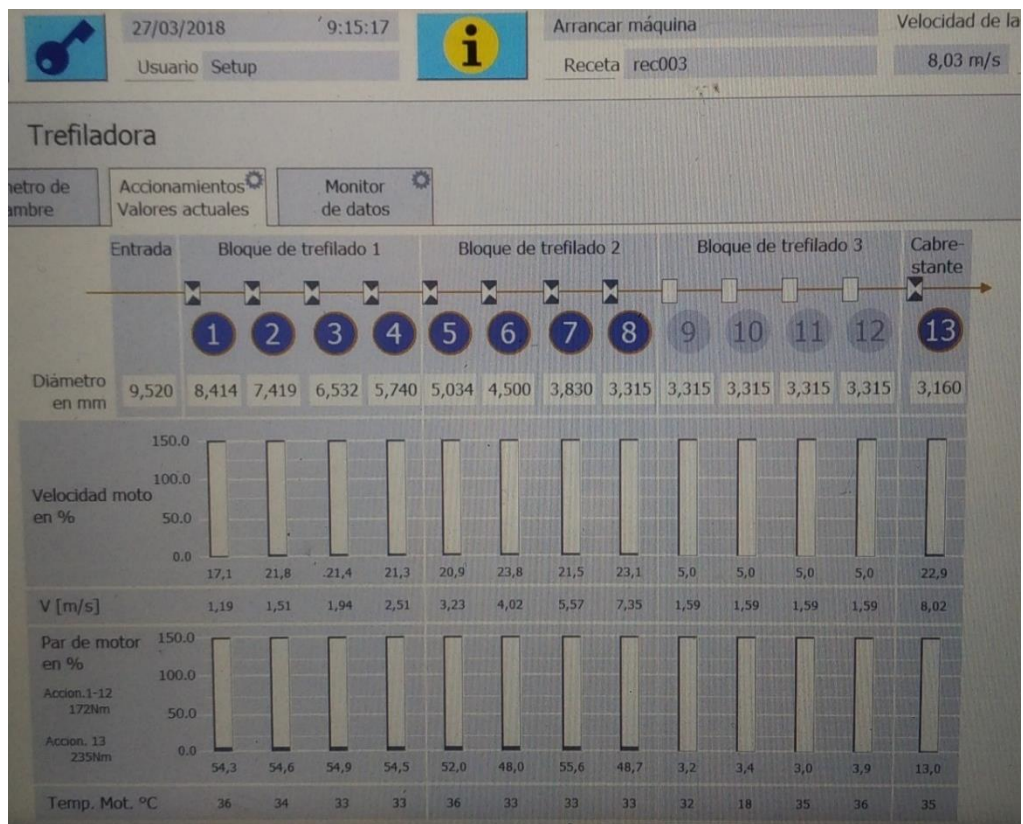
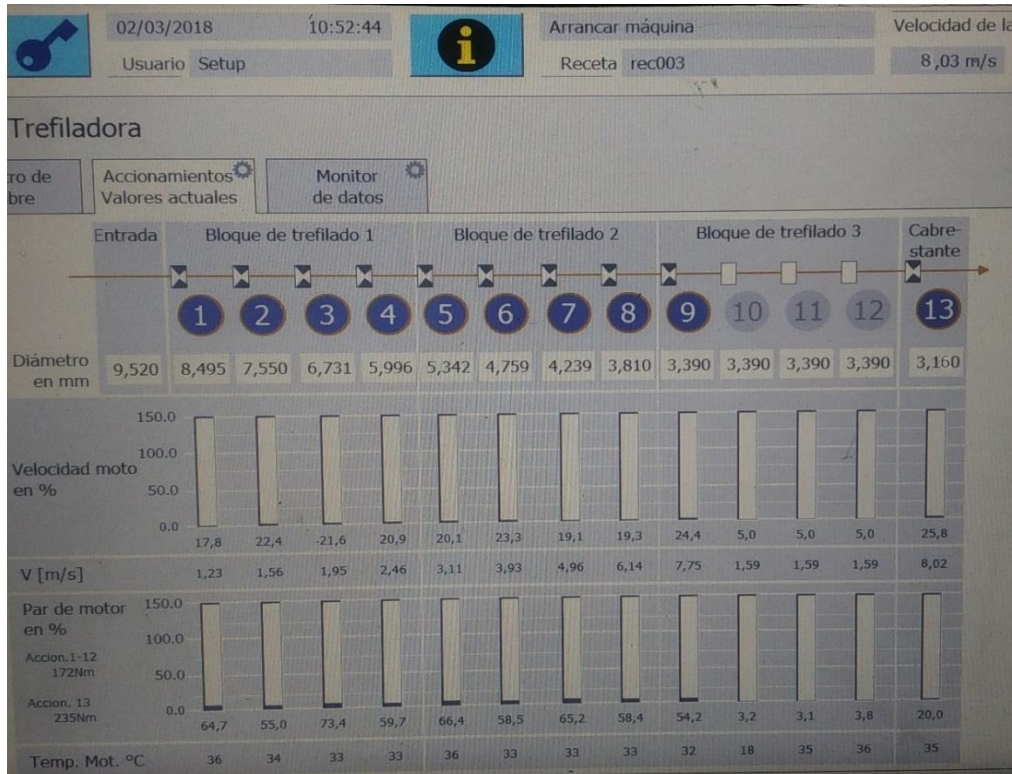


Imagen 38: Pantalla Par motor 02/03/18 vs 27/03/2018

HILERA	CONSUMO ANTES (Nm)	CONSUMO DESPUÉS (Nm)	VARIACIÓN CONSUMO
1	64,7	54,3	-16,1%
2	55	54,6	-0,7%
3	73,4	54,9	-25,2%
4	59,7	54,5	-8,7%
5	66,4	52	-21,7%
6	58,5	48	-17,9%
7	65,2	45,6	-30,1%
8	58,4	46,7	-20,0%
9	54,2	3,2	-94,1%
10	3,2	3,4	6,2%
11	3,1	3	-3,2%
12	3,8	3,9	2,6%
13	20	13	-35,0%

Tabla 11: Consumos Par motor

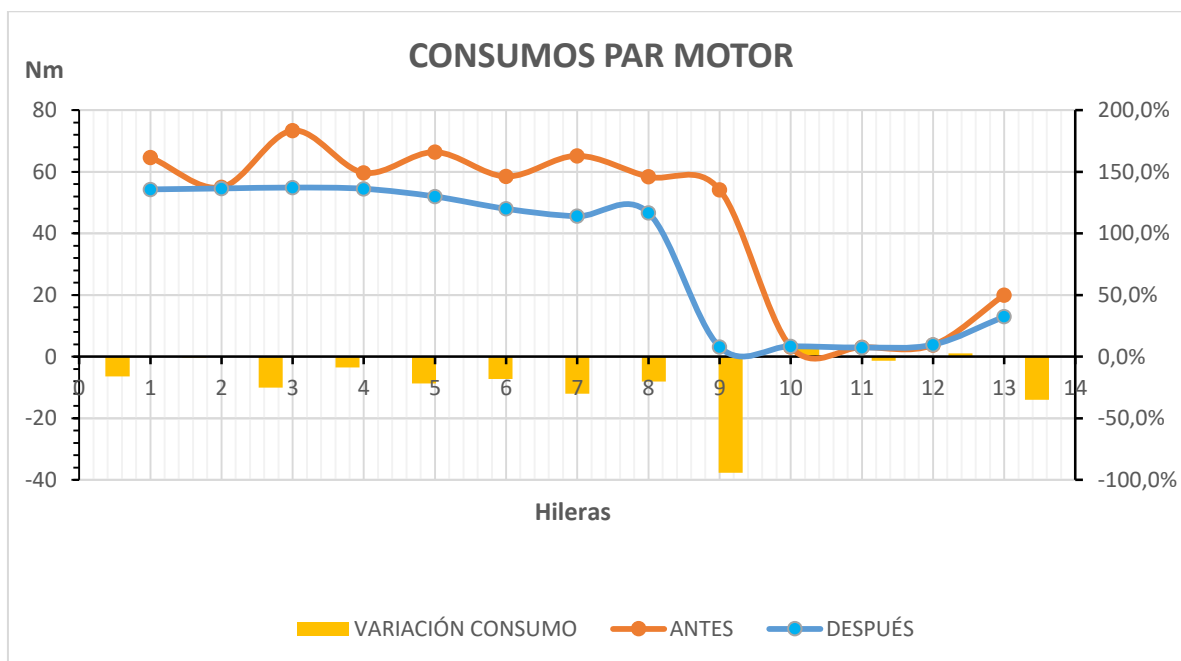


Imagen 39: Consumos Par motor

Se aprecia notablemente la mejoría, cuando en la situación de antes (color rojo), los consumos del motor eran más elevados y no seguían una línea decreciente mientras que con las nuevas hileras (color azul), los consumos son inferiores y sí siguen una tendencia decreciente, por lo que se obtiene un consumo de energía menor.

En la hilera 9 hay tanta diferencia debido a que con el juego nuevo al tener mayores reducciones para llegar al diámetro final de 3,16 mm se realiza con una hilera menos enhebrada.

Aunque se resolvió el problema de la rotura por **copa y cono**, a las 2 semanas aproximadamente de utilización, las hileras se empezaron a desgastar y el problema que se empezó a dar fue la rotura por **cristalización del hilo**.

Se llegó a la conclusión de que al haber cerrado el ángulo a  $12^{\circ}$  se había solventado el problema de copa y cono pero esto a su vez producía mayor fricción en el interior de la hilera, peor **lubricación**, desgastando las hileras y que el hilo cogiera acritud hasta **cristalizar** y romper.

Ante esta situación se hizo un rectificad de las hileras y se mandó mecanizar el ángulo de la **embocadura** que por defecto era de  $60^{\circ}$  a un ángulo mayor de  **$100^{\circ}$** , para permitir una mayor cantidad de lubricante en la entrada de la hilera.

Además de este juego para rectificar, se encargó el juego con las reducciones fijas de la M85, con los mismos requerimientos que se especificaron en los planos de la MSM85.



Ambos llegaron el 13 de Abril de 2018:



Imagen 40: Segundo juego diseño hileras

Con la mecanización del ángulo de embocadura a **100°** se notó mejoría en las pruebas, aumentó la vida de las hileras gracias a la mejora de lubricación, pero según el material que se trefilase y el diámetro requerido, aunque la rotura de **copa y cono** continuó sin salir de nuevo, las roturas por **cristalización** del hilo seguían apareciendo.

Lo siguiente que se hizo para intentar remediar el problema fue combinar hileras de ángulos de 16° y de 12° que son de los que de disponía en ese momento, de manera que al no tener todas las hileras de 12° el material no cogiera tanta acritud para acabar **cristalizando**, pero tampoco todas de 16°, para que no provocara el agrietamiento central y finalmente la rotura por **copa y cono**, y el resultado fue muy satisfactorio.

En base a distintas pruebas que se fueron haciendo con distintas aleaciones, distintos proveedores, distintas cargas de rotura y diferentes diámetros finales se estableció una estandarización orientativa de cómo montar los juegos de hileras en la máquina, para que los operarios en función de la orden de trabajo sepan de una manera aproximada como montarla.

Además por decisión de la dirección de la empresa de que la máquina por excelencia para trefilar aleación es la M85 (de reducciones fijas) se diseñaron las **hileras definitivas** con las reducciones de la M85 para las dos trefiladoras, con ángulos de **16°,14° y 12°** con el objetivo de trefilar de la misma manera en una máquina como en la otra y disponer de stock de hileras en caso de necesitar un recambio.

Este **juego definitivo** también tiene un ángulo de embocadura de 100° en las hileras de 14° y 12°, en las de 16° de cono de reducción son de 60° ya que no es tan crucial y aligera el plazo de entrega ,y todas las hileras tienen un calibre del 25% del diámetro de salida.

Todas las cotas están reflejadas en los planos de las hileras finales adjuntos en el Anexo.

En estas tablas se pueden observar los parámetros Delta ( $\Delta$ ), Trabajo redundante ( $\Phi$ ) y el Desgaste de la hilera ( $P/\sigma$ ) para los diferentes ángulos del cono de reducción ( $12^\circ, 14^\circ, 16^\circ$ ).

HILERAS													
Angulo	12	Bloque 1				Bloque 2				Bloque 3			
HILERAS	Entra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\varnothing$ (mm)	9,54	8,548	7,676	6,892	6,189	5,558	4,990	4,481	4,024	3,613	3,245	2,910	2,610
		4,274	3,838	3,446	3,095	2,779	2,495	2,241	2,012	1,807	1,623	1,455	1,305
Área(mm <sup>2</sup> )	71,480	57,388	46,276	37,306	30,084	24,262	19,556	15,770	12,718	10,252	8,270	6,651	5,350
%Reducción		0,197	0,194	0,194	0,194	0,194	0,194	0,194	0,194	0,194	0,193	0,196	0,196
% Alarg.		0,246	0,240	0,240	0,240	0,240	0,241	0,240	0,240	0,240	0,240	0,243	0,243
Delta		1,909	1,948	1,946	1,949	1,950	1,945	1,949	1,949	1,946	1,952	1,924	1,927
Desgaste		1,077	1,087	1,086	1,087	1,087	1,086	1,087	1,087	1,086	1,088	1,081	1,082
Trab.Red.		1,318	1,325	1,324	1,325	1,325	1,324	1,325	1,325	1,324	1,325	1,321	1,321
Ataque		45%	38%	34%	37%	33%	29%	26%	23%	20%	18%	16%	15%

Tabla 12: Diseño final ángulo 12°

HILERAS													
Angulo	14	Bloque 1				Bloque 2				Bloque 3			
HILERAS	Entra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\varnothing$ (mm)	9,54	8,548	7,676	6,892	6,189	5,558	4,990	4,481	4,024	3,613	3,245	2,910	2,610
		4,274	3,838	3,446	3,095	2,779	2,495	2,241	2,012	1,807	1,623	1,455	1,305
Área(mm <sup>2</sup> )	71,480	57,388	46,276	37,306	30,084	24,262	19,556	15,770	12,718	10,252	8,270	6,651	5,350
%Reducción		0,197	0,194	0,194	0,194	0,194	0,194	0,194	0,194	0,194	0,193	0,196	0,196
% Alarga.		0,246	0,240	0,240	0,240	0,240	0,241	0,240	0,240	0,240	0,240	0,243	0,243
Delta		2,228	2,273	2,270	2,273	2,274	2,269	2,273	2,274	2,270	2,277	2,245	2,248
Desgaste		1,157	1,168	1,168	1,168	1,169	1,167	1,168	1,168	1,168	1,169	1,161	1,162
Trab.Red.		1,371	1,379	1,378	1,379	1,379	1,378	1,379	1,379	1,378	1,379	1,374	1,375

Tabla 13: Diseño final ángulo 14°

HILERAS													
Angulo	16	Bloque 1				Bloque 2				Bloque 3			
HILERAS	Entra	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Ø (mm)	9,54	8,548	7,676	6,892	6,189	5,558	4,990	4,481	4,024	3,613	3,245	2,910	2,610
		4,274	3,838	3,446	3,095	2,779	2,495	2,241	2,012	1,807	1,623	1,455	1,305
Área(mm <sup>2</sup> )	71,480	57,388	46,276	37,306	30,084	24,262	19,556	15,770	12,718	10,252	8,270	6,651	5,350
%Reducción		0,197	0,194	0,194	0,194	0,194	0,194	0,194	0,194	0,194	0,193	0,196	0,196
% Alarga		0,246	0,240	0,240	0,240	0,240	0,241	0,240	0,240	0,240	0,240	0,243	0,243
Delta		2,546	2,598	2,594	2,598	2,599	2,593	2,598	2,599	2,594	2,602	2,565	2,569
Desgaste		1,236	1,249	1,249	1,250	1,250	1,248	1,250	1,250	1,249	1,251	1,241	1,242
Trab.Red		1,424	1,433	1,432	1,433	1,433	1,432	1,433	1,433	1,432	1,434	1,428	1,428

Tabla 14: Diseño final ángulo 16°

En la siguiente tabla de manera orientativa, en función del material, proveedor y carga de rotura se puede montar el juego y en base a los resultados que se obtengan poder actuar para corregir el problema.

VARILLA		HILERAS												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
		mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
		8,548	7,676	6,892	6,189	5,558	4,99	4,481	4,024	3,613	3,245	2,91	2,61	2,32
Tipo material	Carga rotura (MPa)	GRADOS												
AL5 OAPIL	190-205	16	16	14/16	12/14	12	12	12	12	12	12	12	12	12
6201 OAPIL	180-200	16	16	16	16	16	16	16	12/14	12/14	12	12	12	12
AL3 OAPIL	160-180	16	16	16	16	16	16	16	16	16	14/16	14/16	14/16	14/16
AL3 MIDAL	160-170	16	16	16	16	16	16	16	16	16	14/16	14/16	14/16	14/16
6201 MIDAL	180-200	16	16	16	16	14/16	14/16	12/14	12/14	12/14	12/14	12/14	12/14	12/14
LAMIFIL LA608	190-200	16	16	16	16	16	16	16	14/16	14/16	12	12	12	12

Tabla 15: Tabla orientativa

En el caso de que las roturas sean problema de imperfecciones de la materia prima como se vio en el apartado de tipo de roturas, poco se puede hacer al respecto salvo **sanear** algunos metros de material.

En el caso de que la rotura sea debido al proceso de trefilado sí se podrá actuar en consecuencia, como en los dos casos más comunes, rotura por **copa y cono** y rotura por **cristalización**.

Si se da el caso de que la rotura que se produce es **copa y cono**, lo que hay que hacer es **reducir el ángulo** del cono de reducción de las hileras para evitar el estallido central.

#### **Ejemplo copa y cono:**

Si las últimas 3 hileras tienen ángulo de 12, cambiar las 3 hileras anteriores a éstas por hileras con ángulo 12. Si continúa produciéndose el problema, seguir cambiando alguna hilera más en orden de menor diámetro a mayor.

Si se da el caso de que la rotura que se produce es **cristalización** del hilo, lo que hay que hacer justo lo contrario al problema de copa y cono, hay que **aumentar el ángulo** del cono de reducción de las hileras para proporcionar una menor fricción, una mejor lubricación y menos acritud al hilo.

#### **Ejemplo cristalización:**

Si las últimas 6 hileras tienen ángulo de 12°, cambiar las 3 hileras de mayor diámetro a un ángulo de 14° o 16°. Si continúa produciéndose el problema, seguir cambiando las siguientes en orden de mayor diámetro a hilera final.

## 9 TRATAMIENTO TÉRMICO

Como ya se ha mencionado de las dos aleaciones que se han utilizado en el estudio, la aleación **6201** y la aleación **6101**, la segunda tiene dos designaciones en función de las características que se quieran alcanzar después de tratarlas térmicamente.

La designación de **AL3** y **AL5** es el tipo de aleación después del **tratamiento térmico** que debe cumplir unas características según la norma **UNE-EN 50183**.

Características finales de los alambres después del tratamiento térmico

Tipo	Conductividad nominal	Diámetro nominal		Resistencia mínima a la tracción		Alargamiento mínimo después de rotura sobre 250 mm	Resistividad máxima	
		mayor de	igual o menor de	de cada alambre	media de un lote		de cada alambre	media de un lote
	% IACS	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%	nΩ·m	nΩ·m
AL2	52,5	1,50	3,50	325	–	3,0	32,84	–
		3,50	5,00	315	–	3,0	32,84	–
AL3	53,0	1,50	5,00	295	–	3,5	32,53	–
AL4	52,9	1,50	3,50	325	342	3,0	32,9	32,6
		3,50	5,00	315	330	3,0	32,9	32,6
AL5	55,25	1,50	5,00	295	–	3,5	32,2	31,2
AL6	55,6	1,50	3,50	314	–	3,5	31,5	31,0
		3,50	5,00	304	–	3,5	31,5	31,0
AL7	57,5	1,50	2,50	300	–	3,0	30,5	30,0
		2,50	3,00	290	–	3,0	30,5	30,0
		3,00	3,50	275	–	3,0	30,5	30,0
		3,50	4,00	265	–	3,0	30,5	30,0
		4,00	5,00	255	–	3,0	30,5	30,0

Tabla 16: Norma UNE-EN 50183

Según esta norma en función del diámetro nominal del alambre y del tipo que se quiera obtener, hay que cumplir con un requisito mínimo de conductividad en % IACS y de resistencia a tracción en N/mm<sup>2</sup>.

De esta manera si se quiere:

- **Tipo AL3:** mínimo 53 % IACS y 295 N/mm<sup>2</sup>.
- **Tipo AL5:** mínimo 55,25% IACS y 295 N/mm<sup>2</sup>.

De la misma manera la aleación 6201 tiene que cumplir los requisitos de la norma ASTM B398.

Diámetro (mm)	Carga Rotura (MPa)	%IACS
1,50-3,25	315	52,5
3,25-4,75	305	52,5

Tabla 17: Norma ASTM B398 6201

Para llevar a cabo los tratamientos térmicos se introducen los carretes en un horno industrial. El horno utilizado es el BERCO que está compuesto por 5 cuerpos por los que circula el aire caliente (gas o eléctrico) para calentar los carretes.

Los carretes avanzan a través del horno en una cadena, en cada cuerpo da 4 pasos de 20 minutos de ciclo hasta que entra en el siguiente cuerpo.



Imagen 41: Horno Berco industrial

## 10 ENSAYOS Y MEDICIONES

### 10.1 Índice de roturas

Para ver la evolución del proceso de trefilado con las nuevas pautas y diseño de hileras respecto a la situación anterior se evaluó con un índice de roturas.

Este índice está calculado dividiendo el número de roturas entre los kg totales producidos, de esta manera se obtiene el número de roturas por tonelada producida.

Semana	Índice M85 (Roturas/Ton)	Índice MSM85 (Roturas/Ton)	Kg M85	Roturas M85	Kg MSM85	Roturas MSM85
<b>Enero</b>	<b>2,49</b>	<b>7,94</b>	<b>24113</b>	<b>60</b>	<b>5792</b>	<b>46</b>
3	3,07	5,91	18868	58	5410	32
4	0,38	36,65	5245	2	382	14
<b>Febrero</b>	<b>6,95</b>	<b>8,45</b>	<b>17130</b>	<b>119</b>	<b>8522</b>	<b>72</b>
6	3,14	-	4136	13	0	0
8	94,83	9,43	116	11	636	6
9	7,38	8,37	12878	95	7886	66
<b>Marzo</b>	<b>3,31</b>	<b>1,92</b>	<b>31085</b>	<b>103</b>	<b>36474</b>	<b>70</b>
9	52,08	2,86	768	40	2450	7
10	0,00	0,00	192	0	2304	0
11	16,44	2,72	1947	32	8448	23
12	1,74	0,67	9748	17	5971	4
13	0,76	2,08	18430	14	17301	36
<b>Abril</b>	<b>1,58</b>	<b>4,59</b>	<b>43055</b>	<b>68</b>	<b>18935</b>	<b>87</b>
14	4,12	209,58	8488	35	167	35
15	-	1,79	0	0	6717	12
16	1,23	2,74	23573	29	12051	33
17	0,36	-	10994	4	0	7

Tabla 18: Índice de roturas

Se puede observar como en las semanas previas a la llegada del primer juego de hileras (22 Marzo-semana 12) el índice de roturas era grande, como por ejemplo en la semana 8 con un índice de 94,83 roturas/Ton, y con el primer diseño bajó notablemente en la semana 12 y 13.

En la semana 14, cuando las hileras se mandaron a rectificar, se volvieron a producir numerosas roturas con un índice excesivo de 209 roturas/Ton, sin embargo a partir del 13 de Abril-semana 15, que es cuando llegaron los dos juegos de hileras definitivos se redujo a niveles asumibles.



## 10.2 Ensayo metalográfico

Se mandaron muestras de las roturas tipo **copa y cono** al centro multidisciplinar de tecnologías para la industria **Cemitec** y al proveedor de la materia prima con el fin de que realizaran un análisis metalográfico.

En el informe recibido se detalla un análisis macrográfico y metalográfico de las muestras enviadas.

### 10.2.1 Ensayo macrográfico

Como ya se ha comentado anteriormente, el alambre presenta en ciertas zonas una fragilidad extrema y se ha comprobado que con un simple doblado manual se produce la fractura del alambre mientras que en zonas cercanas el comportamiento de doblado es correcto.

Así en las macrografías (imagen 42) se muestra un ejemplo donde se aprecia con claridad un doblado que produce fractura y otro donde el doblado es normal, en la (imagen 43) se muestra la fractura del alambre, observándose la copa y la punta del cono.

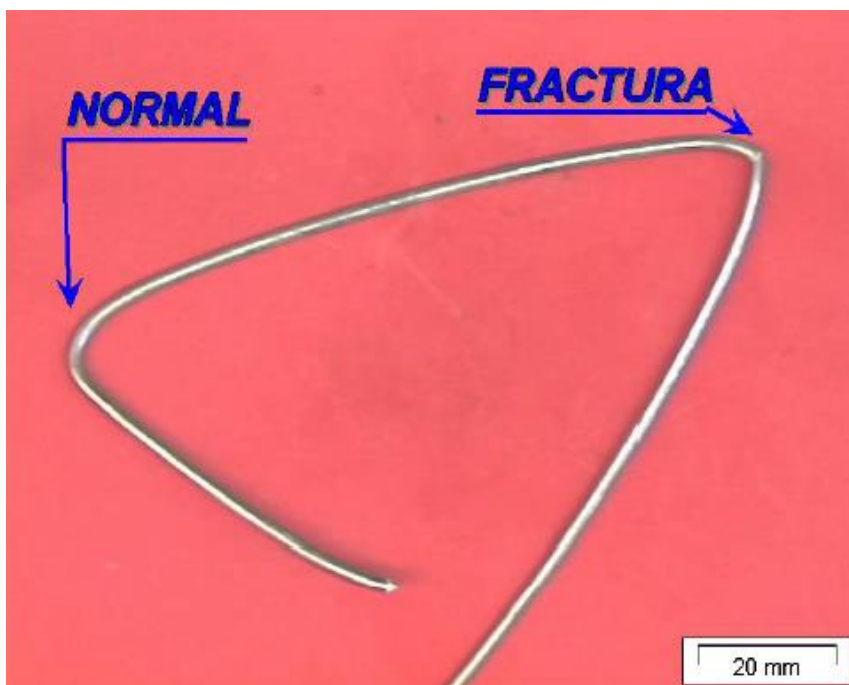


Imagen 42: Muestra fractura Cemitec

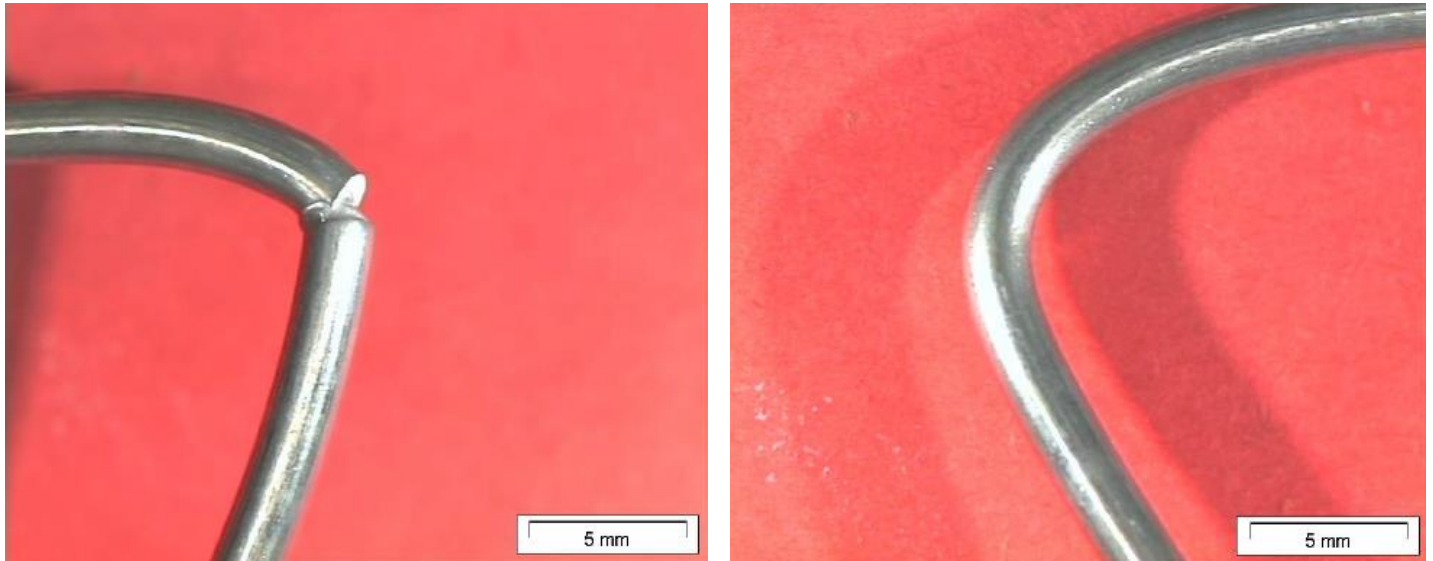


Imagen 43: Muestra fractura Cemitec

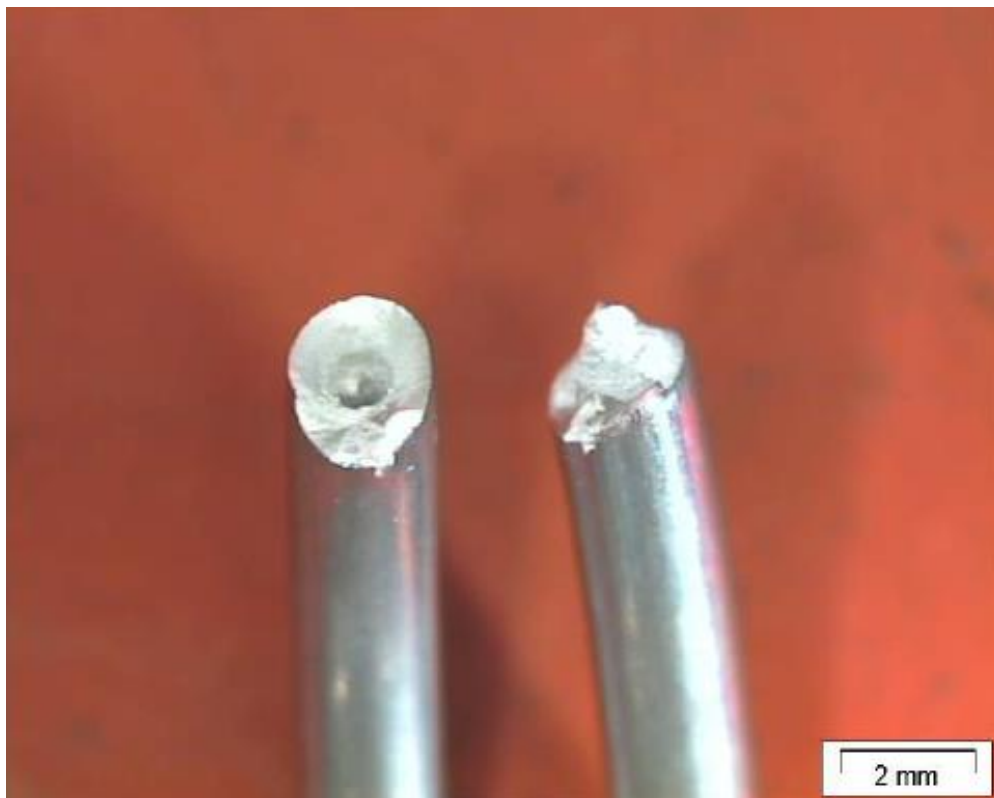


Imagen 44: Copa y cono Cemitec

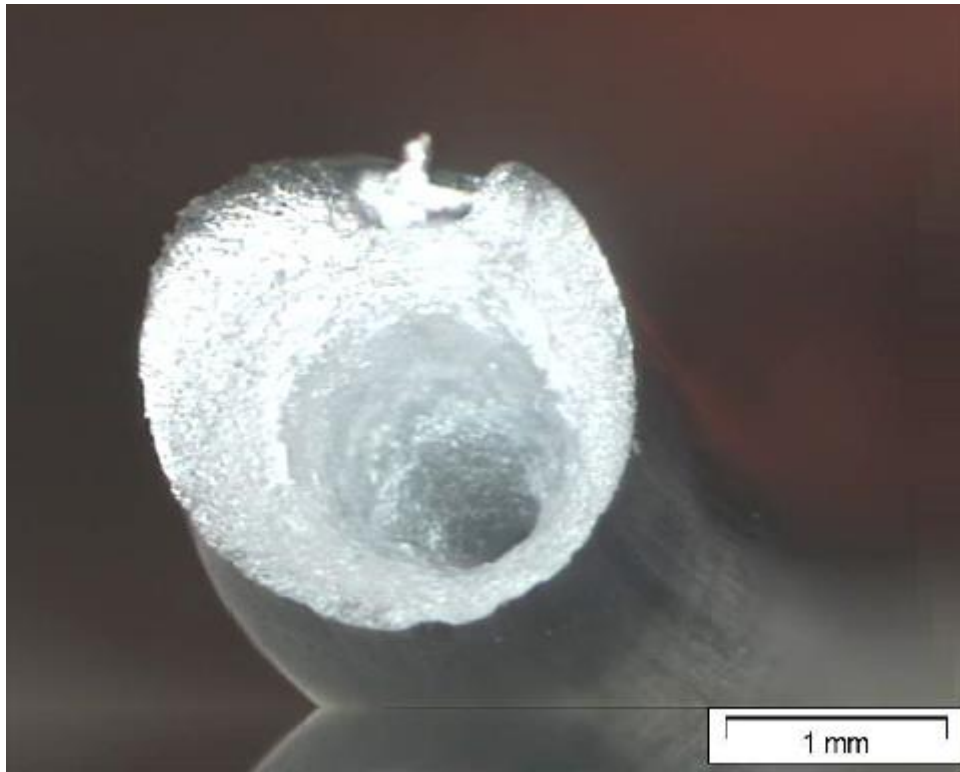


Imagen 45: Copa Cemitec



Imagen 46: Cono Cemitec

En observación mediante un microscopio electrónico de barrido (**M.E.B**) de la fractura del alambre pueden apreciarse dos zonas, la primera (imagen 47) es en la zona de base donde aparece una estructura superficial con aspecto de cúpulas de deformación que sigue a lo que parece ser un zona cuarteada en la superficie del alambre (imagen 48).

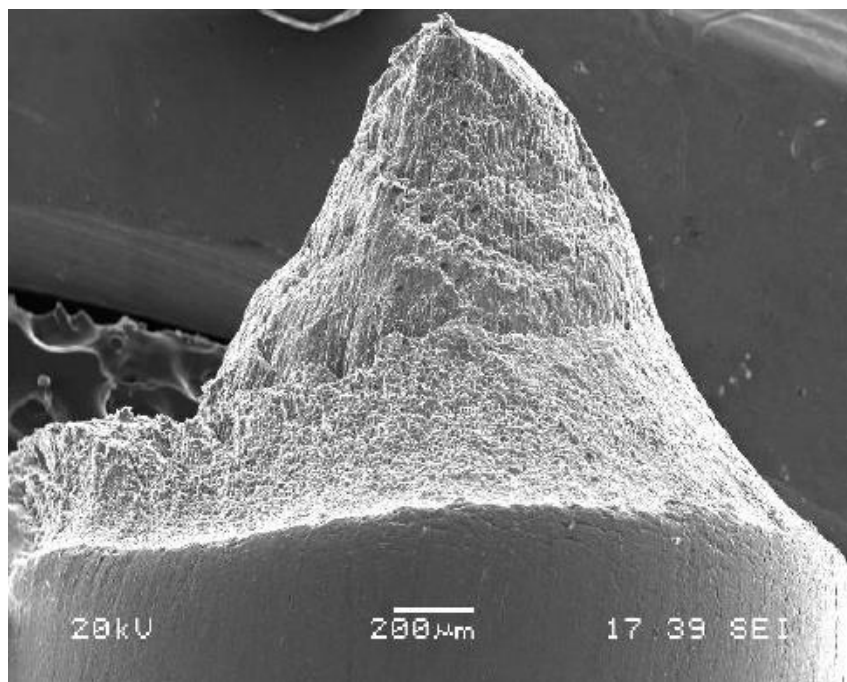


Imagen 47: M.E.B 200 um

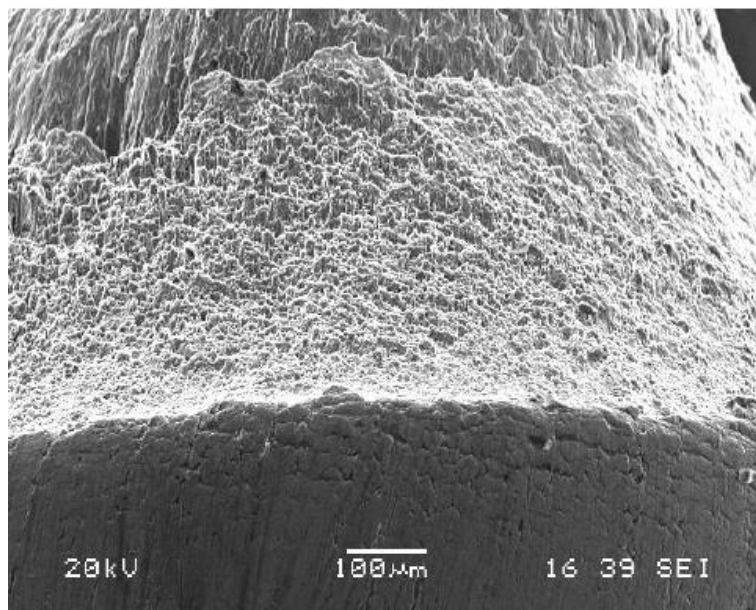


Imagen 48: M.E.B 100 um

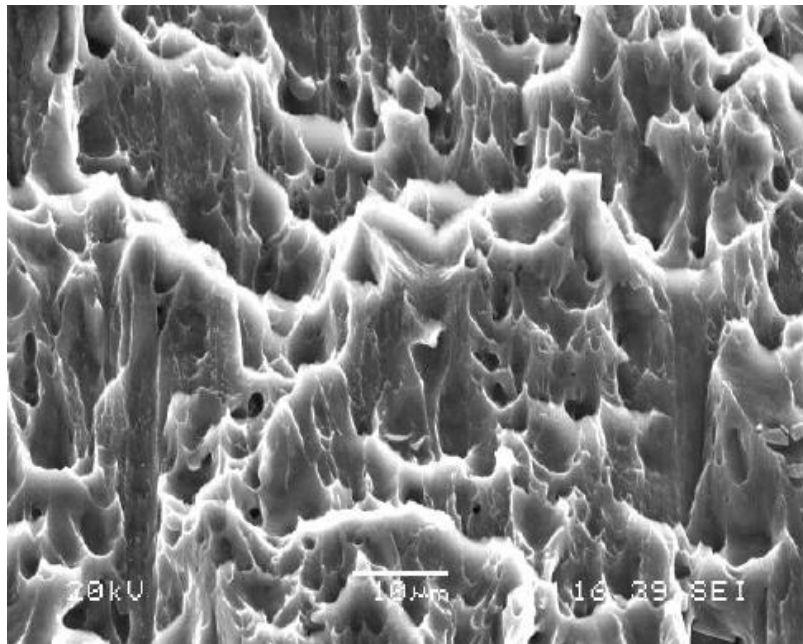


Imagen 49: M.E.B 10 μm

Por encima de esta región se observa una microestructura de tipo leñoso donde se observan estructuras alargadas y desgarradas mostrando la falta de cohesión en el interior del alambre.

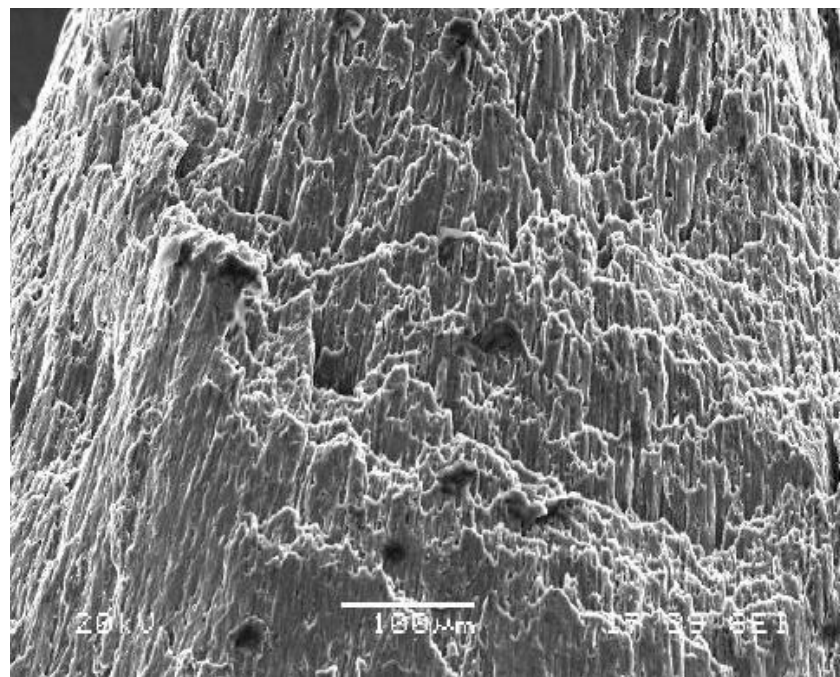


Imagen 50: M.E.B zona leñosa

### 10.2.1 Ensayo metalográfico

Para el ensayo metalográfico se procedió a la extracción y preparación de probetas metalográficas longitudinales al alambre en las zonas de fragilidad, donde se aprecian las siguientes características microestructurales:



Imagen 51: Probetas



Imagen 52: Copa y cono seccionado

La micrografía (imagen 52) muestra como el alambre presenta una serie de huecos internos que están directamente relacionados con el tipo de rotura analizado, y que cuando se hace el doblado coincide con uno de estos huecos internos, dejando a la vista el cono y el embudo(copa) interior.

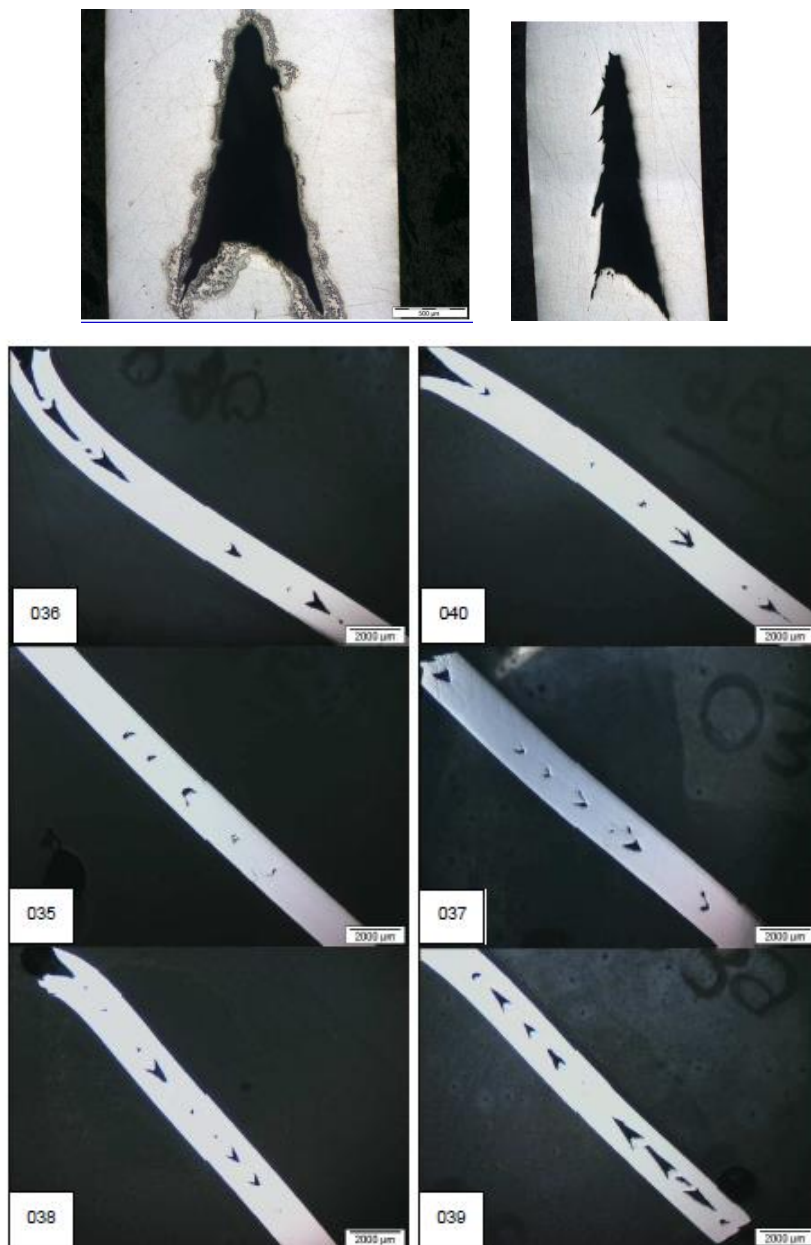


Imagen 53: Muestras seccionadas

En todos los casos los defectos internos presentan una morfología similar en forma de flecha con la punta indicando la dirección de trefilado. Estos huecos internos dejan una sección de material mínimos en la zona y esta sección útil no es capaz de soportar ni los mínimos esfuerzos.

A la vista de los ensayos se ha podido constatar que la debilidad del alambre viene ocasionada por la presencia de fallos internos o huecos en forma de flecha producidos durante el proceso de trefilado puesto que dichos defectos están orientados en la dirección de trefilado.

### 10.3 Ensayo Laboratorio

Con el siguiente ensayo en el laboratorio lo que se quiere comprobar es que, después de haber trefilado el material siguiendo las pautas dadas de trefilado con el diseño final de las hileras, se cumplen las especificaciones requeridas de carga de rotura y conductividad, tras pasar por el tratamiento térmico.

De esta manera también se podrá extrapolar los resultados obtenidos de la estufa de laboratorio al horno industrial.

Para ello se tomaron 3 muestras de diferentes diámetros y aleaciones:

- **Ø 2,32 mm, 6101 AL3** de proveedor Lamifil.
- **Ø 3,03 mm, 6201** de proveedor Oapil.
- **Ø 3,20 mm, 6101 AL5** de proveedor Oapil.

El primer paso es someter las diferentes muestras tomadas a un tratamiento térmico que se realiza en el laboratorio, en unas estufas (de la marca Indelab y P.Selecta) en las que las muestras van a estar 6 horas a diferentes temperaturas. Cada hora se retira una muestra para su posterior análisis.

Las temperaturas a las que se ha realizado el tratamiento son:

- **140°C-150°C-160°C-170°C-180°C**



Imagen 54: Estufas y muestras



Después del tratamiento se dejan atemperar las muestras para su posterior enderezamiento a través de un dispositivo de rodillos.

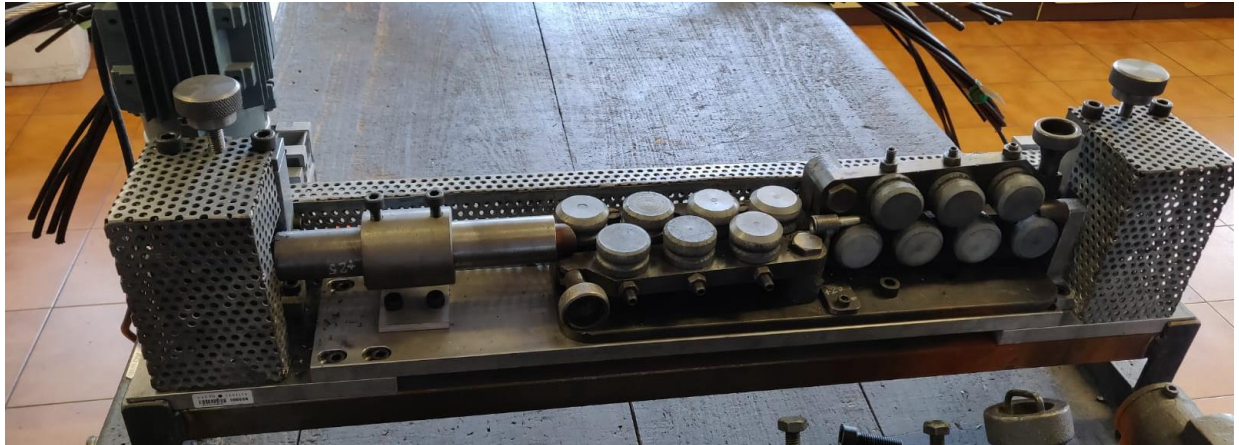


Imagen 55: Enderezador de rodillos

Una vez las muestras ya están a temperatura ambiente y enderezadas se pasa a medir su resistividad eléctrica en ( $m\Omega$ ) con lo que luego se puede calcular su conductividad eléctrica en %IACS que es la conductividad respecto del Cobre que es del 100%. Para ello se utilizó la Resistomat, una máquina de precisión electrónica para medir resistencias que es capaz de medir hasta  $1\ n\Omega$ .

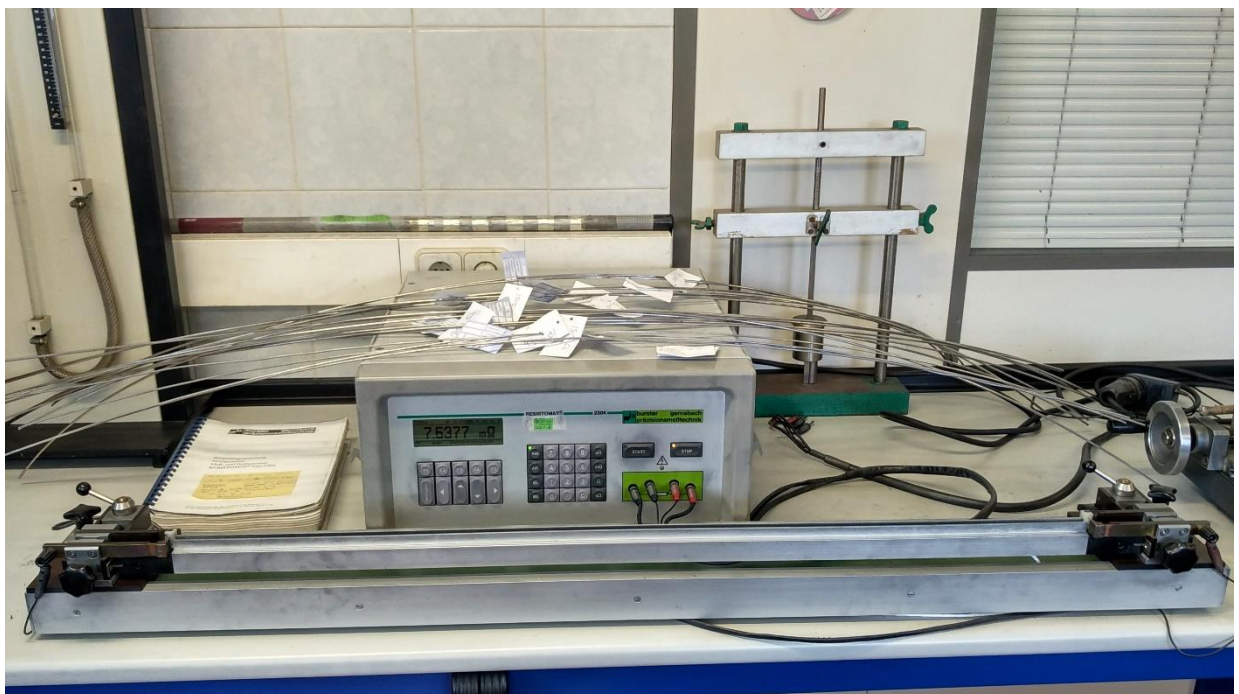


Imagen 56: Resistomat

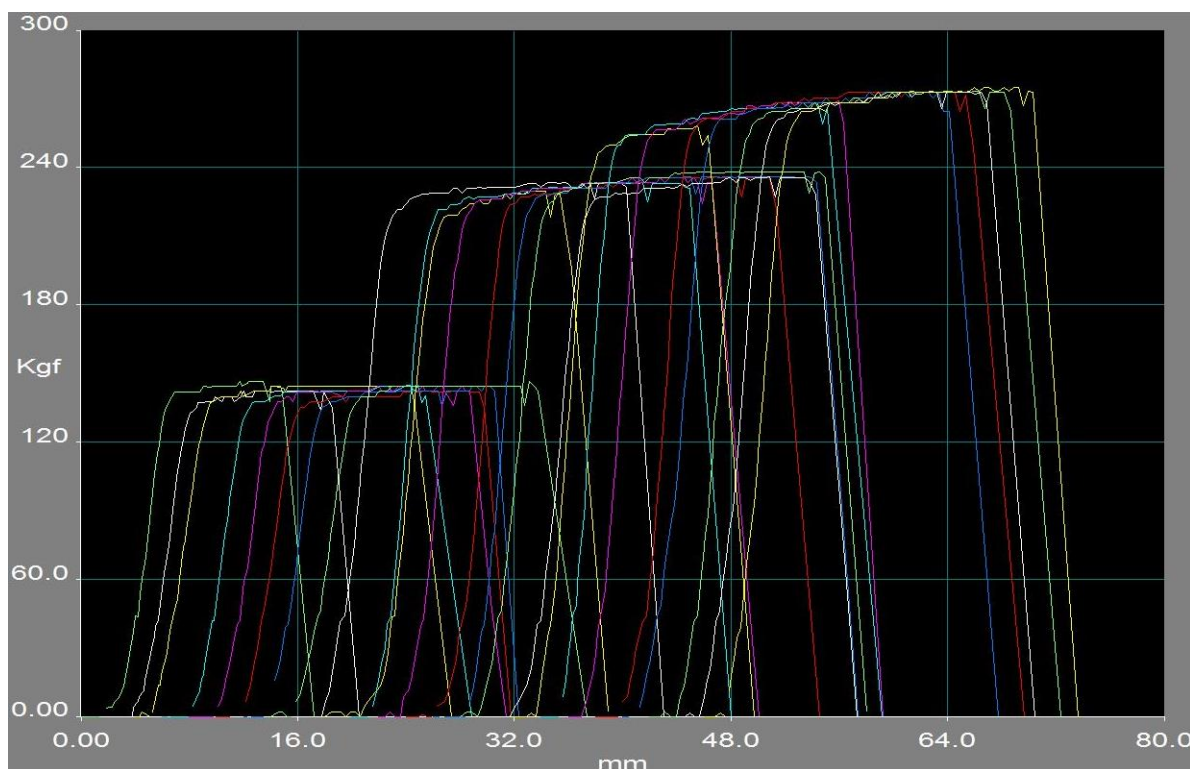
El último paso es medir la capacidad de carga de rotura del alambre, para ello se usa una máquina de tracción, de la marca Losenhausenwerk, cuya célula de carga llega hasta los 2000 Kg de fuerza.



Imagen 57: Máquina de tracción

En esta máquina se coloca la muestra de alambre en las mordazas y se aplica fuerza de tracción hasta que rompe, los datos quedan registrados en el ordenador creando unas gráficas en las que se aprecia la carga de rotura que soporta el alambre respecto al alargamiento del hilo.

Los resultados quedan de la siguiente manera:

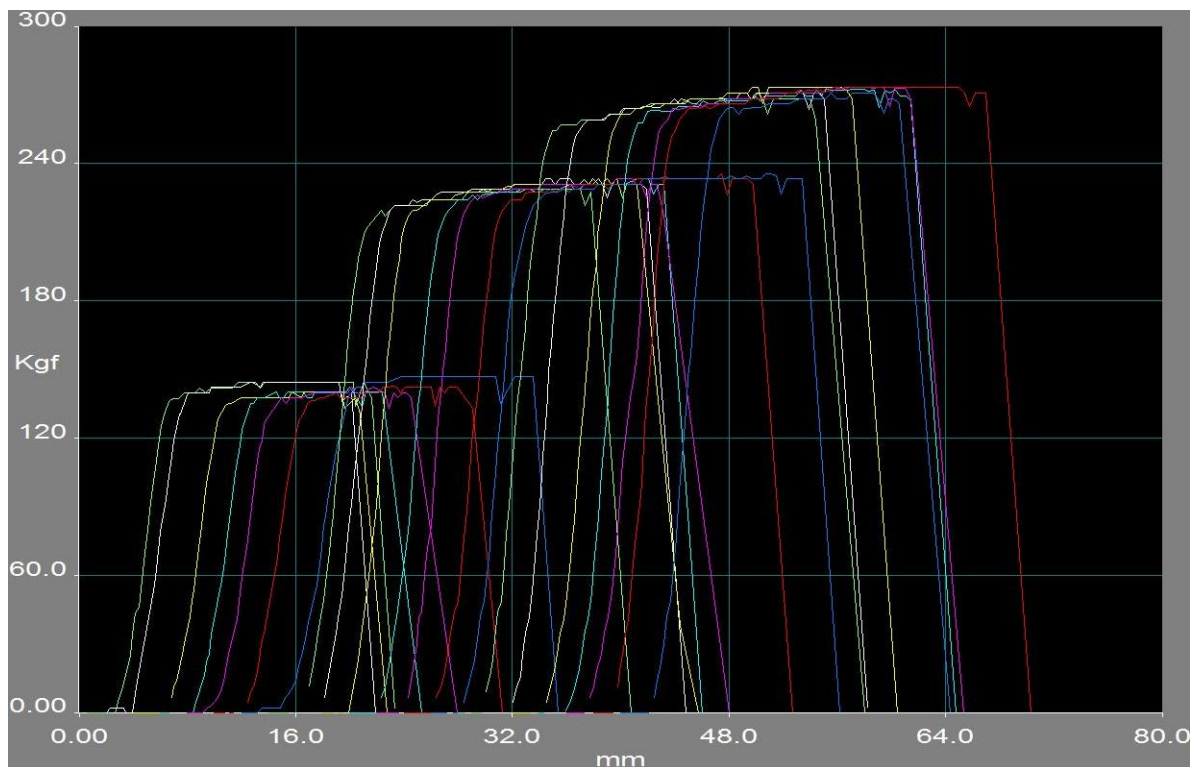


ESTUDIO TRATAMIENTOS ESTUFA 140° 18-05-2018 15:52 - Registra3

Ensayos Parámetros Editar Ver Ayuda

Resultados						
Nº	Diámetro Muestra (mm)	Fuerza Máxima (daN)	Tensión Máxima (MPa)	Deformación Máxima (mm)	Deformación Máxima (%)	Deformación Rotura (%)
Media	2.851	212.7	328.3	17.38	17.38	21.62
Desv...	0.382	52.09	7.774	3.124	3.124	4.058
Máximo	3.216	270.3	341.2	23.00	23.00	27.98
Mínimo	2.318	139.9	313.1	10.00	10.00	13.55
1	2.322	143.9	339.9	11.78	11.78	14.73
2	2.321	139.9	330.5	10.00	10.00	15.91
3	2.319	142.1	336.4	12.22	12.22	20.41
4	2.322	142.2	335.8	18.09	18.09	18.09
5	2.319	142.2	336.6	17.20	17.20	20.75
6	2.318	139.9	331.4	14.43	14.43	19.42
7	2.324	141.9	334.4	16.91	16.91	16.91
8	2.319	144.1	341.2	19.12	19.12	19.12
9	3.029	229.3	318.3	18.60	18.60	23.96
10	3.028	225.5	313.1	15.02	15.02	17.39
11	3.026	229.3	318.9	18.09	18.09	24.25
12	3.031	231.2	320.5	18.72	18.72	24.22
13	3.024	231.6	322.5	23.00	23.00	26.87
14	3.031	231.6	320.9	18.72	18.72	27.98
15	3.030	233.8	324.2	17.61	17.61	26.58
16	3.030	231.6	321.2	20.89	20.89	23.44
17	3.202	254.2	315.7	13.55	13.55	13.55
18	3.202	263.4	327.1	17.50	17.50	21.15
19	3.205	264.5	327.8	19.97	19.97	19.97
20	3.207	268.0	331.8	18.60	18.60	27.32
21	3.205	268.0	332.2	18.27	18.27	24.14

Imagen 58: Resultados Carga 140°C



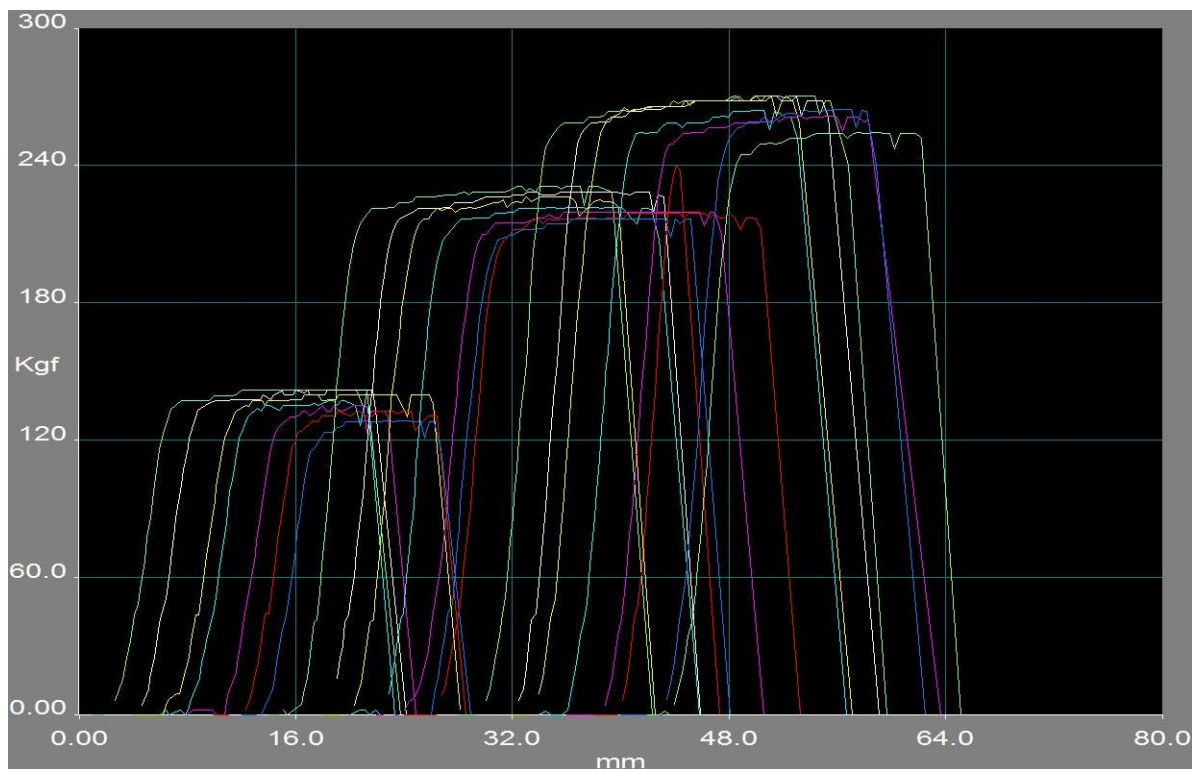
ESTUDIO TRATAMIENTOS ESTUFA 150° 22-05-2018 12:35 - Registra3

Ensayos Parámetros Editar Ver Ayuda

Resultados

Nº	Diámetro Muestra (mm)	Fuerza Máxima (daN)	Tensión Máxima (MPa)	Deformación Máxima (mm)	Deformación Máxima (%)	Deformación Rotura (%)
Media	2.852	212.5	327.5	17.70	17.70	0.000
Desv...	0.381	52.95	7.006	4.000	4.000	0.000
Máximo	3.213	268.5	338.9	24.70	24.70	0.000
Mínimo	2.319	137.6	313.0	10.59	10.59	0.000
1	2.321	142.1	335.9	14.65	14.65	0.000
2	2.320	142.1	336.2	10.59	10.59	0.000
3	2.319	137.6	325.8	11.74	11.74	0.000
4	2.324	139.9	329.8	13.99	13.99	0.000
5	2.319	139.9	331.1	12.11	12.11	0.000
6	2.320	140.1	331.5	13.14	13.14	0.000
7	2.331	144.6	338.9	13.81	13.81	0.000
8	3.024	224.8	313.0	18.97	18.97	0.000
9	3.031	229.3	317.8	18.49	18.49	0.000
10	3.025	229.3	319.0	20.34	20.34	0.000
11	3.026	229.3	318.8	21.30	21.30	0.000
12	3.030	229.3	318.0	17.68	17.68	0.000
13	3.025	231.6	322.2	23.48	23.48	0.000
14	3.029	231.6	321.4	24.70	24.70	0.000
15	3.207	266.0	329.3	22.15	22.15	0.000
16	3.201	266.0	330.5	18.90	18.90	0.000
17	3.213	268.3	330.9	17.76	17.76	0.000
18	3.205	267.4	331.5	21.23	21.23	0.000
19	3.201	268.5	333.7	20.75	20.75	0.000
20	3.206	268.5	332.7	20.45	20.45	0.000
21	3.206	266.0	329.5	15.54	15.54	0.000

Imagen 59: Resultados Carga 150°C



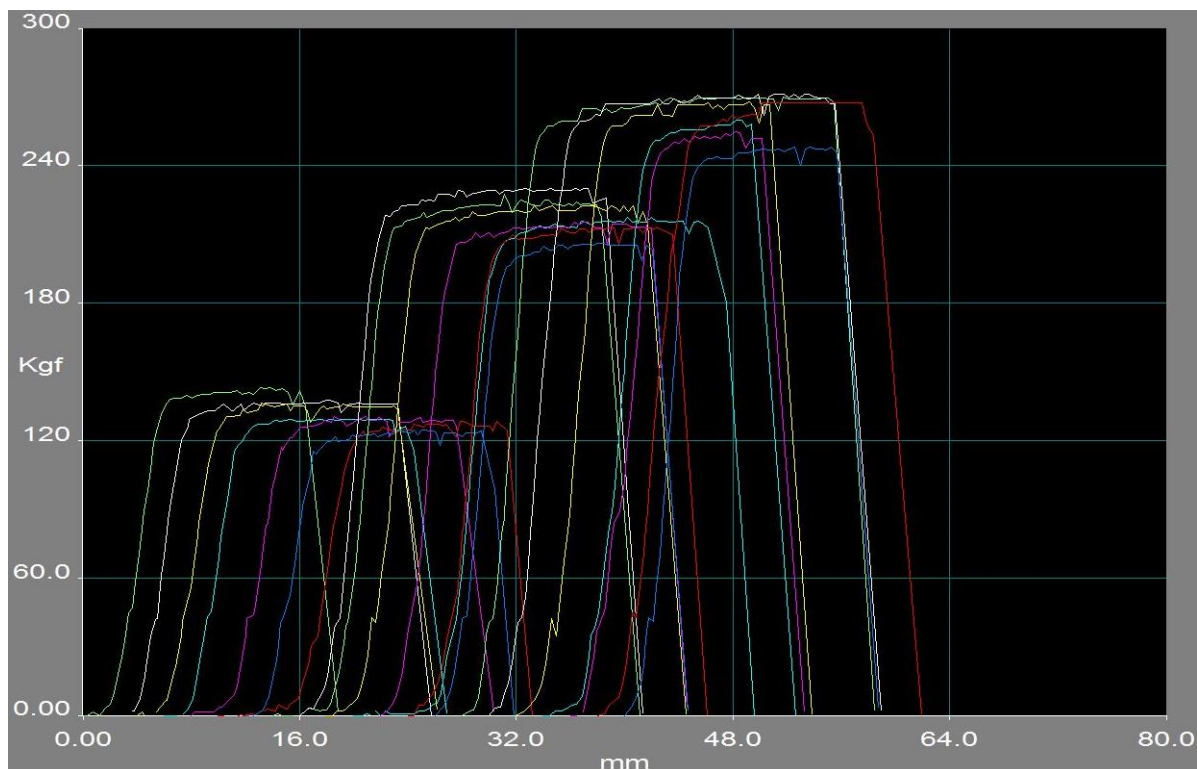
ESTUDIO TRATAMIENTOS ESTUFA 160°C 22-05-2018 15-23 - Registra3

Ensayos Parámetros Editar Ver Ayuda

Resultados

Nº	Diámetro Muestra (mm)	Fuerza Máxima (daN)	Tensión Máxima (MPa)	Deformación Máxima (mm)	Deformación Máxima (%)	Deformación Rotura (%)
Media	2.868	206.1	313.9	14.89	14.89	20.19
Desv...	0.378	51.91	12.21	3.935	3.935	4.858
Máximo	3.207	265.7	330.6	22.00	22.00	27.50
Mínimo	2.319	126.1	293.1	6.091	6.091	6.091
1	2.319	139.6	330.6	15.76	15.76	21.23
2	2.322	139.6	329.6	13.99	13.99	19.71
3	2.324	137.5	324.2	17.20	17.20	21.85
4	2.327	135.0	317.4	12.48	12.48	15.02
5	2.325	132.7	312.5	9.967	9.967	14.51
6	2.320	130.5	308.6	9.118	9.118	16.13
7	2.332	126.1	295.2	9.302	9.302	14.21
8	3.029	227.0	315.0	22.00	22.00	24.29
9	3.028	224.4	311.6	17.13	17.13	26.80
10	3.029	222.1	308.2	15.06	15.06	21.15
11	3.029	217.8	302.3	14.65	14.65	21.93
12	3.026	215.9	300.2	14.95	14.95	24.95
13	3.025	215.2	299.4	16.57	16.57	25.58
14	3.029	212.9	295.5	10.48	10.48	18.83
15	3.202	265.7	329.9	20.75	20.75	27.50
16	3.201	265.7	330.1	21.11	21.11	24.88
17	3.206	265.7	329.1	16.50	16.50	20.67
18	3.202	259.4	322.1	15.80	15.80	18.53
19	3.202	256.8	318.9	17.31	17.31	22.33
20	3.201	235.9	293.1	6.091	6.091	6.091
21	3.207	260.0	321.9	15.87	15.87	18.20

Imagen 60: Resultados Carga 160°C

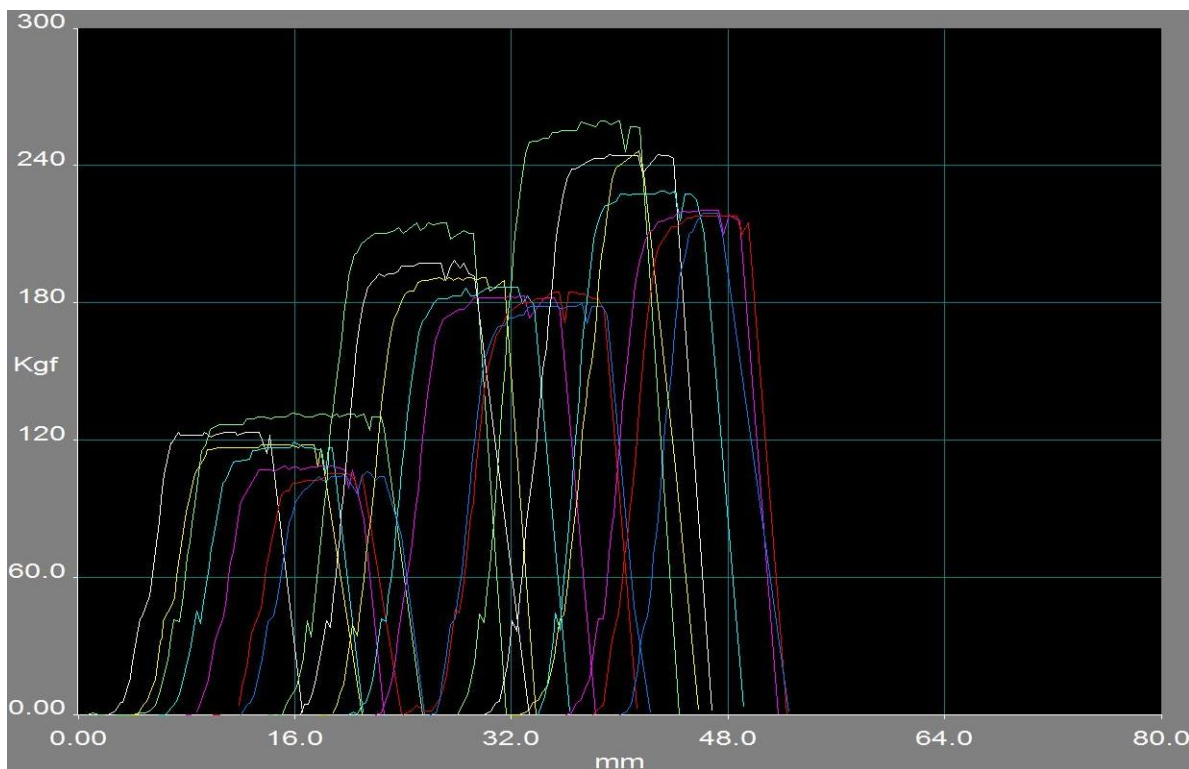


ESTUDIO TRATAMIENTOS ESTUFA 170°C 23-05-2018 12:16 - Registra3

Ensayos Parámetros Editar Ver Ayuda

Resultados						
Nº	Diámetro Muestra (mm)	Fuerza Máxima (daN)	Tensión Máxima (MPa)	Deformación Máxima (mm)	Deformación Máxima (%)	Deformación Rotura (%)
Media	2.852	201.2	308.9	14.83	14.83	19.44
Desv...	0.382	53.38	14.56	3.623	3.623	3.661
Máximo	3.209	266.5	330.7	23.74	23.74	27.06
Mínimo	2.318	122.7	280.2	9.155	9.155	13.73
1	2.328	140.7	330.7	13.07	13.07	15.98
2	2.319	135.3	320.4	16.02	16.02	19.49
3	2.323	134.1	316.4	9.155	9.155	18.97
4	2.320	127.3	301.1	9.376	9.376	17.79
5	2.318	128.4	304.1	10.56	10.56	19.34
6	2.319	126.1	298.7	17.83	17.83	20.56
7	2.324	122.7	289.2	12.48	12.48	17.42
8	3.029	223.5	310.2	17.13	17.13	23.96
9	3.025	225.8	314.2	16.69	16.69	22.63
10	3.030	218.4	302.9	15.36	15.36	23.33
11	3.032	213.8	296.1	20.23	20.23	25.80
12	3.031	211.4	293.0	14.29	14.29	18.12
13	3.031	209.2	290.0	15.21	15.21	18.42
14	3.032	202.3	280.2	12.03	12.03	15.65
15	3.204	265.1	328.8	23.74	23.74	27.06
16	3.204	266.5	330.5	19.90	19.90	23.66
17	3.207	263.0	325.6	17.20	17.20	17.20
18	3.202	255.1	316.8	14.25	14.25	14.25
19	3.207	250.4	310.0	12.18	12.18	13.73
20	3.203	262.5	325.8	12.18	12.18	19.53
21	3.209	243.5	301.1	12.59	12.59	15.25

Imagen 61: Resultados Carga 170°C



ESTUDIO TRATAMIENTOS ESTUFA 180°C 23-05-2018 15:35 - Registra3

Ensayos Parámetros Editar Ver Ayuda

Resultados

Nº	Diámetro Muestra (mm)	Fuerza Máxima (daN)	Tensión Máxima (MPa)	Deformación Máxima (mm)	Deformación Máxima (%)
Media	2.850	177.3	272.2	9.870	9.870
Desv...	0.383	49.23	21.00	2.129	2.129
Máximo	3.210	255.0	315.1	15.76	15.76
Mínimo	2.308	103.8	245.2	5.426	5.426
1	2.318	129.6	307.0	15.76	15.76
2	2.308	121.5	290.4	5.426	5.426
3	2.317	115.8	274.7	9.524	9.524
4	2.322	117.1	276.6	9.930	9.930
5	2.320	106.9	252.8	7.309	7.309
6	2.321	103.8	245.3	8.490	8.490
7	2.320	104.6	247.4	9.302	9.302
8	3.027	211.2	293.5	11.00	11.00
9	3.028	195.2	271.0	11.81	11.81
10	3.028	187.8	260.7	8.712	8.712
11	3.024	183.4	255.3	10.37	10.37
12	3.027	180.0	250.1	9.930	9.930
13	3.030	181.6	251.9	11.22	11.22
14	3.028	176.6	245.2	11.22	11.22
15	3.210	255.0	315.1	10.59	10.59
16	3.201	240.5	298.9	12.85	12.85
17	3.202	241.9	300.4	9.413	9.413
18	3.200	224.6	279.3	8.970	8.970
19	3.210	216.4	267.5	10.15	10.15
20	3.200	214.1	266.3	8.379	8.379
21	3.206	215.5	266.9	6.903	6.903

Imagen 62: Resultados Carga 180°C

Se puede observar en las gráficas como en los tres diámetros la carga va disminuyendo conforme pasa el tiempo y aumenta la temperatura.

Para poder ver de una mejor manera los resultados y comparar la evolución de la capacidad de carga a rotura del alambre y de la conductividad eléctrica a lo largo de las diferentes temperaturas y tiempo en la estufa, se han elaborado las siguientes tablas y gráficas:



**Hilo Ø 2,32 mm 6101 AL3**

Tiempo (h)	140°C - MPa	150°C - MPa	160°C - MPa	170°C - MPa	180°C - MPa
0	339,86	339,86	339,86	339,86	339,86
1	330,54	335,95	330,56	330,65	306,99
2	336,41	336,25	329,58	320,40	290,38
3	335,82	325,84	324,16	316,36	274,65
4	336,56	329,84	317,39	301,12	276,60
5	331,41	331,13	312,54	304,14	252,80
6	334,43	331,52	308,61	298,66	245,29
7	341,16	338,86	295,24	289,17	247,37

Tabla 19: Carga Ø 2,32mm

Tiempo (h)	140°C - %IACS	150°C - %IACS	160°C - %IACS	170°C - %IACS	180°C - %IACS
0	50,81	50,81	50,81	50,81	50,81
1	52,13	52,54	53,42	52,78	55,57
2	52,66	52,95	54,35	54,42	57,34
3	53,01	53,40	55,07	55,36	57,44
4	53,28	53,73	54,98	55,90	57,99
5	53,60	53,95	55,45	56,22	58,14
6	53,74	54,13	56,27	56,62	58,28
7	53,91	53,70	56,03	56,83	58,43

Tabla 20: Conductividad Ø 2,32mm

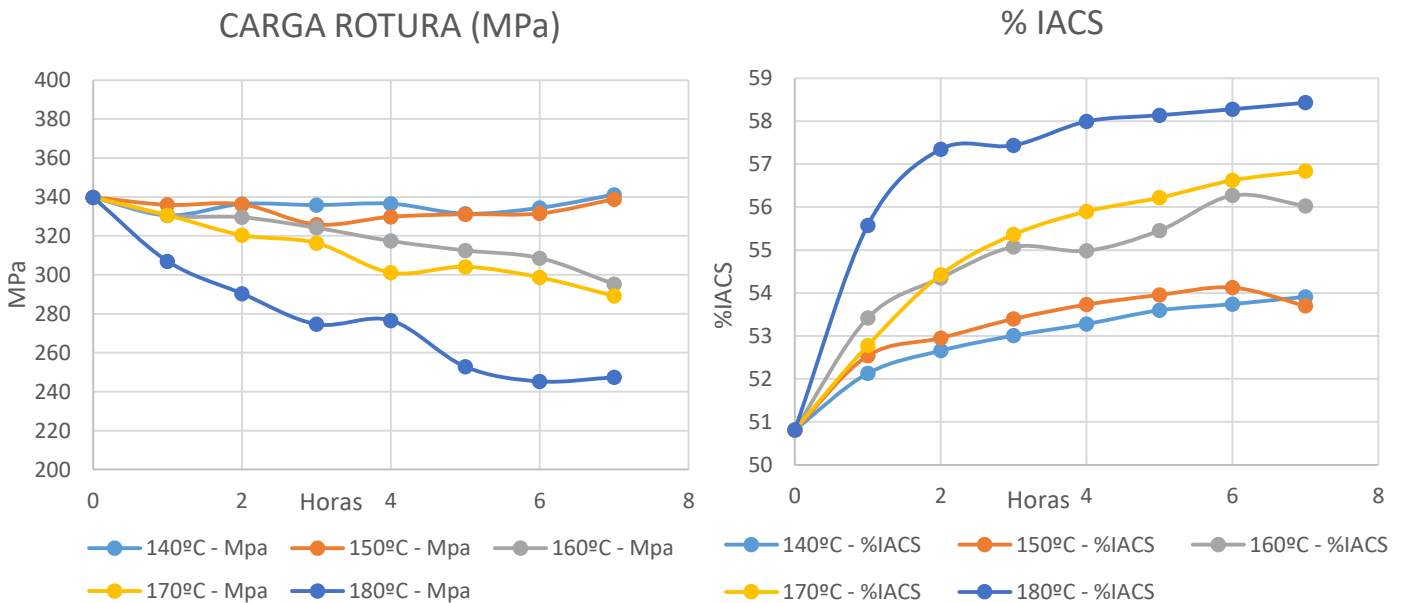


Imagen 63: Gráficas Ø 2,32 mm

**HILO Ø 3,03 mm 6201**

Tiempo (h)	140°C - MPa	150°C - MPa	160°C - MPa	170°C - MPa	180°C - MPa
0	318,26	318,26	318,26	318,26	318,26
1	313,13	313,01	314,99	310,22	293,50
2	318,89	317,76	311,62	314,23	271,04
3	320,46	319,02	308,23	302,86	260,73
4	322,50	318,81	302,27	296,11	255,33
5	320,94	317,97	300,15	293,05	250,10
6	324,24	322,21	299,41	289,97	251,89
7	321,23	321,36	295,50	280,24	245,23

Tabla 21: Carga Ø 3,03mm

Tiempo (h)	140°C - %IACS	150°C - %IACS	160°C - %IACS	170°C - %IACS	180°C - %IACS
0	50,73	50,73	50,73	50,73	50,73
1	50,77	51,30	52,18	52,40	53,92
2	51,21	51,56	53,09	53,59	55,48
3	51,45	51,96	53,70	53,84	56,05
4	51,92	51,88	54,14	54,33	56,83
5	51,87	52,05	54,42	55,07	56,59
6	51,93	52,56	55,08	55,19	56,93
7	52,23	52,64	55,10	55,45	57,07

Tabla 22: Conductividad Ø 3,03 mm

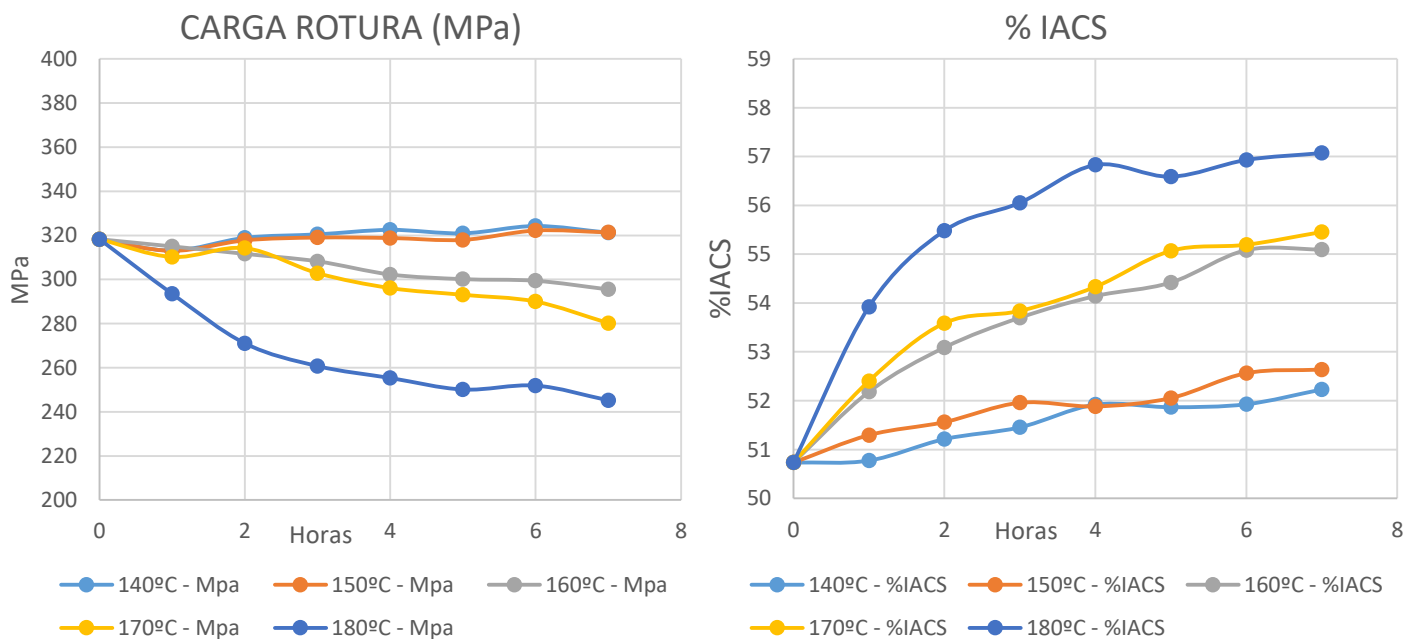


Imagen 64: Gráficas Ø 3,03 mm

**HILO Ø 3,20mm 6101 AL5**

Tiempo (h)	140°C - MPa	150°C - MPa	160°C - MPa	170°C - MPa	180°C - MPa
0	315,69	315,69	315,69	315,69	315,69
1	327,08	329,25	329,92	328,77	315,11
2	327,81	330,49	330,13	330,50	298,88
3	331,81	330,85	329,10	325,65	300,37
4	332,15	331,48	322,09	316,81	279,29
5	332,70	333,66	318,89	310,04	267,45
6	329,90	332,65	317,13	306,79	266,27
7	336,20	329,46	321,87	301,13	266,93

Tabla 23: Carga Ø 3,20 mm

Tiempo (h)	140°C - %IACS	150°C - %IACS	160°C - %IACS	170°C - %IACS	180°C - %IACS
0	50,95	50,95	50,95	50,95	50,95
1	51,79	51,31	52,38	52,52	53,76
2	51,84	52,29	52,86	53,46	55,38
3	52,19	52,50	52,80	53,77	56,03
4	52,57	52,78	53,62	54,40	56,52
5	52,86	53,41	54,08	54,56	56,65
6	52,68	53,33	54,69	55,16	57,24
7	52,71	53,42	54,83	55,94	57,65

Tabla 24: Conductividad Ø 3,20 mm

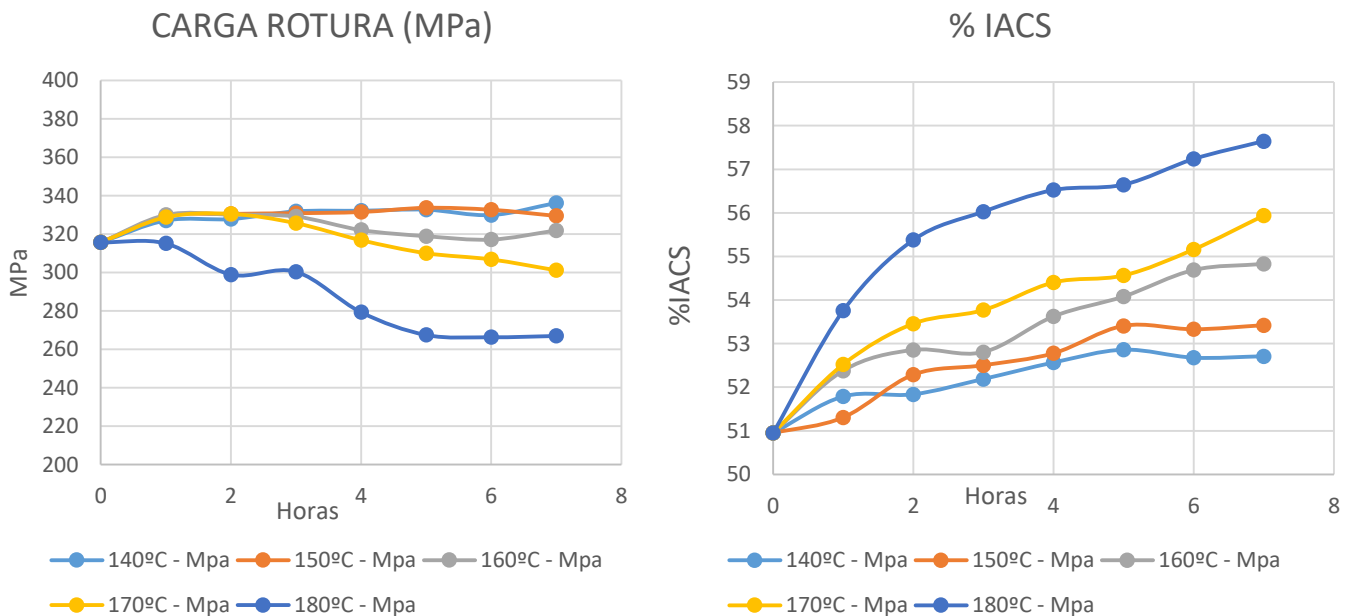


Imagen 65: Gráficas Ø 3,20 mm

Tras pasar por el tratamiento térmico en el horno industrial a **170°C** y **445 min** las muestras recogidas de los distintos diámetros muestran los siguientes resultados:

Aleación	Diámetro (mm)	Carga Rotura (MPa)	%IACS
6101 AL3	2,32	325,70	54,20
6201	3,03	315	53,65
6101 AL5	3,20	321	54,30

Tabla 25: Resultados horno

Se puede observar cómo los 3 diámetros cumplen con los requisitos de las normas:

- **Tipo AL3:** mínimo 53 % IACS y 295 MPa → **54,2%IACS y 325,7 MPa.**
- **6201:** mínimo 52,5%IACS y 315 MPa → **54,3% IACS y 315 MPa.**
- **Tipo AL5:** mínimo 55,25% IACS y 295 MPa → **54,3% IACS y 321 MPa**

De esta manera podemos extrapolar las diferencias que hay entre la estufa y el horno para conseguir esos resultados:

- Para el alambre de Ø2,32 mm **6101 AL3**, vemos que para conseguir los resultados del horno en la estufa se alcanzan con una temperatura de 150°C y entre 5 y 6 horas, es decir hay una diferencia de **20°C** y **90 minutos** aproximadamente.
- Para el alambre de Ø3,03 mm **6201**, para conseguir los resultados del horno en la estufa se alcanzan con una temperatura de 155°C y 6 horas, por lo que hay una diferencia de **15-20°C** y **90 minutos** aproximadamente.
- Para el alambre de Ø3,20 mm **6101 AL5**, si se quisiera alcanzar los requisitos de **AL3** en la estufa bastaría con un tratamiento de 150°C y 6 horas, mientras que en el horno se alcanzaría con **20°C y 90 minutos de más**, sin embargo para cumplir requisitos de **AL5** en la estufa se alcanzan a 170°C y 7 horas, mientras que en el horno habría que realizar el tratamiento con una diferencia de **15-20°C y 90 minutos aproximadamente de más**, lo que obligaría a pasar el tiempo de ciclo de 20 minutos a **25 minutos**.

## 11 CONCLUSIONES

Como conclusiones a este proyecto, destacar la solución a un problema real en un proceso de fabricación como es el trefilado de alambre, para fabricar conductores eléctricos de líneas aéreas de alta tensión, en el que influyen muchos factores a la vez, y que gracias a un estudio en profundidad se ha llegado a una solución.

En esta solución se han analizado los problemas de roturas en el proceso y la pérdida de productividad que conllevaba, gracias a este análisis se diseñaron unas hileras en base a los parámetros que intervenían en el trefilado y en la estructura interna de las hileras.

Tras las pruebas realizadas se llegó a resultados más que satisfactorios, se mejoró notablemente el proceso de trefilado reduciendo el índice de roturas y mejorando la productividad, se estandarizó la manera de trefilar y montar la máquina según qué tipo de aleación se fuera a utilizar, se redujo el consumo del par motor de las máquinas, y tras los ensayos de laboratorio cumpliendo los requisitos de las normas de carga y rotura se estandarizó también el tratamiento térmico en el horno en función de los valores a obtener.

A nivel personal, este proyecto ha sido un reto en el que he ampliado mis conocimientos adquiridos en la universidad y me he enfrentado a un problema real, ampliando mis capacidades de análisis y resolución de problemas y de trabajo en equipo.

## **12 BIBLIOGRAFÍA**

[1] Ortolá, S. (2018). Manual del Aluminio y sus Aleaciones. Retrieved from: <https://ingenieriademateriales.wordpress.com/2009/04/17/manual-del-aluminio-y-sus-aleaciones/>

[2] Kalpakjian, S., Schmid, S., & Espinoza Limón Jaime. (2008). Manufactura, ingeniería y tecnología. México, D.F.: Pearson Educacion.

[3] Sommer, Carl, (2000) Non-traditional machining handbook / by Carl Sommer. Ed. Advance Publishing.

[4] Z.Zimmerman, (1995) Wire Journal

[5] Pérez, J.M. (1998), Tecnología mecánica I, Ed. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid.

[6] American Society for Metals. (1989). Forming and forging. Metals Park, Ohio.

[7] Wright, R. Wire technology.Process Engineering and Metallurgy

[8] Group, E. (2018). Esteves Group - Productos - Hilas de metal duro. Retrieved from: <http://www.estevesgroup.com/es/products/wire-drawing-dies/tungsten-carbide-dies/index.php>

# II PLANOS

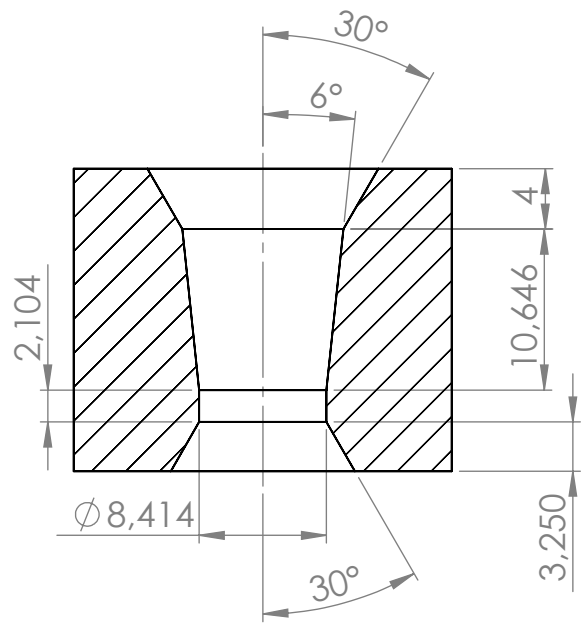
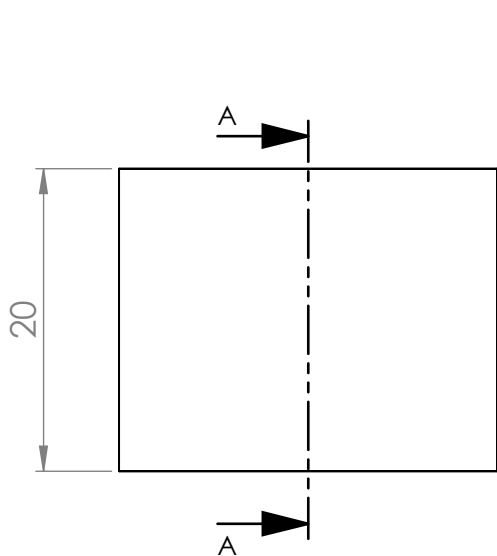




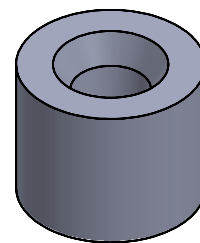
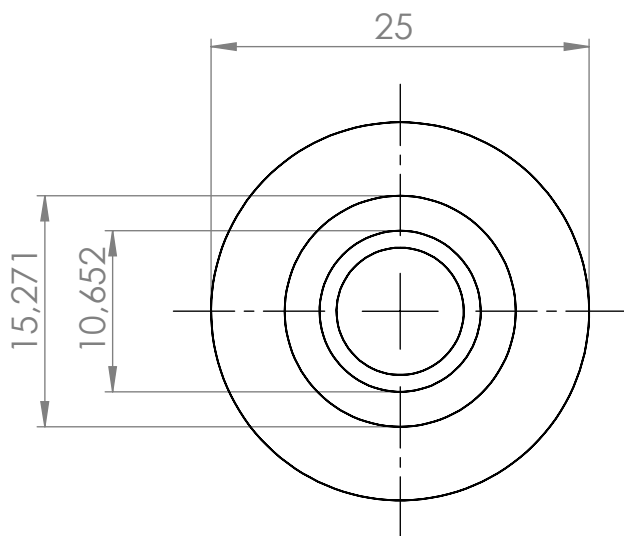
## PLANOS

- Planos primer diseño juego hileras
- Planos diseño final juego hileras

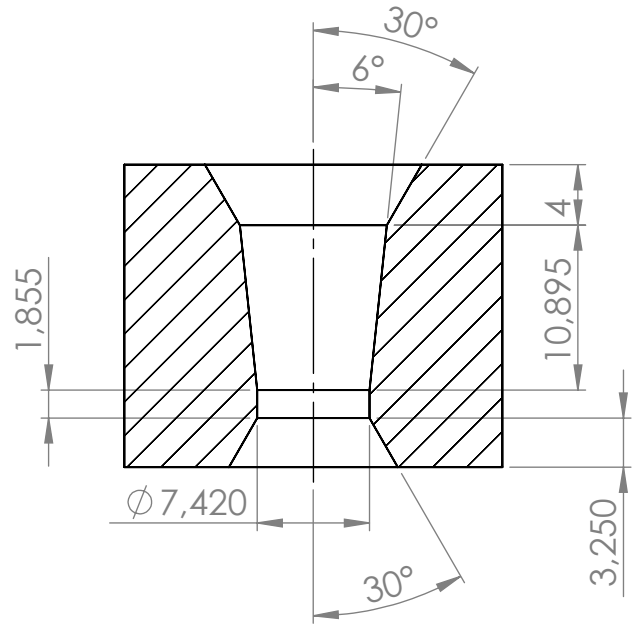
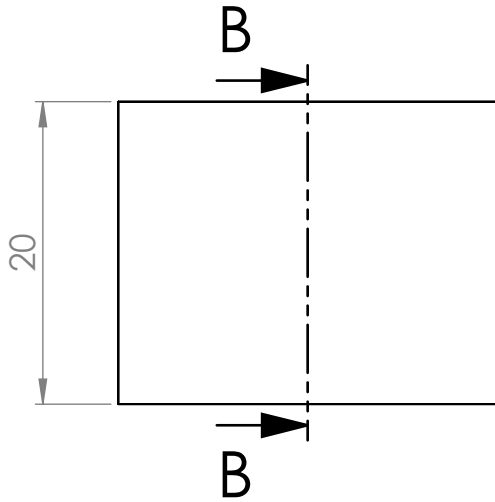




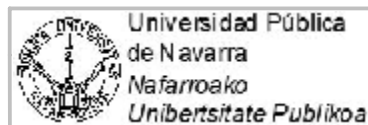
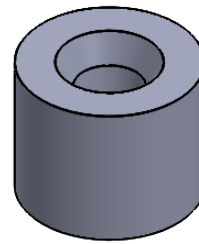
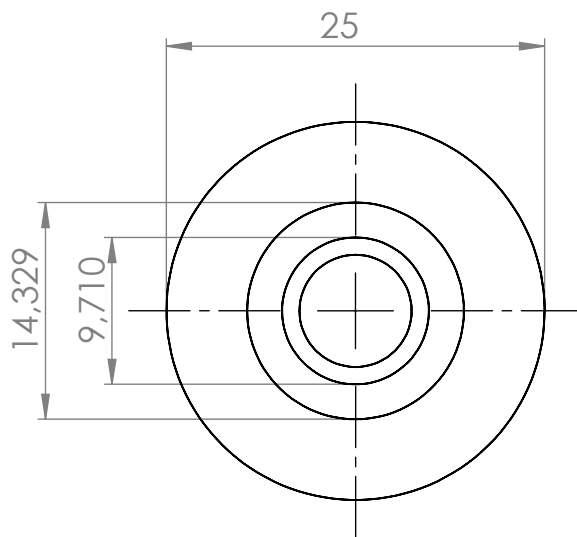
SECCIÓN A-A



 Universidad Pública de Navarra Nafarroako Unibertsitate Publikoa	E.T.S.I.I.T.	DEPARTAMENTO:		
	INGENIERO TECNICO INDUSTRIAL M.	DEPARTAMENTO DE ING. MECANICA, ENERGETICA Y DE MATERIALES		
<b>PROYECTO:</b> Caracterización y mejora del proceso de trefilado y tratamiento térmico de nuevas aleaciones de Aluminio para la fabricación de conductores eléctricos de líneas aéreas de alta tensión.		<b>REALIZADO:</b> <b>SANZ SANZ, JAVIER</b>		
<b>PLANO:</b> HILERA METAL DURO MSM 85		<b>FECHA:</b> 14/03/2018	<b>ESCALA:</b> 2:1	<b>NºPLANO:</b> 1
		<b>FIRMA:</b>		



SECCIÓN B-B



Universidad Pública  
de Navarra  
Nafarroako  
Unibertsitate Publikoa

E.T.S.I.I.T.

INGENIERO TECNICO  
INDUSTRIAL M.

DEPARTAMENTO:

DEPARTAMENTO DE ING. MECANICA,  
ENERGETICA Y DE MATERIALES

PROYECTO:

Caracterización y mejora del proceso de trefilado y  
tratamiento térmico de nuevas aleaciones de Aluminio para  
la fabricación de conductores eléctricos de líneas aéreas de  
alta tensión.

REALIZADO:

**SANZ SANZ, JAVIER**

FIRMA:

PLANO:

HILERA METAL DURO MSM 85

FECHA:

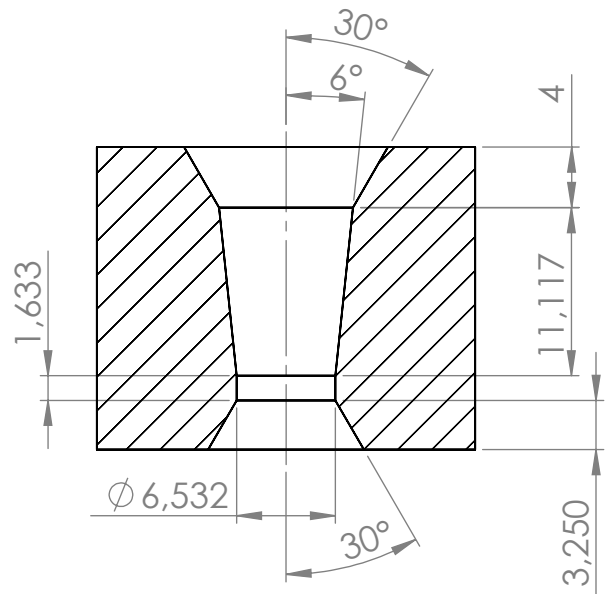
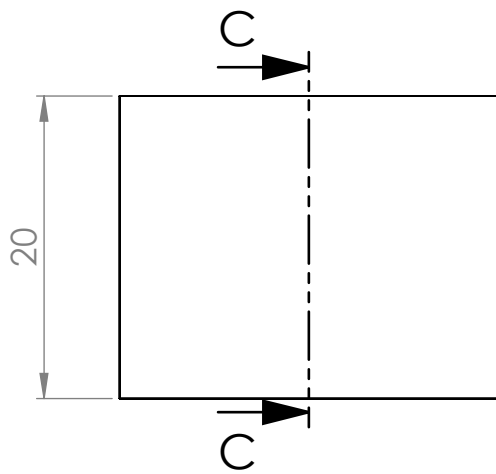
14/03/2018

ESCALA:

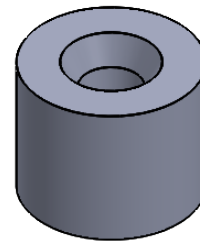
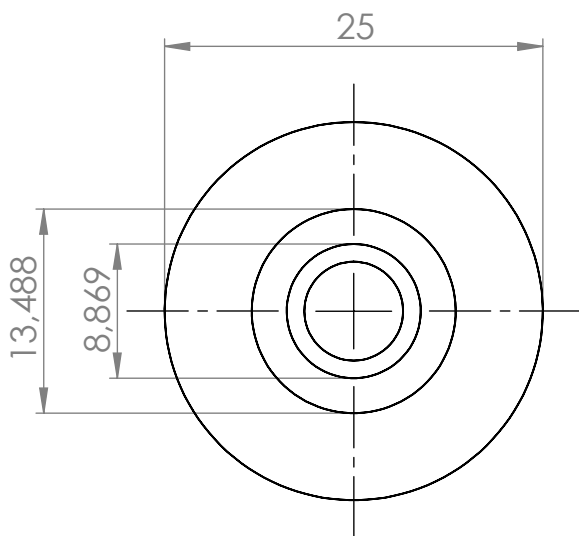
2:1

NºPLANO:

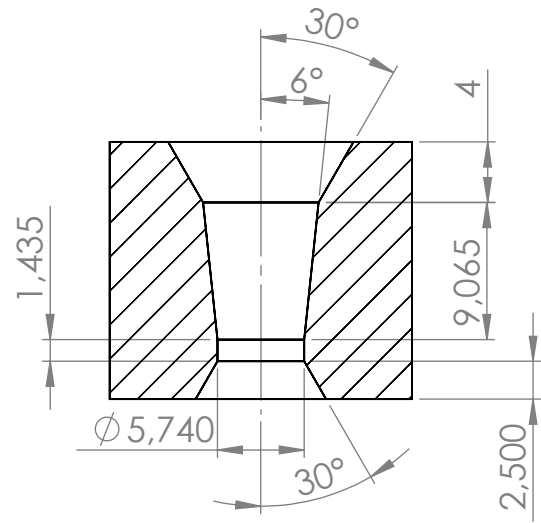
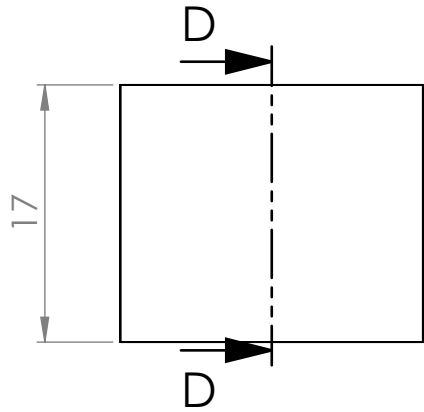
2



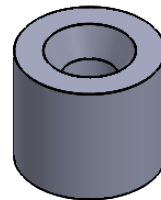
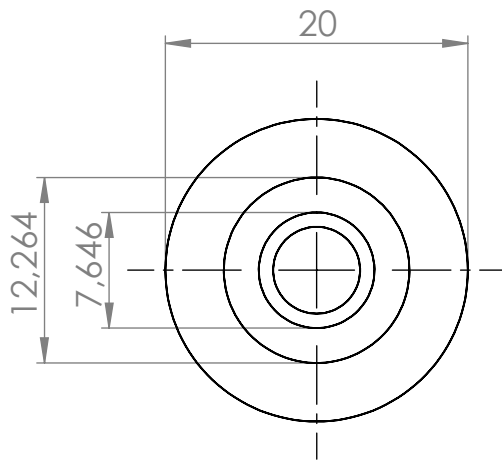
SECCIÓN C-C



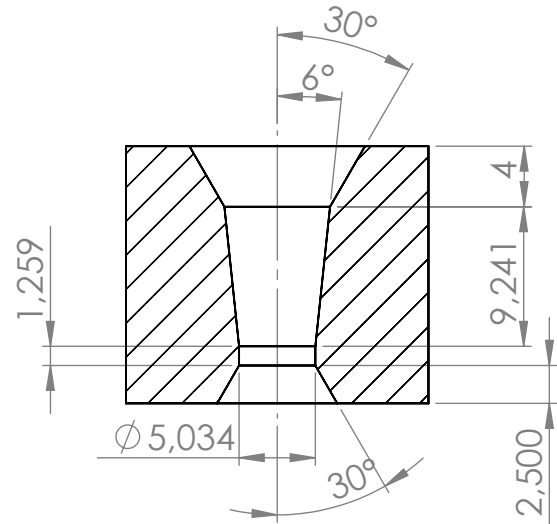
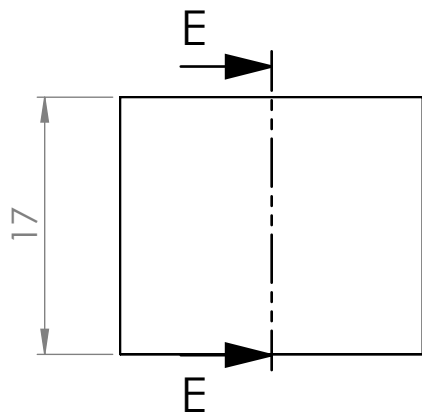
 Universidad Pública de Navarra Nafarroako Unibertsitate Publikoa	E.T.S.I.I.T.	DEPARTAMENTO:		
	INGENIERO TECNICO INDUSTRIAL M.	DEPARTAMENTO DE ING. MECANICA, ENERGETICA Y DE MATERIALES		
<b>PROYECTO:</b> Caracterización y mejora del proceso de trefilado y tratamiento térmico de nuevas aleaciones de Aluminio para la fabricación de conductores eléctricos de líneas aéreas de alta tensión.		<b>REALIZADO:</b> <b>SANZ SANZ, JAVIER</b>		
<b>PLANO:</b> HILERA METAL DURO MSM 85		<b>FECHA:</b> 14/03/2018	<b>ESCALA:</b> 2:1	<b>NºPLANO:</b> 3
		<b>FIRMA:</b>		



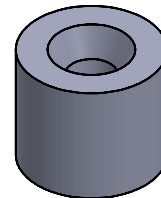
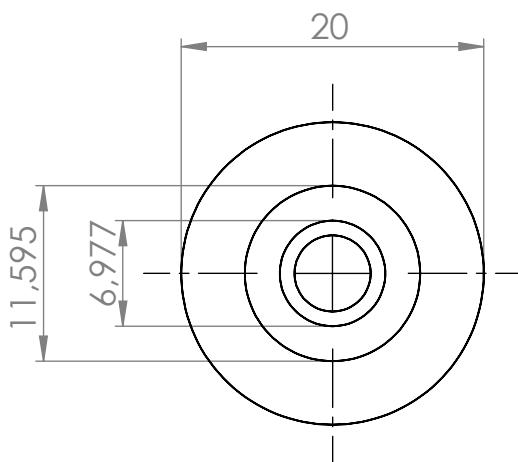
SECCIÓN D-D



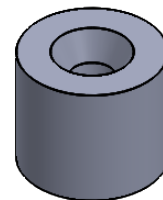
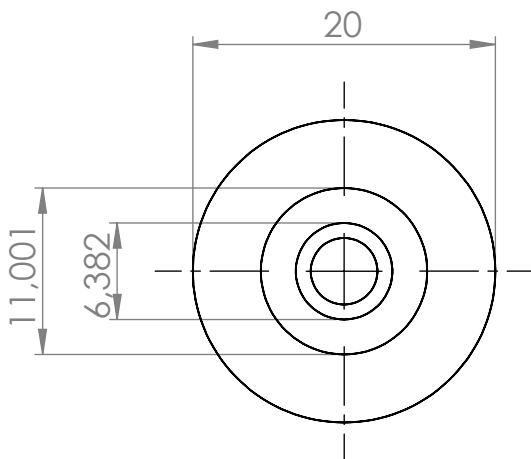
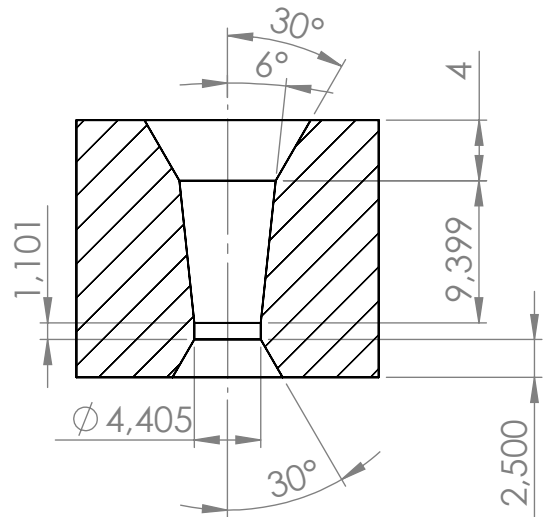
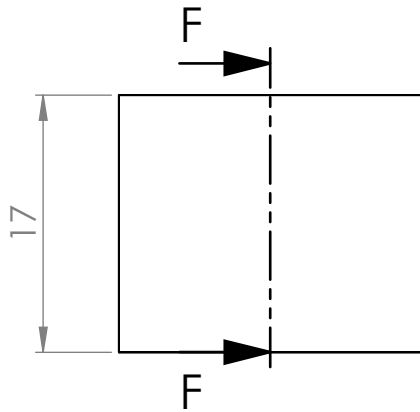
 Universidad Pública de Navarra Nafarroako Unibertsitate Publikoa	E.T.S.I.I.T.	DEPARTAMENTO:		
	INGENIERO TECNICO INDUSTRIAL M.	DEPARTAMENTO DE ING. MECANICA, ENERGETICA Y DE MATERIALES		
<b>PROYECTO:</b> Caracterización y mejora del proceso de trefilado y tratamiento térmico de nuevas aleaciones de Aluminio para la fabricación de conductores eléctricos de líneas aéreas de alta tensión.		<b>REALIZADO:</b> <b>SANZ SANZ, JAVIER</b>		
<b>PLANO:</b> HILERA METAL DURO MSM 85		<b>FECHA:</b> 14/03/2018	<b>ESCALA:</b> 2:1	<b>NºPLANO:</b> 4
		<b>FIRMA:</b>		



SECCIÓN E-E

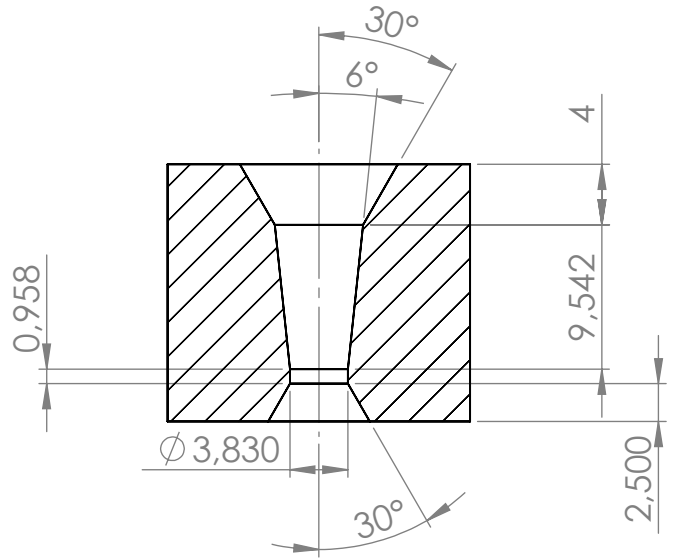
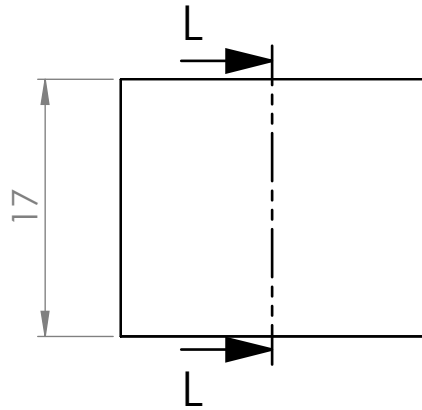


 Universidad Pública de Navarra Nafarroako Unibertsitate Publikoa	E.T.S.I.I.T.	DEPARTAMENTO:		
	INGENIERO TECNICO INDUSTRIAL M.	DEPARTAMENTO DE ING. MECANICA, ENERGETICA Y DE MATERIALES		
<b>PROYECTO:</b> Caracterización y mejora del proceso de trefilado y tratamiento térmico de nuevas aleaciones de Aluminio para la fabricación de conductores eléctricos de líneas aéreas de alta tensión.		<b>REALIZADO:</b> <b>SANZ SANZ, JAVIER</b>		
<b>PLANO:</b> HILERA METAL DURO MSM 85		<b>FECHA:</b> 14/03/2018	<b>ESCALA:</b> 2:1	<b>NºPLANO:</b> 5
		<b>FIRMA:</b>		

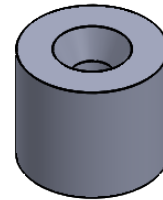
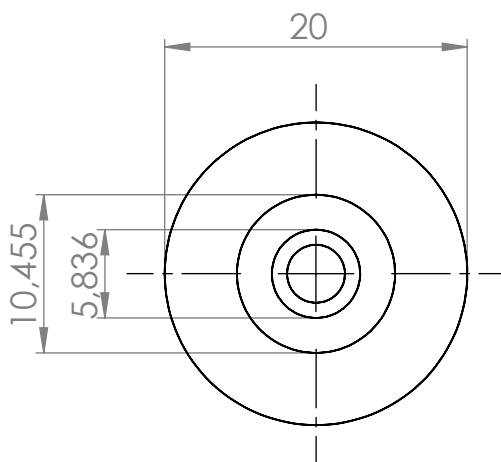


 Universidad Pública de Navarra Nafarroako Unibertsitate Publikoa	E.T.S.I.I.T.	DEPARTAMENTO:		
	INGENIERO TECNICO INDUSTRIAL M.	DEPARTAMENTO DE ING. MECANICA, ENERGETICA Y DE MATERIALES		
<b>PROYECTO:</b> Caracterización y mejora del proceso de trefilado y tratamiento térmico de nuevas aleaciones de Aluminio para la fabricación de conductores eléctricos de líneas aéreas de alta tensión.		<b>REALIZADO:</b> <b>SANZ SANZ, JAVIER</b>		
<b>PLANO:</b> HILERA METAL DURO MSM 85		<b>FECHA:</b> 14/03/2018	<b>ESCALA:</b> 2:1	<b>NºPLANO:</b> 6
		<b>FIRMA:</b>		

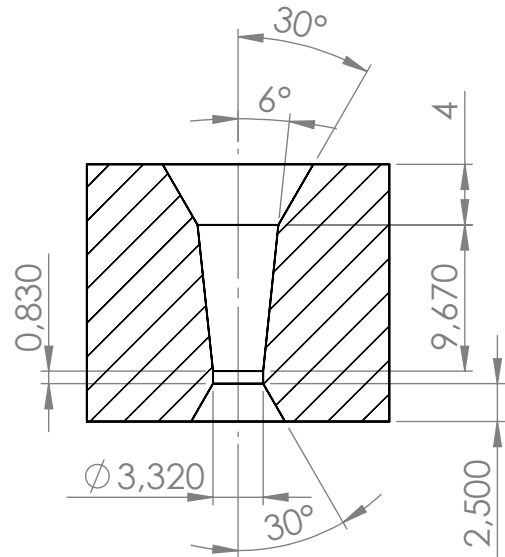
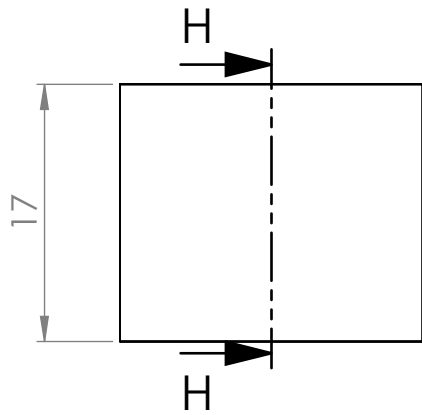




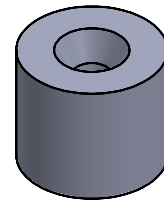
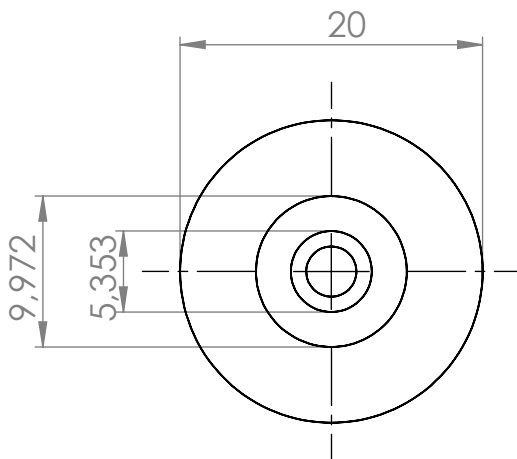
SECCIÓN L-L



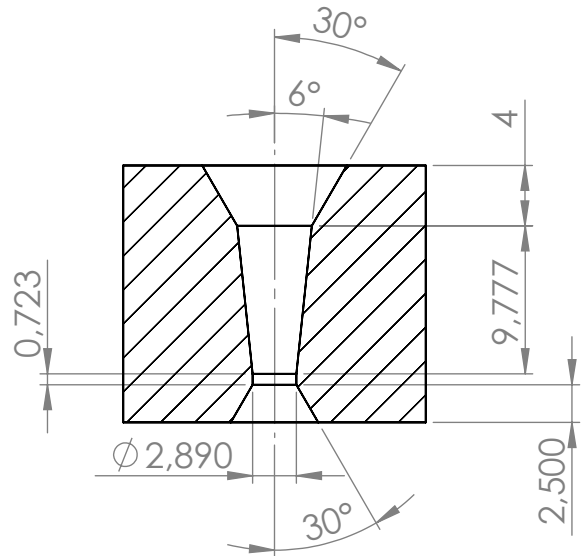
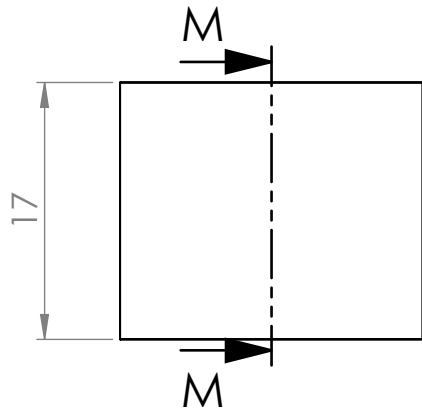
 Universidad Pública de Navarra Nafarroako Unibertsitate Publikoa	E.T.S.I.I.T.	DEPARTAMENTO:		
	INGENIERO TECNICO INDUSTRIAL M.	DEPARTAMENTO DE ING. MECANICA, ENERGETICA Y DE MATERIALES		
<b>PROYECTO:</b> Caracterización y mejora del proceso de trefilado y tratamiento térmico de nuevas aleaciones de Aluminio para la fabricación de conductores eléctricos de líneas aéreas de alta tensión.		<b>REALIZADO:</b> <b>SANZ SANZ, JAVIER</b>		
<b>PLANO:</b> HILERA METAL DURO MSM 85		<b>FECHA:</b> 14/03/2018	<b>ESCALA:</b> 2:1	<b>NºPLANO:</b> 7
		<b>FIRMA:</b>		



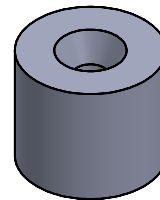
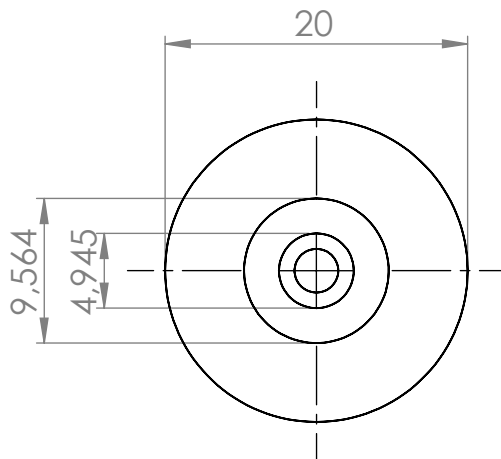
SECCIÓN H-H



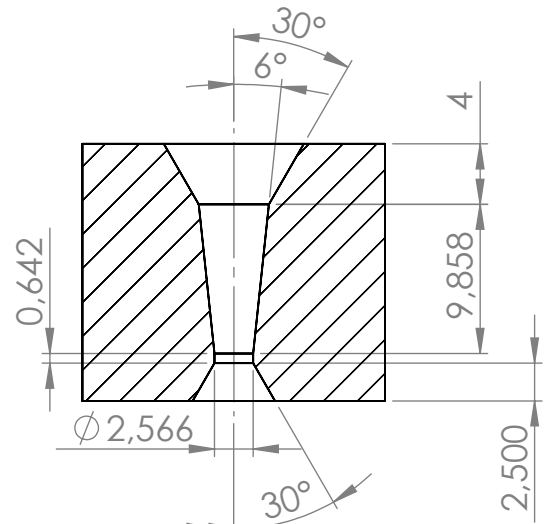
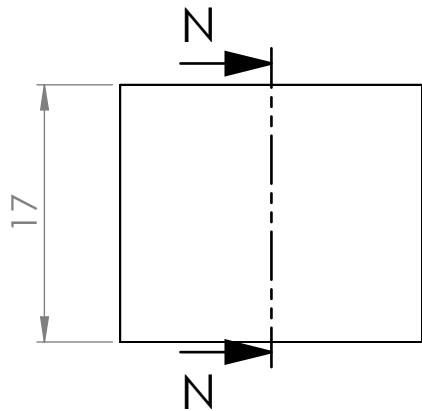
 Universidad Pública de Navarra <i>Navarroako</i> <i>Unibertsitate Publikoa</i>	E.T.S.I.I.T.	DEPARTAMENTO:	
	INGENIERO TECNICO INDUSTRIAL M.	DEPARTAMENTO DE ING. MECANICA, ENERGETICA Y DE MATERIALES	
<b>PROYECTO:</b> Caracterización y mejora del proceso de trefilado y tratamiento térmico de nuevas aleaciones de Aluminio para la fabricación de conductores eléctricos de líneas aéreas de alta tensión.		<b>REALIZADO:</b> <b>SANZ SANZ, JAVIER</b>	
<b>PLANO:</b> HILERA METAL DURO MSM 85		<b>FECHA:</b> 14/03/2018	<b>ESCALA:</b> 2:1
		<b>NºPLANO:</b> 8	



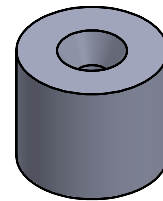
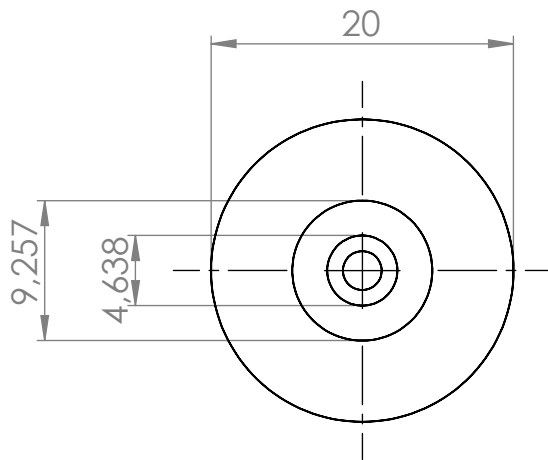
SECCIÓN M-M



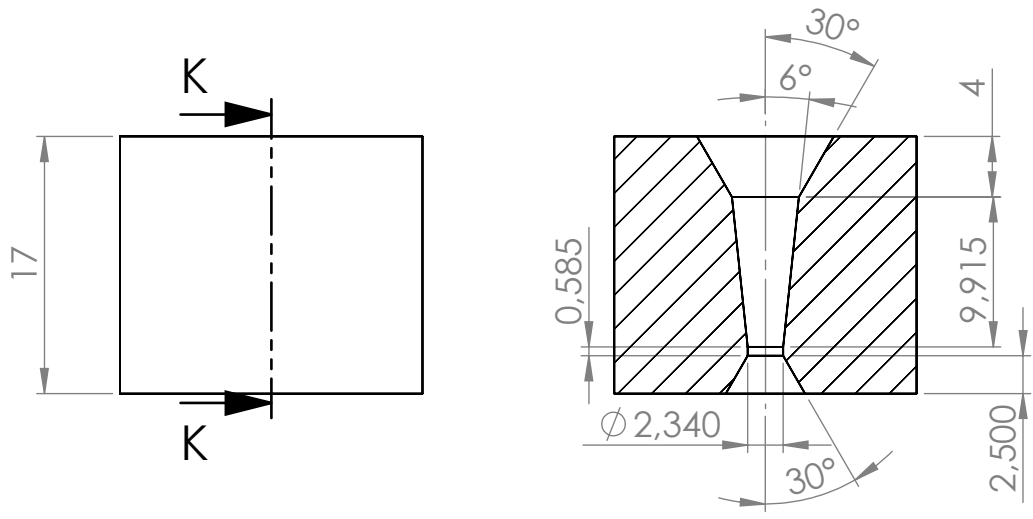
 Universidad Pública de Navarra Nafarroako Unibertsitate Publikoa	E.T.S.I.I.T.	DEPARTAMENTO:		
	INGENIERO TECNICO INDUSTRIAL M.	DEPARTAMENTO DE ING. MECANICA, ENERGETICA Y DE MATERIALES		
<b>PROYECTO:</b> Caracterización y mejora del proceso de trefilado y tratamiento térmico de nuevas aleaciones de Aluminio para la fabricación de conductores eléctricos de líneas aéreas de alta tensión.		<b>REALIZADO:</b> <b>SANZ SANZ, JAVIER</b>		
<b>PLANO:</b> HILERA METAL DURO MSM 85		<b>FECHA:</b> 14/03/2018	<b>ESCALA:</b> 2:1	<b>NºPLANO:</b> 9
		<b>FIRMA:</b>		



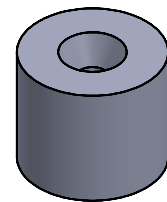
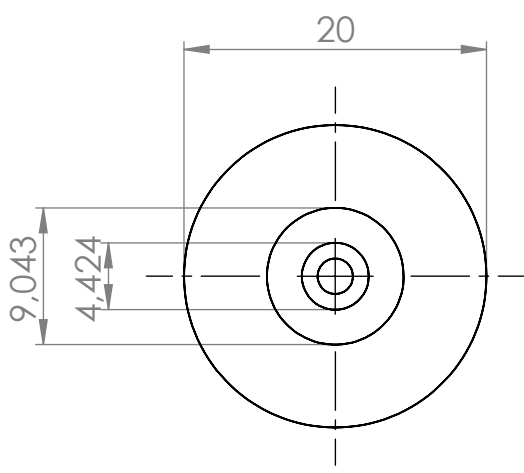
SECCIÓN N-N



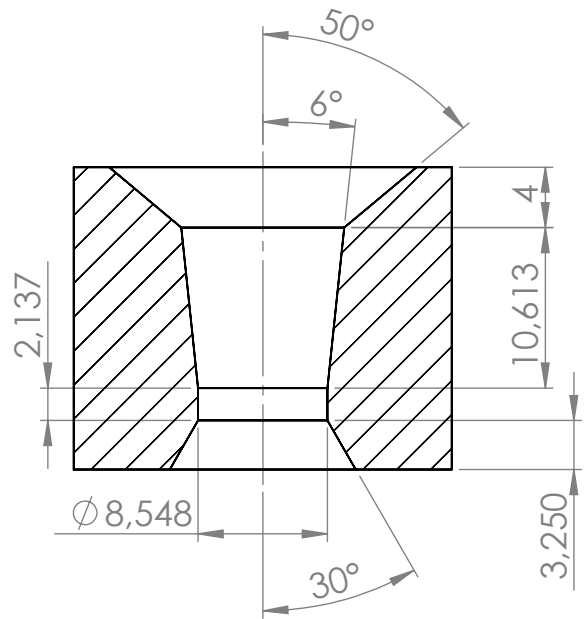
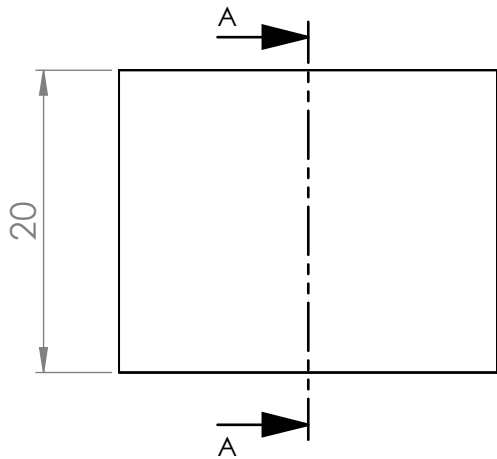
 Universidad Pública de Navarra Nafarroako Unibertsitate Publikoa	E.T.S.I.I.T.	DEPARTAMENTO:		
	INGENIERO TECNICO INDUSTRIAL M.	DEPARTAMENTO DE ING. MECANICA, ENERGETICA Y DE MATERIALES		
<b>PROYECTO:</b> Caracterización y mejora del proceso de trefilado y tratamiento térmico de nuevas aleaciones de Aluminio para la fabricación de conductores eléctricos de líneas aéreas de alta tensión.		<b>REALIZADO:</b> <b>SANZ SANZ, JAVIER</b>		
<b>PLANO:</b> HILERA METAL DURO MSM 85		<b>FECHA:</b> 14/03/2018	<b>ESCALA:</b> 2:1	<b>NºPLANO:</b> 10
		<b>FIRMA:</b>		



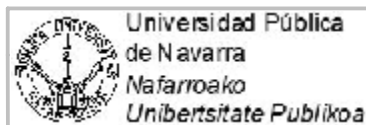
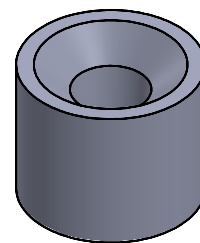
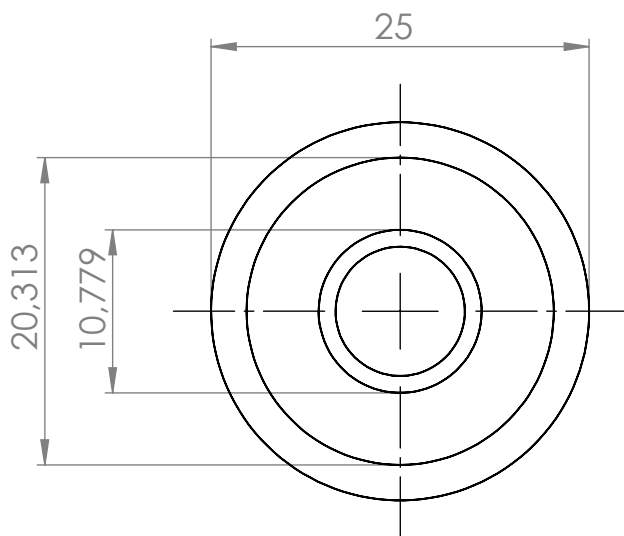
SECCIÓN K-K



 Universidad Pública de Navarra <i>Nafarroako</i> <i>Unibertsitate Publikoa</i>	E.T.S.I.I.T.	DEPARTAMENTO:		
	INGENIERO TECNICO INDUSTRIAL M.	DEPARTAMENTO DE ING. MECANICA, ENERGETICA Y DE MATERIALES		
<b>PROYECTO:</b> Caracterización y mejora del proceso de trefilado y tratamiento térmico de nuevas aleaciones de Aluminio para la fabricación de conductores eléctricos de líneas aéreas de alta tensión.		<b>REALIZADO:</b> <b>SANZ SANZ, JAVIER</b>		
<b>PLANO:</b> HILERA METAL DURO MSM 85		<b>FECHA:</b> 14/03/2018	<b>ESCALA:</b> 2:1	<b>NºPLANO:</b> 11
		<b>FIRMA:</b>		



SECCIÓN A-A



Universidad Pública  
de Navarra  
Nafarroako  
Unibertsitate Publikoa

E.T.S.I.I.T.

INGENIERO TECNICO  
INDUSTRIAL M.

DEPARTAMENTO:

DEPARTAMENTO DE ING. MECANICA,  
ENERGETICA Y DE MATERIALES

PROYECTO:

Caracterización y mejora del proceso de trefilado y  
tratamiento térmico de nuevas aleaciones de Aluminio para  
la fabricación de conductores eléctricos de líneas aéreas de  
alta tensión.

REALIZADO:

**SANZ SANZ, JAVIER**

FIRMA:

PLANO:

HILERA METAL DURO MSM85 Y M85

FECHA:

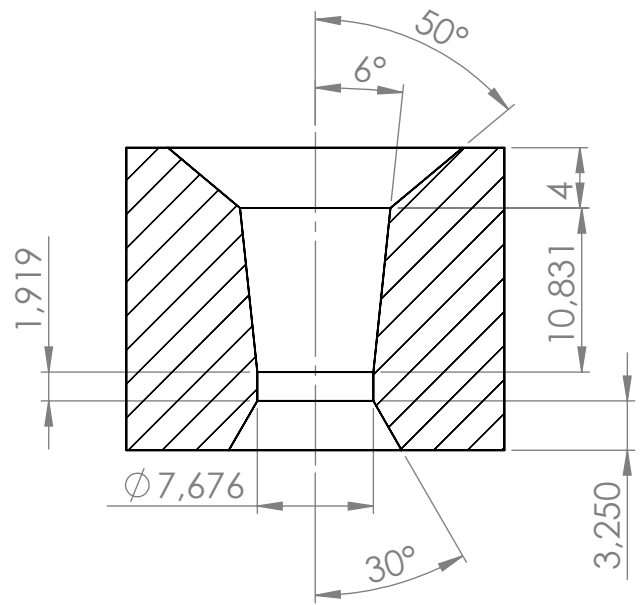
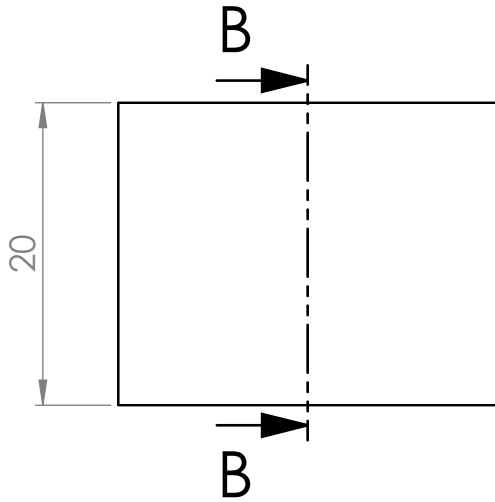
26/04/2018

ESCALA:

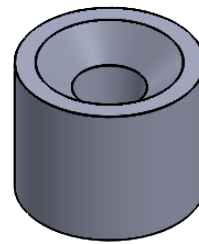
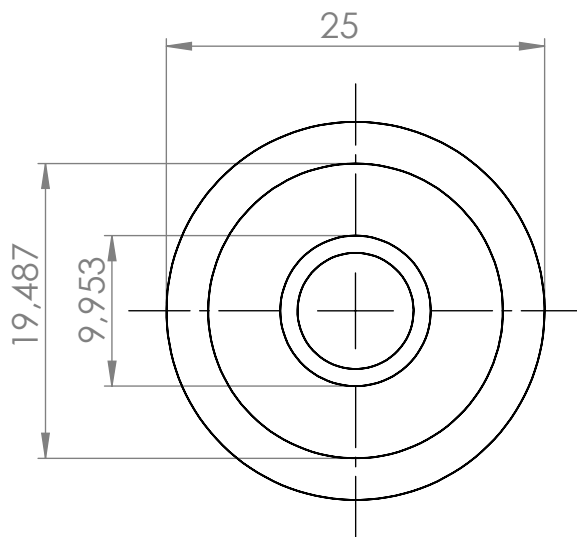
2:1

NºPLANO:

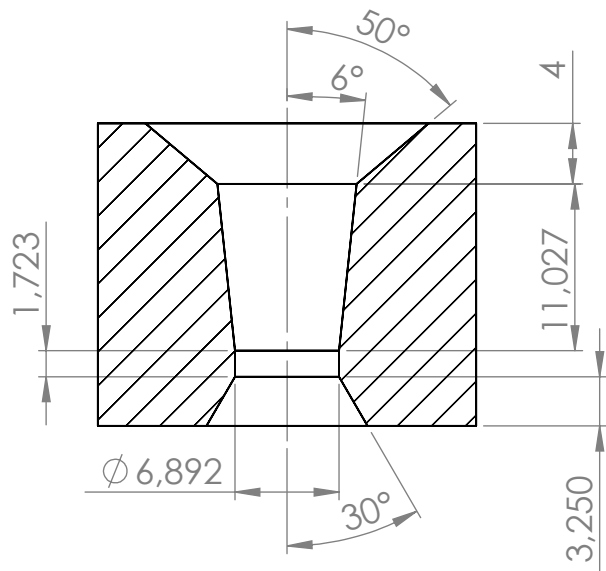
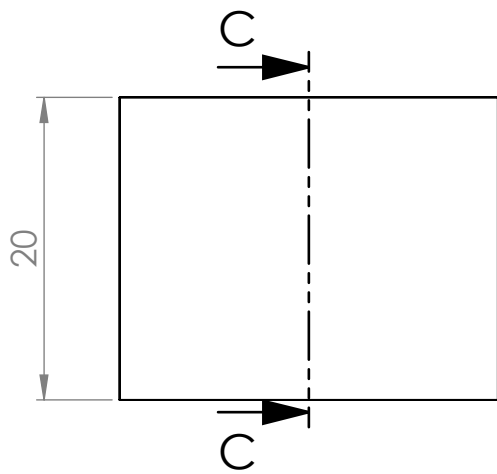
1



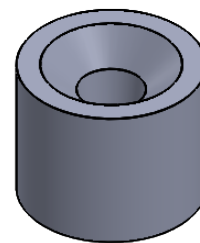
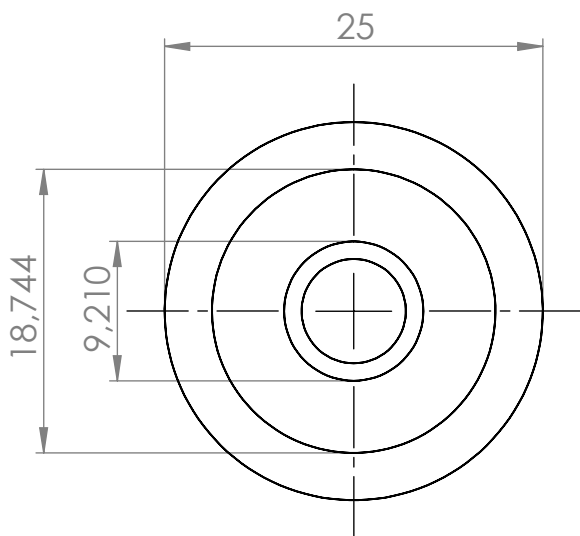
SECCIÓN B-B



 Universidad Pública de Navarra Nafarroako Unibertsitate Publikoa	E.T.S.I.I.T.	DEPARTAMENTO:		
	INGENIERO TECNICO INDUSTRIAL M.	DEPARTAMENTO DE ING. MECANICA, ENERGETICA Y DE MATERIALES		
<b>PROYECTO:</b> Caracterización y mejora del proceso de trefilado y tratamiento térmico de nuevas aleaciones de Aluminio para la fabricación de conductores eléctricos de líneas aéreas de alta tensión.	<b>REALIZADO:</b> <b>SANZ SANZ, JAVIER</b>			
	<b>FIRMA:</b>			
<b>PLANO:</b> HILERA METAL DURO MSM85 Y M85	<b>FECHA:</b> 26/04/2018	<b>ESCALA:</b> 2:1	<b>NºPLANO:</b> 2	

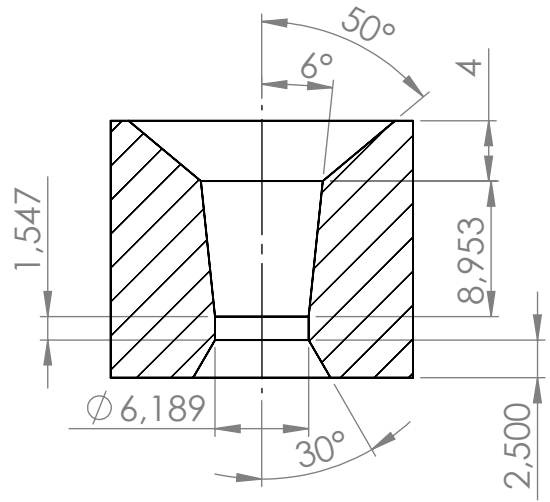
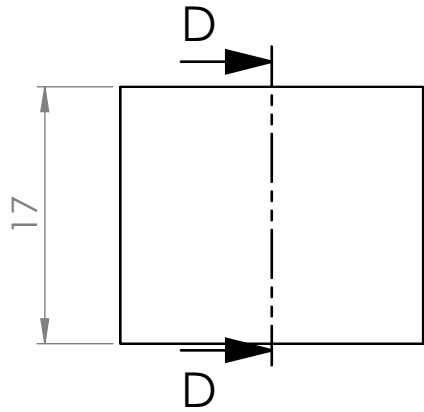


SECCIÓN C-C

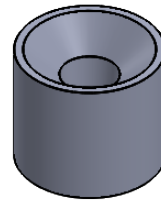
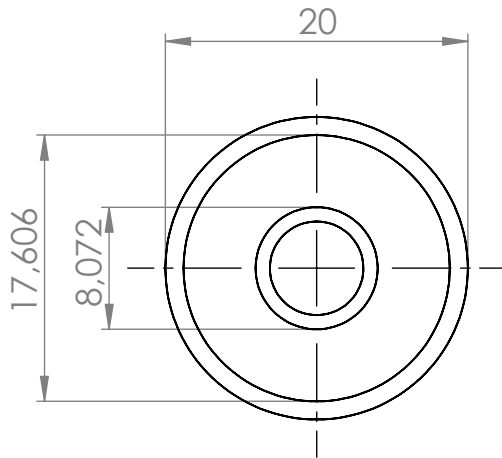


 Universidad Pública de Navarra Nafarroako Unibertsitate Publikoa	E.T.S.I.I.T.	DEPARTAMENTO:		
	INGENIERO TECNICO INDUSTRIAL M.	DEPARTAMENTO DE ING. MECANICA, ENERGETICA Y DE MATERIALES		
<b>PROYECTO:</b> Caracterización y mejora del proceso de trefilado y tratamiento térmico de nuevas aleaciones de Aluminio para la fabricación de conductores eléctricos de líneas aéreas de alta tensión.		<b>REALIZADO:</b> <b>SANZ SANZ, JAVIER</b>		
<b>PLANO:</b> HILERA METAL DURO MSM85 Y M85		<b>FIRMA:</b>	<b>FECHA:</b> 26/04/2018	<b>ESCALA:</b> 2:1
			<b>NºPLANO:</b> 3	

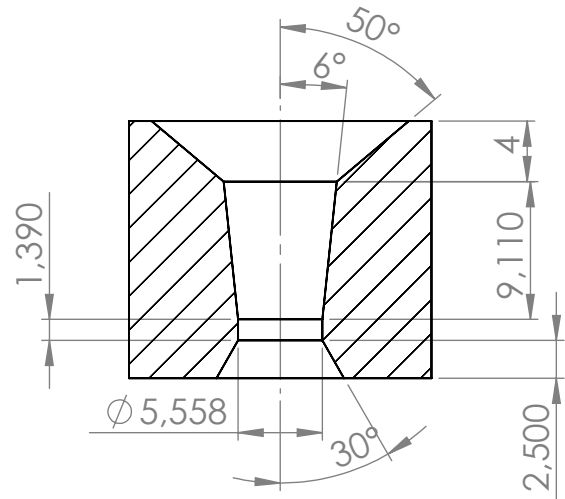
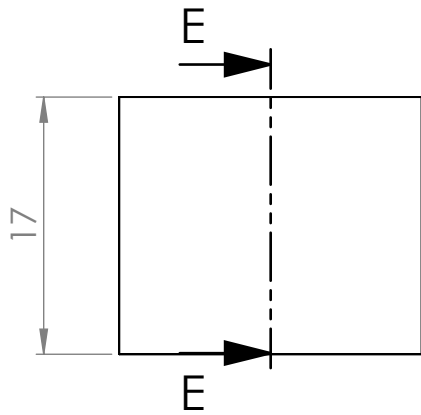




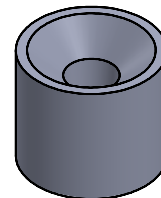
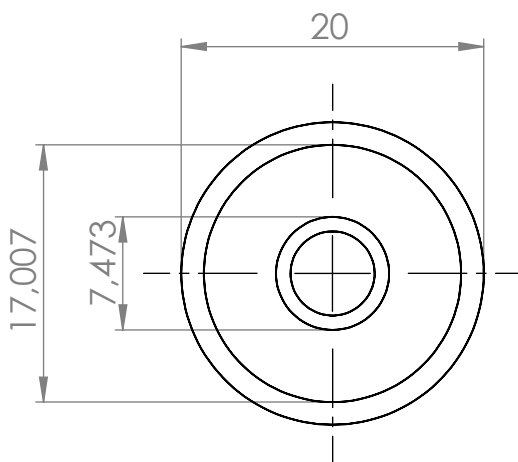
SECCIÓN D-D




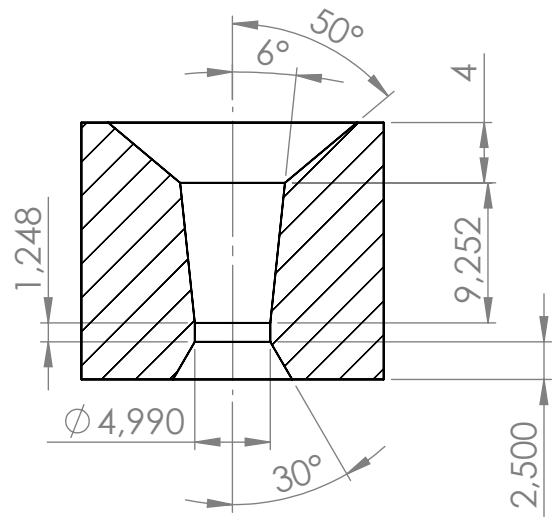
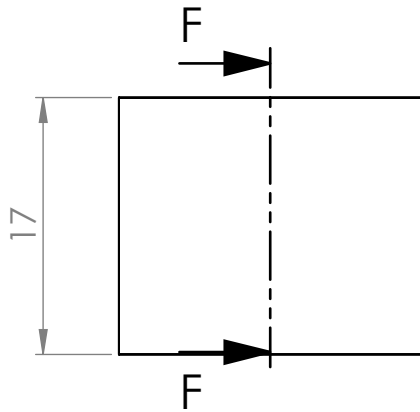
 Universidad Pública de Navarra Nafarroako Unibertsitate Publikoa	E.T.S.I.I.T.	DEPARTAMENTO:		
	INGENIERO TECNICO INDUSTRIAL M.	DEPARTAMENTO DE ING. MECANICA, ENERGETICA Y DE MATERIALES		
<b>PROYECTO:</b> Caracterización y mejora del proceso de trefilado y tratamiento térmico de nuevas aleaciones de Aluminio para la fabricación de conductores eléctricos de líneas aéreas de alta tensión.		<b>REALIZADO:</b> <b>SANZ SANZ, JAVIER</b>		
<b>PLANO:</b> HILERA METAL DURO MSM85 Y M85		<b>FECHA:</b> 26/04/2018	<b>ESCALA:</b> 2:1	<b>NºPLANO:</b> 4
		<b>FIRMA:</b>		



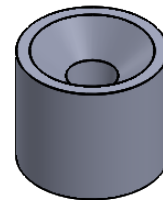
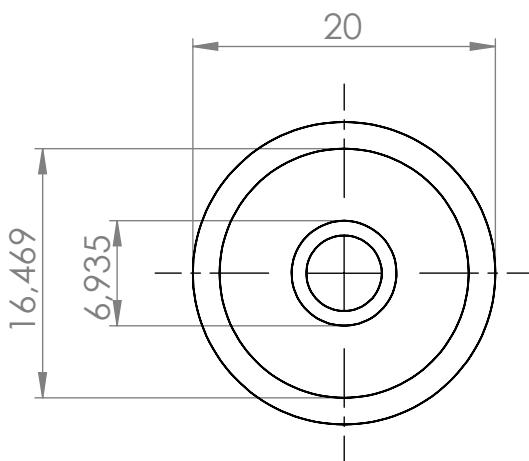
SECCIÓN E-E



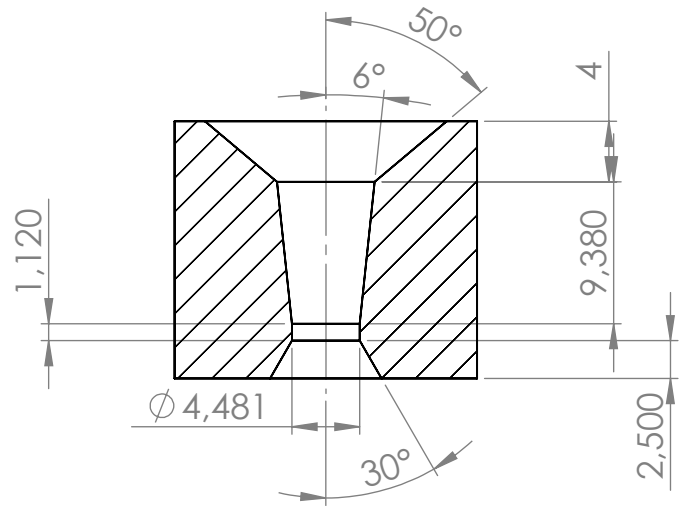
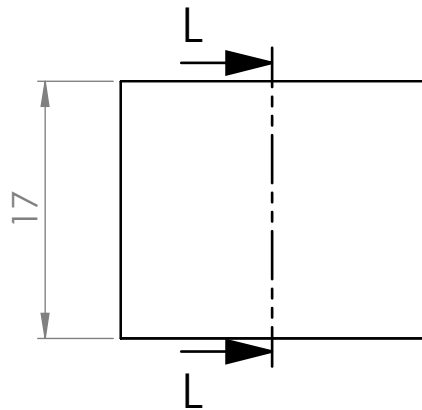
 Universidad Pública de Navarra Nafarroako Unibertsitate Publikoa	E.T.S.I.I.T.	DEPARTAMENTO:		
	INGENIERO TECNICO INDUSTRIAL M.	DEPARTAMENTO DE ING. MECANICA, ENERGETICA Y DE MATERIALES		
<b>PROYECTO:</b> Caracterización y mejora del proceso de trefilado y tratamiento térmico de nuevas aleaciones de Aluminio para la fabricación de conductores eléctricos de líneas aéreas de alta tensión.		<b>REALIZADO:</b> <b>SANZ SANZ, JAVIER</b>		
<b>PLANO:</b> HILERA METAL DURO MSM85 Y M85		<b>FECHA:</b> 26/04/2018	<b>ESCALA:</b> 2:1	<b>NºPLANO:</b> 5
<b>FIRMA:</b>				



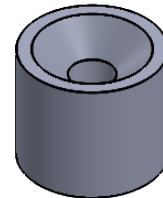
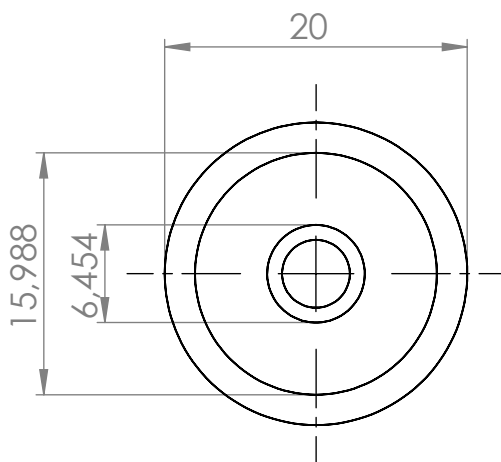
SECCIÓN F-F



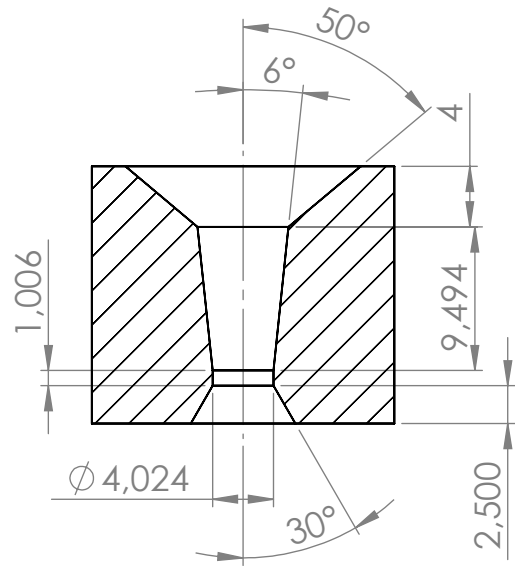
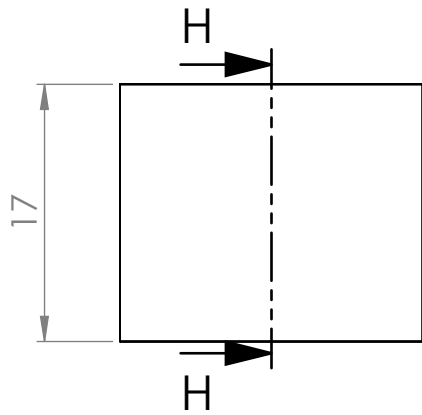
 Universidad Pública de Navarra Nafarroako Unibertsitate Publikoa	E.T.S.I.I.T.	DEPARTAMENTO:		
	INGENIERO TECNICO INDUSTRIAL M.	DEPARTAMENTO DE ING. MECANICA, ENERGETICA Y DE MATERIALES		
<b>PROYECTO:</b> Caracterización y mejora del proceso de trefilado y tratamiento térmico de nuevas aleaciones de Aluminio para la fabricación de conductores eléctricos de líneas aéreas de alta tensión.		<b>REALIZADO:</b> <b>SANZ SANZ, JAVIER</b>		
<b>PLANO:</b> HILERA METAL DURO MSM85 Y M85		<b>FIRMA:</b>	<b>FECHA:</b> 26/04/2018	<b>ESCALA:</b> 2:1
			<b>NºPLANO:</b> 6	



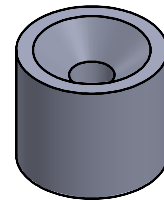
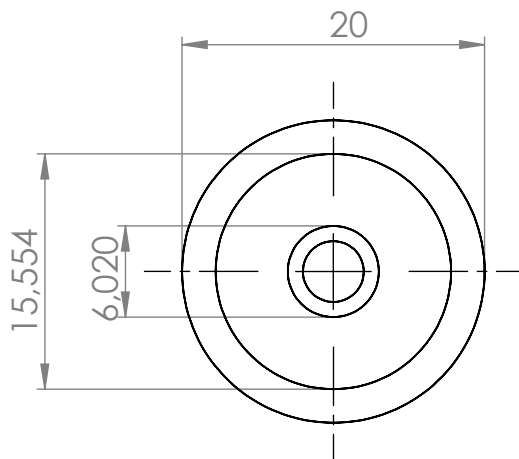
SECCIÓN L-L



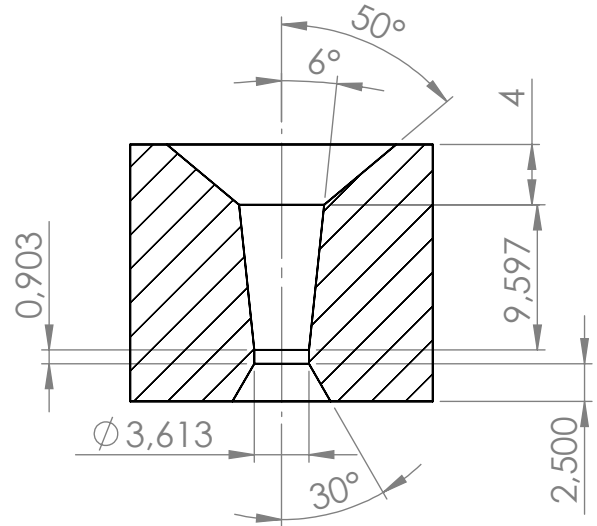
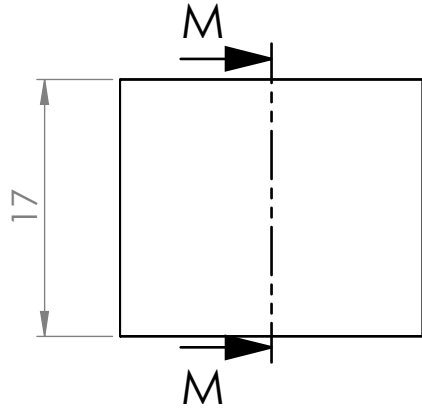
 Universidad Pública de Navarra Nafarroako Unibertsitate Publikoa	E.T.S.I.I.T.	DEPARTAMENTO:		
	INGENIERO TECNICO INDUSTRIAL M.	DEPARTAMENTO DE ING. MECANICA, ENERGETICA Y DE MATERIALES		
<b>PROYECTO:</b> Caracterización y mejora del proceso de trefilado y tratamiento térmico de nuevas aleaciones de Aluminio para la fabricación de conductores eléctricos de líneas aéreas de alta tensión.		<b>REALIZADO:</b> <b>SANZ SANZ, JAVIER</b>		
<b>PLANO:</b> HILERA METAL DURO MSM85 Y M85		<b>FECHA:</b> 26/04/2018	<b>ESCALA:</b> 2:1	<b>NºPLANO:</b> 7
		<b>FIRMA:</b>		



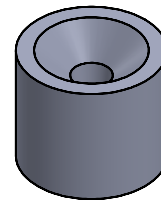
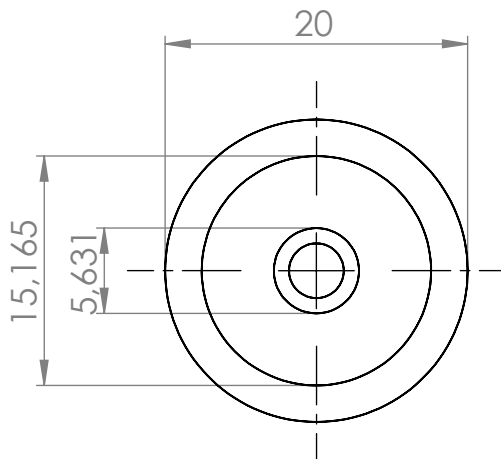
SECCIÓN H-H



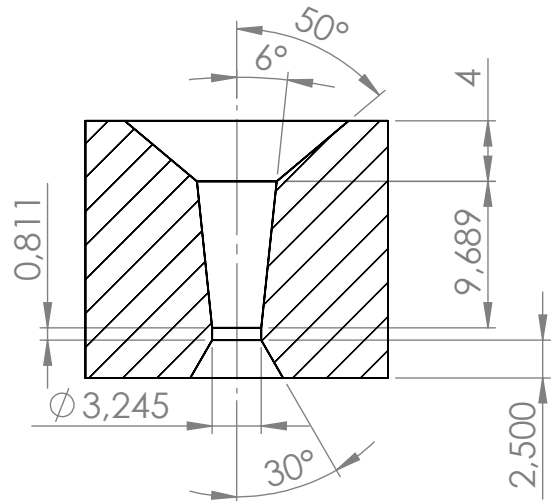
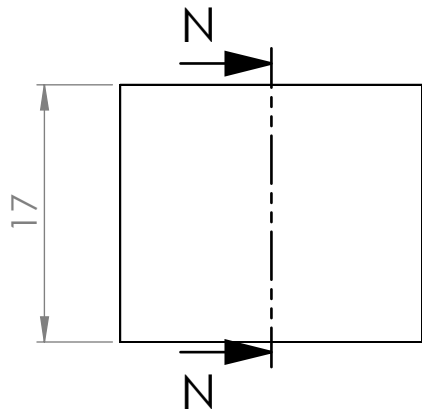
 Universidad Pública de Navarra <i>Nafarroako</i> <i>Unibertsitate Publikoa</i>	E.T.S.I.I.T.	DEPARTAMENTO:	
	INGENIERO TECNICO INDUSTRIAL M.	DEPARTAMENTO DE ING. MECANICA, ENERGETICA Y DE MATERIALES	
<b>PROYECTO:</b> Caracterización y mejora del proceso de trefilado y tratamiento térmico de nuevas aleaciones de Aluminio para la fabricación de conductores eléctricos de líneas aéreas de alta tensión.		<b>REALIZADO:</b> <b>SANZ SANZ, JAVIER</b>	
<b>PLANO:</b> HILERA METAL DURO MSM85 Y M85		<b>FECHA:</b> 26/04/2018	<b>ESCALA:</b> 2:1
		<b>NºPLANO:</b> 8	



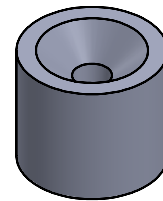
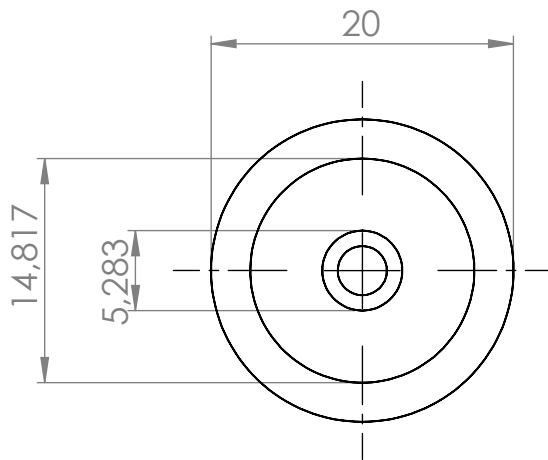
SECCIÓN M-M



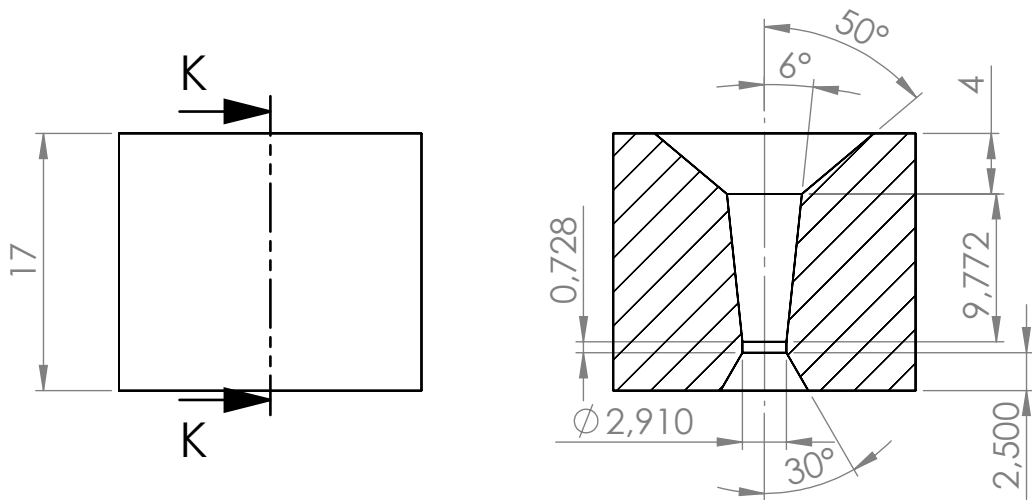
 Universidad Pública de Navarra Nafarroako Unibertsitate Publikoa	E.T.S.I.I.T.	DEPARTAMENTO:		
	INGENIERO TECNICO INDUSTRIAL M.	DEPARTAMENTO DE ING. MECANICA, ENERGETICA Y DE MATERIALES		
<b>PROYECTO:</b> Caracterización y mejora del proceso de trefilado y tratamiento térmico de nuevas aleaciones de Aluminio para la fabricación de conductores eléctricos de líneas aéreas de alta tensión.		<b>REALIZADO:</b> <b>SANZ SANZ, JAVIER</b>		
<b>PLANO:</b> HILERA METAL DURO MSM85 Y M85		<b>FECHA:</b> 26/04/2018	<b>ESCALA:</b> 2:1	<b>NºPLANO:</b> 9
<b>FIRMA:</b>				



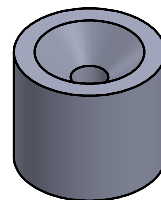
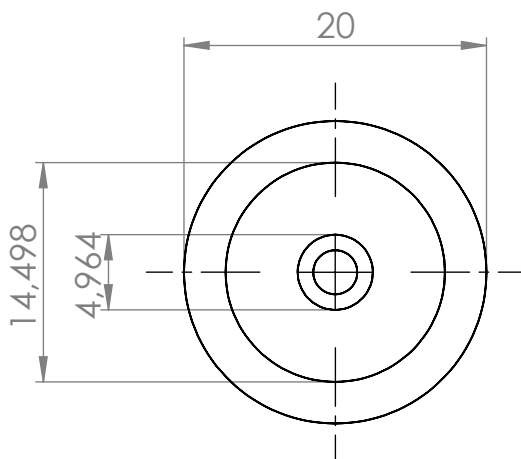
SECCIÓN N-N



 Universidad Pública de Navarra Nafarroako Unibertsitate Publikoa	E.T.S.I.I.T.	DEPARTAMENTO:	
	INGENIERO TECNICO INDUSTRIAL M.	DEPARTAMENTO DE ING. MECANICA, ENERGETICA Y DE MATERIALES	
<b>PROYECTO:</b> Caracterización y mejora del proceso de trefilado y tratamiento térmico de nuevas aleaciones de Aluminio para la fabricación de conductores eléctricos de líneas aéreas de alta tensión.		<b>REALIZADO:</b> <b>SANZ SANZ, JAVIER</b>	
<b>PLANO:</b> HILERA METAL DURO MSM85 Y M85		<b>FECHA:</b> 26/04/2018	<b>ESCALA:</b> 2:1
		<b>NºPLANO:</b> 10	

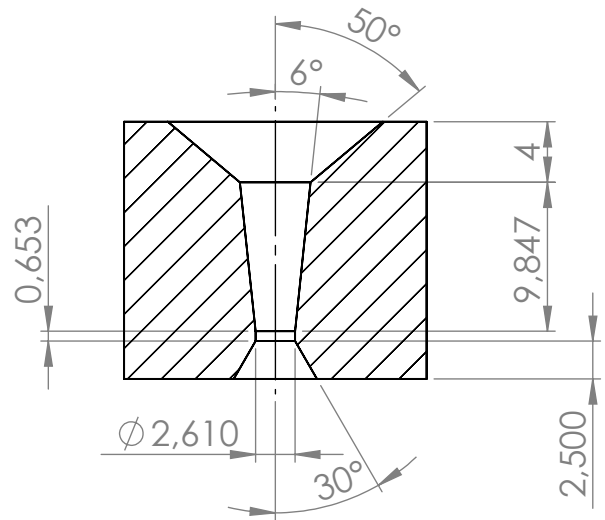
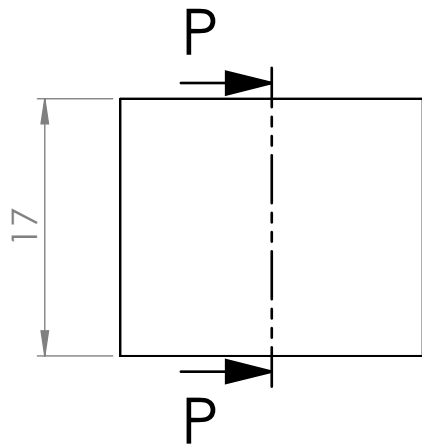


SECCIÓN K-K

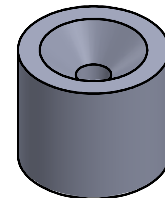
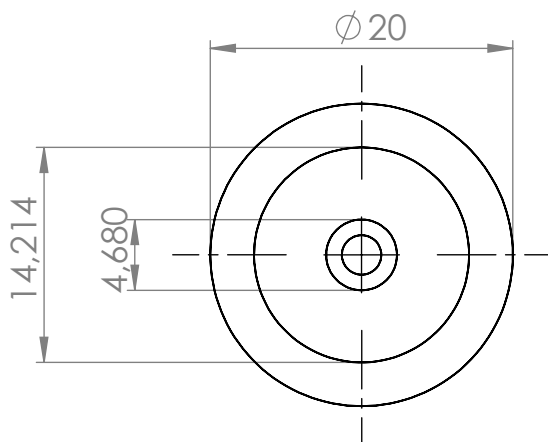


 Universidad Pública de Navarra Nafarroako Unibertsitate Publikoa	E.T.S.I.I.T.	DEPARTAMENTO:		
	INGENIERO TECNICO INDUSTRIAL M.	DEPARTAMENTO DE ING. MECANICA, ENERGETICA Y DE MATERIALES		
<b>PROYECTO:</b> Caracterización y mejora del proceso de trefilado y tratamiento térmico de nuevas aleaciones de Aluminio para la fabricación de conductores eléctricos de líneas aéreas de alta tensión.		<b>REALIZADO:</b> <b>SANZ SANZ, JAVIER</b>		
<b>PLANO:</b> HILERA METAL DURO MSM85 Y M85		<b>FECHA:</b> 26/04/2018	<b>ESCALA:</b> 2:1	<b>NºPLANO:</b> 11
		<b>FIRMA:</b>		





SECCIÓN P-P



 Universidad Pública de Navarra Nafarroako Unibertsitate Publikoa	E.T.S.I.I.T.	DEPARTAMENTO:		
	INGENIERO TECNICO INDUSTRIAL M.	DEPARTAMENTO DE ING. MECANICA, ENERGETICA Y DE MATERIALES		
<b>PROYECTO:</b> Caracterización y mejora del proceso de trefilado y tratamiento térmico de nuevas aleaciones de Aluminio para la fabricación de conductores eléctricos de líneas aéreas de alta tensión.		<b>REALIZADO:</b> <b>SANZ SANZ, JAVIER</b>		
<b>PLANO:</b> HILERA METAL DURO MSM85 Y M85		<b>FECHA:</b> 26/04/2018	<b>ESCALA:</b> 2:1	<b>NºPLANO:</b> 12
		<b>FIRMA:</b>		