



*Informe - Proyecto final – Ingeniería Mecánica*

## **Dimensionamiento y ensayo de probetas de tracción por fuera de norma realizadas a través del proceso de electroerosión**



*Autor:* **Maxime Pin**

*ITBA/Arts et Métiers – Máster en Ingeniería Mecánica - Legajo: 64.843*

- *Dirección:* **Aníbal Adrián Rodríguez**, responsable del laboratorio CeMat, Departamento de Ambiente y Movilidad, ITBA.
- *Co-Dirección:* **Luciano Santos**, responsable del laboratorio CIDIM, Departamento de Ambiente y Movilidad, ITBA.
- *Tutor:* **Enrique Chomik**, director de departamento, Gerencia Materiales, CNEA.

# Índice

Índice .....	2
1 Introducción .....	4
1.1 Generalidades para el estudio de los materiales .....	4
1.1.1 Esfuerzos.....	4
1.1.2 Tensión y Resistencia .....	5
1.1.3 Deformación .....	6
1.1.4 Módulo de elasticidad longitudinal .....	7
1.1.5 Efecto de entalla .....	9
1.1.6 Metales frágiles y plásticos.....	9
1.1.7 Probetas.....	10
1.2 Los ensayos de tracción.....	15
1.2.1 El límite convencional.....	17
1.2.2 Efectos de carga .....	17
1.2.3 Valores significativos.....	18
1.2.4 Efectos debilitadores .....	20
1.2.5 Extensómetros.....	20
1.2.6 Las máquinas de ensayo de tracción .....	21
1.2.7 Condiciones de ensayo .....	21
1.2.8 Velocidades de ensayo .....	22
1.3 Tecnología EDM y proceso de corte por hilo .....	24
1.3.1 Introducción .....	24
1.3.2 Principio físico.....	24
1.4 Problema y objetivos .....	25
1.4.1 Problemas.....	25
1.4.2 Objetivos.....	26
2 Metodología .....	27
2.1 Sitio de estudio.....	27
2.1.1 Laboratorio ITBA – CeMat .....	27
2.1.2 Laboratorio CNEA .....	29
2.2 Muestras.....	29
2.2.1 Desarrollo de las probetas.....	29
2.2.2 Organización de corte y definición del bloque de metal .....	30
2.2.3 Corte por hilo de las probetas planas.....	37
2.2.4 Mecanizado de las probetas cilíndricas .....	44
2.2.5 Metalografía .....	46
2.2.6 Tema de la superficie .....	51
2.2.7 Primer ensayo de tracción .....	52
3 Resultados .....	53
3.1 Método ensayo de tracción practico .....	53
3.2 El extensómetro.....	55
3.3 Resultados probetas planas grandes .....	55
3.3.1 Características de las probetas .....	55
3.3.2 Resultados gráficos .....	57
3.3.3 Datos numéricos.....	58
3.4 Resultados probetas planas medianas .....	59
3.4.1 Características de las probetas .....	59
3.4.2 Resultados gráficos .....	61
3.4.3 Datos numéricos.....	62
3.5 Resultados probetas planas pequeñas .....	63

3.5.1	Características.....	63
3.5.2	Resultados gráficos.....	65
3.5.3	Datos numéricos.....	66
3.6	Observación de la rotura.....	68
3.7	Análisis de incertidumbre.....	75
4	Discusión.....	77
4.1	Introducción a la discusión e hipótesis.....	77
4.2	Discusión tamaño por tamaño.....	78
4.2.1	Probetas grandes.....	78
4.2.2	Probetas medianas.....	79
4.2.3	Probetas pequeñas.....	80
4.3	Impacto del tamaño en los resultados.....	82
4.3.1	Rp0,2.....	82
4.3.2	Rm.....	83
4.3.3	A%.....	84
4.3.4	Estricción Z.....	85
4.4	Impacto de la superficie en los resultados.....	85
4.4.1	Rp0,2.....	86
4.4.2	Rm.....	86
4.4.3	A%.....	87
5	Conclusión.....	88
6	Agradecimientos.....	89
7	Anexos.....	90
7.1	Anexo 1: Símbolos y designaciones de la norma IRAM/IAS U 500-102:2016 [4].....	90
7.2	Anexo 2: Plano de una probeta plana de tracción estándar.....	92
7.3	Anexo 3: Planos de las probetas diseñadas para el proyecto.....	93
7.4	Anexo 4: Gcode para torneear las probetas cilíndricas medianas.....	99
8	Bibliografía.....	100

# 1 Introducción

A lo largo de la historia de la humanidad se ha visto una evolución constante sobre la tecnología. Esta evolución ha permitido ir transformando y mejorando el desarrollo de edificios e infraestructuras, máquinas, elementos de consumo, entre otros, llegando a la actualidad. Para ello, fue indispensable comprender ciertos principios y procesos, como por ejemplo los materiales: su estudio físico, cómo se descomponen en partículas más pequeñas y sus comportamientos mecánicos cuando están solicitados por cargas.

Hoy en día el sector nuclear está continuamente en desarrollo y las tecnologías de reactores continúan mejorando. Con el objetivo de profundizar el conocimiento del comportamiento de materiales, como en este caso el acero expuesto a la radiación, se desarrollaron pequeñas cápsulas que contienen probetas mecánicas y que para su estudio son alojadas dentro del reactor. Por un tema de espacio limitado dentro del reactor, se requiere reducir el tamaño de las probetas, pero sin degradar la confiabilidad al obtener resultados de comportamiento mecánico para continuar siendo representativos. Así, este proyecto se enfoca en estudiar cómo varían las características mecánicas de un material dependiendo del tamaño de la probeta.

Este informe trata los ensayos de tracción que permiten obtener varios datos representativos de los materiales. Particularmente aquellos metálicos y, en algunos otros casos, compuestos. A su vez, trata el tema del proceso de corte por hilo que en este estudio ha permitido manufacturar varias geometrías de probetas, que constituye el problema principal de esta investigación.

El estudio se divide en dos partes: la primera, resume la teoría que servirá para entender de manera más eficiente el contenido experimental y la segunda, los ensayos y la interpretación de sus resultados. A su vez, la segunda parte experimental, se presenta dividida en dos ejes temáticos: los temas de electroerosión y los ensayos de tracción realizados.

## 1.1 [Generalidades para el estudio de los materiales](#)

### 1.1.1 [Esfuerzos](#)

En ciencia y tecnología la evaluación mecánica de los materiales es sumamente importante. Esto consiste en someter una probeta (muestra con dimensiones estandarizadas de material) a cargas que producirán esfuerzos dentro de la misma con el objetivo de deformarla. Estos esfuerzos activan procesos que provocarán movimientos o variaciones en su estructura [1]. Los esfuerzos se pueden clasificar según:

- El tipo de esfuerzo que desencadena la carga, que se divide en dos categorías: los esfuerzos normales que tienen una dirección normal a la sección transversal del

material solicitado y los esfuerzos tangenciales que tienen su dirección en el plano de la sección resistente a la carga.

- Las unidades: kilogramo (kg) o Newton (N).
- Las fórmulas para obtener valores numéricos.

Los 4 tipos de esfuerzos se resumen en la tabla 1.

Tabla 1: Tipos de esfuerzos que puede estar solicitada una probeta en un laboratorio de ensayos [1]

Normales - $\sigma$	Tangenciales - $\tau$
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tracción y compresión</li> <li>• Flexión</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Torsión</li> <li>• Corte</li> </ul>

Además, los valores en kg o N de los esfuerzos que pueden generarse en el material no dan una medida de su resistencia o capacidad para soportar las cargas que les pueden ser aplicadas, por ser función de sus dimensiones.

### 1.1.2 Tensión y Resistencia

Para los estudios mecánicos, los valores de los esfuerzos generados no son suficientes, así que hay una necesidad de incluir las dimensiones del material. De esta manera, con el uso de la sección del material se obtiene un valor de “Tensión” que permite tener información sobre la resistencia o la capacidad de dicho material para soportar cargas. Por definición, una tensión o esfuerzo unitario es la resistencia de la unidad de área a una fuerza externa.

Así se obtienen varias fórmulas (1.1 a 1.2):

$$Tension\ normal = \frac{Esfuerzo\ normal}{Seccion} = \sigma = \frac{P_N}{S} \left( \frac{N}{mm^2}; MPa \right) \quad (1.1)$$

$$Tension\ tangencial = \frac{Esfuerzo\ tangencial}{Seccion} = \tau = \frac{P_T}{S} \left( \frac{N}{mm^2}; MPa \right) \quad (1.2)$$

Estas fórmulas se pueden aplicar directamente con los valores de esfuerzo. Se usan para los esfuerzos de tracción/compresión y de corte. Para los esfuerzos de flexión y de torsión, donde la tensión resulta de un momento interior al material, calculamos con las fórmulas siguientes [1]:

$$Tension\ de\ flexion = \frac{Modulo\ flector\ aplicado\ o\ interior}{Modulo\ resistente\ normal} = \sigma = \frac{Mf}{Wx} \quad (1.3)$$

$$\text{Tension de torsion} = \frac{\text{Modulo torsor aplicado o interior}}{\text{Modulo resistente polar}} = \tau = \frac{Mt}{Wp} \quad (1.4)$$

Las unidades son nuevamente:  $\frac{N}{mm^2}$  ; *MPa*.

Debido a que el presente trabajo solamente abarca ensayo de tracción, solo se utilizarán las fórmulas 1.1 y 1.2 para los casos simples de estudios de tracción simple se usa la fórmula dicho convencional que, al contrario de la fórmula de tensión real, utiliza la sección transversal inicial del material:  $S_0$ .

Tabla 2: Los tipos de tensión [1]

	Tensión convencional	Tensión real
Símbolo	$\sigma_c$	$\sigma_r$
Formula	$\frac{P}{S_0}$	$\frac{P}{S}$

Donde  $P$  es el peso (en kg),  $S_0$  la sección transversal inicial y  $S$  la sección real o efectiva.

Este método de estudio requiere que las fuerzas estén uniformemente repartidas sobre la sección de estudio, así que, en el caso contrario, donde las cargas no son repartidas uniformemente o para piezas con geometría particular, se usó el método del estudio de tensión por punto.

### 1.1.3 Deformación

Los esfuerzos que generan tensiones dentro del material provocan movimiento al nivel atómico en su estructura y resultando en deformaciones. Las deformaciones se dividen en dos tipos: elásticas y plásticas.

#### 1.1.3.1 Tracción

La tracción de los materiales se experimenta en laboratorios con una máquina de ensayos universal. El tema será más desarrollado en el capítulo “Los ensayos de tracción” (1.2). La tracción involucra mayormente una deformación longitudinal según el eje de la carga aplicada, así que se observe un alargamiento longitudinal de las probetas o piezas metálicas que sigue la fórmula [1]:

$$\text{Alargamiento} = \Delta l = l - l_0 \quad (mm) \quad (1.5)$$

Con:  $l$  la longitud final y  $l_0$  la longitud de referencia o longitud inicial.

Se deduce la deformación unitaria:

$$\text{Deformacion unitaria} = \varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (1.6)$$

Con este alargamiento, se observa también un fenómeno de estricción tal que:

$$\text{Estriccion} = \frac{S_0 - S}{S_0} \quad (1.7)$$

Con  $S_0$  la sección inicial y  $S$  la sección final a la rotura.

### 1.1.3.2 Deformación elástica

Una deformación elástica corresponde a una deformación del material reversible. Al cesar de realizar la carga sobre el material, éste vuelve a su estado inicial después de un periodo de tiempo definido [1]. Este fenómeno elástico toma su periodo en los primeros instantes del ensayo, donde la curva de tensiones describe una recta.

### 1.1.3.3 Deformación plástica

Al contrario de una deformación elástica, la deformación plástica involucra una deformación irreversible del material.

### 1.1.4 Módulo de elasticidad longitudinal

Si se somete un cuerpo a cargas estáticas de tracción y se crea un diagrama de ensayo tal que tiene las tensiones  $\sigma$  como ordenadas y los alargamientos unitarios  $\varepsilon$  como abscisas, se verifica la Ley de Hooke en la primera parte recta del diagrama al medio de la fórmula siguiente [1]:

$$\varepsilon = \alpha \times \sigma \quad (\text{Hooke}) \quad (1.9)$$

Con  $\alpha$  el coeficiente de extensión o de alargamiento.

Esta ley permite para los metales, específicamente los aceros, de aproximar con muy buena precisión la recta del sector elástico del diagrama que vamos a tratar en sección 1.2.

Se puede deducir, tomando el inverso del coeficiente de alargamiento, el módulo de elasticidad longitudinal o módulo de Young [1]:

$$E = \frac{1}{\alpha}, \text{ entonces } \varepsilon = \frac{\sigma}{E} \leftrightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1.10)$$

El módulo de Young es dependiente de la temperatura del ensayo, así que, para un mismo material,  $E$  puede cambiar entre 2 ensayos distintos con temperaturas distintas. Este puede ser determinado gráficamente con varios métodos, pero el más simple resulta considerar  $E$  como tangente de la curva en el origen en un ensayo de tracción.

Por otra parte, el alargamiento longitudinal se producirá a expensas de una contracción tangencial del material si seguimos la hipótesis de conservación de volumen. De esta manera el alargamiento y la contracción son vinculados por la relación de Poisson [1]:

$$\text{Coeficiente de Poisson} = \mu = -\frac{\varepsilon_a}{\varepsilon_t} \text{ con } \varepsilon_t = \frac{d_0 - d}{d_0} \quad (1.11)$$

Con  $\varepsilon_a$  el alargamiento axial y  $\varepsilon_t$  el alargamiento transversal.

El coeficiente de Poisson permite calcular el módulo de elasticidad transversal G [1]:

$$G = \frac{E}{2(1 + \mu)} \quad (1.12)$$

#### Determinación del módulo de elasticidad E :

Hay otras formas de calcular el módulo de elasticidad. Siguen dos ejemplos que pueden ser métodos para calcular su valor.

- Por regresión lineal:  $E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \tan \varphi \quad (1.13)$   
(Método usado con los datos numéricos en la parte experimental).

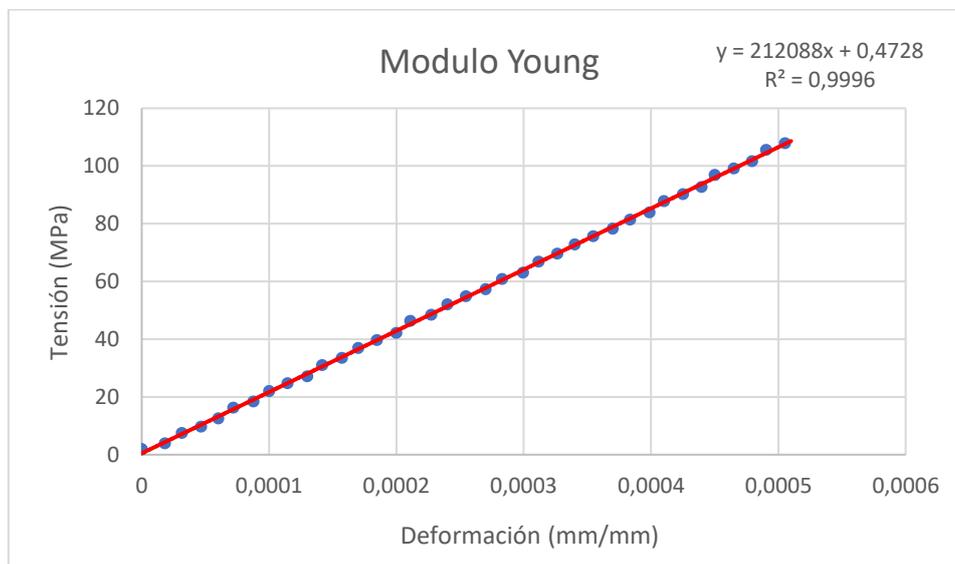


Figura 1 : Método por "regresión lineal" del módulo de Young

En este método el coeficiente de la línea corresponde a una aproximación del módulo elástico del material. Aquí en este caso se revela coherente el módulo elástico de un acero básico cerca de 210 000 MPa.

- Por registro electrónico:  $E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\Delta P}{S_0} \times \frac{l_0}{\Delta l} \quad (1.14)$

### 1.1.5 Efecto de entalla

Ya se presentó que la geometría y las dimensiones tenían un impacto directo sobre las tensiones y que de tal manera afectan la rotura (tipo, resistencia, velocidad...) del material al fin del ensayo de tracción. Así, las entallas en un objeto o geometrías complejas son factores de concentración de tensiones que pueden debilitar el material, naciendo el fenómeno de fragilidad de entalladura. De hecho, las probetas de tracción estándares con objetivos de investigación presentan geometrías suaves y tienen caras rectificadas.

### 1.1.6 Metales frágiles y plásticos

Las deformaciones de un material pueden ser estudiadas a tres niveles: macroscópico, microscópico y también en el mundo cuántico. La última escala es la que nos interesa en este párrafo.

Se debe empezar por definiciones: los materiales frágiles se rompen en su zona elástica con muy poca deformación y su fractura tiene lugar de manera brusca y rápida. Al contrario, los metales plásticos se deforman de manera consecuente, deformaciones provocadas por las tensiones tangenciales que le son críticas. Se designa como metal "dúctil".

Los materiales metálicos se componen al nivel atómico de redes de celda unitarias constituidas de átomos. Relacionado con esta organización de red, las deformaciones son la consecuencia de un deslizamiento de los átomos dentro de la red cristalina. Estos movimientos son vinculados a las imperfecciones de la estructura cristalográfica del material.

Varios defectos existen a diferentes niveles:

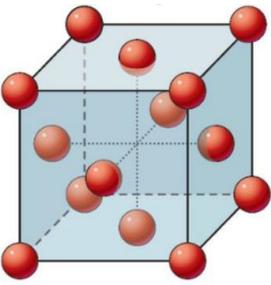
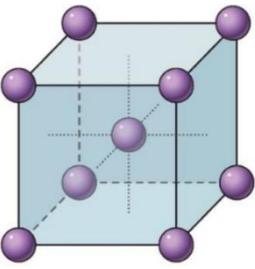
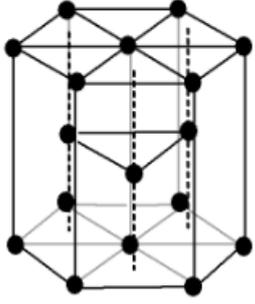
- Los defectos puntuales: las vacancias atómicas (falta de un átomo en la red), átomo intersticial (un átomo más en la red).
- Los defectos lineales: las dislocaciones de borde.

De esta manera se forman los planos de deslizamiento, que son los preferenciales para las direcciones de deformación.

A la escala microscópica se observa granos de metal que son una red de celdas cúbicas unitarias en la misma dirección. Así que entre cada grano se encuentra un límite de grano que son barreras naturales a los deslizamientos y a las dislocaciones. Se cumple que, al reducir el tamaño de grano, se aumenta la dureza y la resistencia mecánica. De hecho, se puede notar que la homogeneidad favorece las propiedades mecánicas.

Los tres tipos de celdas más importantes en los metales son las cúbicas de caras centradas (CCC), cúbicas centradas (CC) y hexagonal compacto (HC).

Tabla 3: Las varias geometrías de celdas

 <p>Figura 2: Cubica Cara Centrada [8]</p>	 <p>Figura 3: Cubica Centrada [8]</p>	 <p>Figura 4: Hexagonal Compacto [7]</p>
<p>CCC</p>	<p>CC</p>	<p>HC</p>
<p>Las células CCC comportan 12 sistemas de deslizamiento, así que tienen una aptitud a deformarse grande. Son en mayoría metales plásticos.</p>	<p>Las células CC son metales llamados “semi dúctiles”.</p>	<p>Tienen 3 sistemas de deslizamiento y los planos de deslizamiento son perpendiculares o paralelos a la carga, lo que resulta en un material frágil. Son poli cristales de baja ductilidad.</p>

### 1.1.7 Probetas

Por definición, una probeta es una pieza destinada a un ensayo [1]. Se clasifican en 2 categorías:

- Probetas industriales: son probetas de verificación del material industrial en los proyectos. Las probetas vienen directamente del material comprado y usado en el proyecto industrial.
- Probetas calibradas o normalizadas: son destinadas a determinar las propiedades mecánicas de un material. Generalmente, son ensayos en laboratorios, así que requieren un acabado más limpio. Son tres tipos de probetas diferentes:

Tipo de producto		
Productos planos (chapas, flejes) y perfiles conformados en frío 	Alambres, alambrones, barras y perfiles laminados 	Tubos 
Anexo A	Anexo B	Anexo C

Figura 5: Tipos de geometría de probetas estándares [4]

En los laboratorios el objetivo es que las probetas sean comparables así que para múltiples tamaños de probetas se usa la “Ley de semejanza” [4]:

$$\frac{l_0}{\sqrt{S_0}} = \frac{l_0'}{\sqrt{S_0'}} = k \quad (1.15)$$

Funciona también si se toma el inverso, formula llamada “Ley de Borda” o “Ley de similitud”. Para probetas cortas se usan generalmente cuando se busca solamente la resistencia del material. En la norma argentina “IRAM IAS U 500 102 2016” sugiere utilizar una fórmula de proporcionalidad para las probetas de ensayos proporcionales que permite establecer la longitud inicial de una probeta dando su sección inicial [4]:

$$L_0 = 5,65\sqrt{S_0} = 5\sqrt{\frac{4S_0}{\pi}} \geq 15mm \quad (1.16)$$

En general, se toma una longitud inicial que es el múltiplo de 5 mm lo más cerca del valor obtenido con la fórmula. Para probetas de ensayo no normalizadas, especialmente con probetas de longitud inicial menor a 20 mm, se supone un crecimiento de la incertidumbre en la medición es considerable.

Cada norma (IRAM/IAS, ASTM E8/E8M e ISO) tiene su propia definición de la probeta estándar y sus propias dimensiones, así que es interesante comparar las diferencias entre las normas. En las normas ISO e IRAM se encuentra 2 tipos diferentes de probetas: las proporcionales y las no proporcionales. La primera categoría nos interesa y sigue la ley de proporcionalidad (1.15).

Se categoriza las probetas según su geometría, así que se compara las dimensiones en función de la probeta no proporcional, la más pequeña descrita en las normas:

Probetas estándar tipo “Chapas”:

IRAM/IAS U 500-102:2016

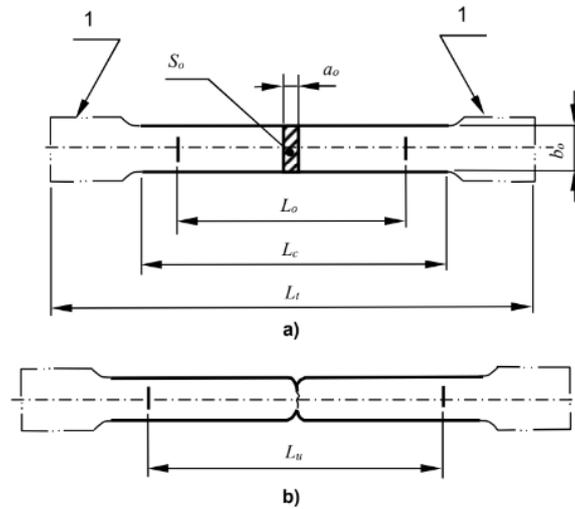


Figura 6: Probetas estándar tipo “Chapas” [4]

Referencias [4]:

- $a_0$  espesor inicial de una probeta plana
- $b_0$  ancho inicial de la longitud calibrada de una probeta plana
- $L_c$  longitud calibrada
- $L_0$  longitud de referencia inicial
- $L_t$  longitud total de la probeta
- $L_u$  longitud de referencia final después de la rotura
- $S_0$  área de la sección transversal inicial de la zona calibrada
- 1 extremos de amarre

NOTA: La forma de los extremos de amarre de las probetas se da solo a título informativo.

La tabla 4 recuerda el método proporcional para calcular las dimensiones de las probetas. Generalmente, se usa un coeficiente  $k$  con un valor de 5,65.

Tabla 4: Geometría proporcionales [4]

Tipo de probeta y espesor (en mm)		Ancho $b_0$ (mm)	Longitud de referencia inicial $L_0$ (mm)	Longitud calibrada $L_c$ (mm)	
				Mínimo	Recomendado
Proporcionales	6	$b_0$	$k\sqrt{S_0}$	$L_0 + \frac{b_0}{2}$	$L_0 + 2b_0$

La tabla 5 compara las probetas de 12,5 mm de ancho y de 6 mm de espesor en cada norma. En la tabla 5 se observa que las normas IRAM/IAS e ISO son similares y que difiere la norma ATSM E8 en la longitud total de la probeta.

Tabla 5: Comparación de las dimensiones estándares dependiente de la norma

	IRAM	IRAM Prop	ISO	ASTM E8
<b>Dimensión</b>	mm	mm	mm	mm
<b>a<sub>0</sub></b>	6	6	6	6
<b>b<sub>0</sub></b>	12,5	12,5	12,5	12,5
<b>S<sub>0</sub></b>	75	75	75	75
<b>L<sub>0</sub></b>	50	48,9	50	50
<b>Lc min</b>	57	55,2	57	57
<b>Lc recomendado</b>	75	73,9	75	
<b>Lt</b>	87,5		87,5	200
<b>R<sub>min</sub></b>	12,5	12,5	20	12,5
<b>C aprox</b>	15	15	15	20

En la norma ASTM E8M se desarrolla también el tema de las probetas con agujeros que sirven para apretarlas en mordazas de manera sencilla y con una similitud de posición muy grande entre cada ensayo realizado:

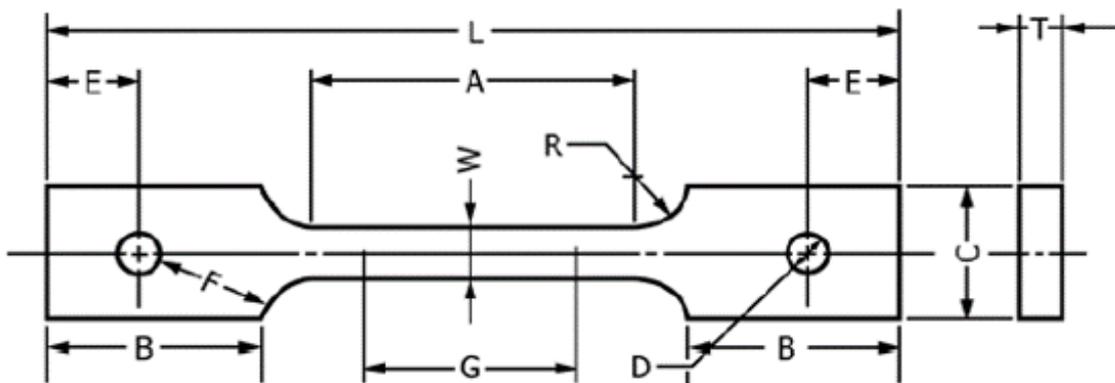


Figura 7: Símbolos de las dimensiones de la probeta plana con agujeros [6]

Las dimensiones estándar se presentan en la tabla 6.

Tabla 6: Dimensiones estándares [6]

Dimensión	mm
Tmax (a0)	16
W (b0)	12,5
S0 max	200
G (L0)	50
Amin (Lc min)	57
Bmin	50
Lmin (Lt)	200
Rmin	13
C aprox	50
Dmin	13
E	40
Fmin	13

Probetas estándar tipo “Cilindros” :

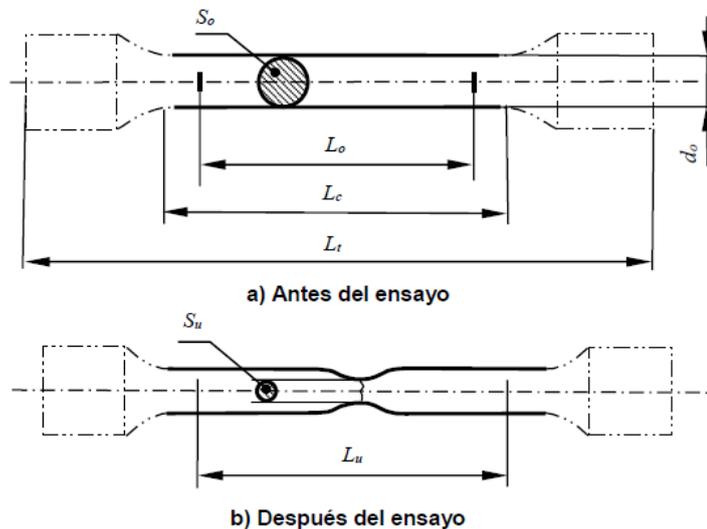


Figura 8: Probetas estándar tipo “Cilindros” [4]

Referencias [4]:

$d_0$  diámetro inicial de la longitud calibrada de una probeta redonda

$L_c$  longitud calibrada

$L_0$  longitud de referencia inicial

$L_t$  longitud total de la probeta

$L_u$  longitud de referencia final después de la rotura

$S_0$  área de la sección transversal inicial de la zona calibrada

$S_u$  área mínima de la sección transversal después de la rotura

NOTA: La forma de los extremos de amarre de las probetas se da solo a título informativo.

La tabla 7 compara las geometrías dependientes de las varias normas para el tipo “cilíndrico” de probetas:

Tabla 7: Comparación de las dimensiones dependiente de las normas

	IRAM	ISO	E8	E8 min	E8M
<b>Dimensión</b>	mm	mm	mm	mm	mm
<b>d0</b>	5	5	6	2,5	6
<b>S0</b>	19,6	19,6	28,3	4,9	28,3
<b>L0</b>	25	25	24	10	30
<b>Lc min</b>	28	28			
<b>Lc</b>	35	35	30	16	36
<b>R</b>	3,75	3,75	6	2	6

## 1.2 [Los ensayos de tracción](#)

En un ensayo de tracción, un cuerpo se encuentra sometido a un esfuerzo de tracción simple usando una máquina de ensayos universal. Sobre sus secciones transversales se le aplican cargas normales uniformemente repartidas y de modo de tender a producir su alargamiento. Los ensayos de tracción permiten determinar las propiedades mecánicas de un material y obtener un gráfico de ensayo. Fundamentalmente, los ensayos se realizan a temperatura ambiente ( $10^{\circ}\text{C}$  a  $35^{\circ}\text{C}$ ), más precisamente a  $23^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ . Mayormente utilizado para metales, se obtiene los tipos de gráficos siguiente:

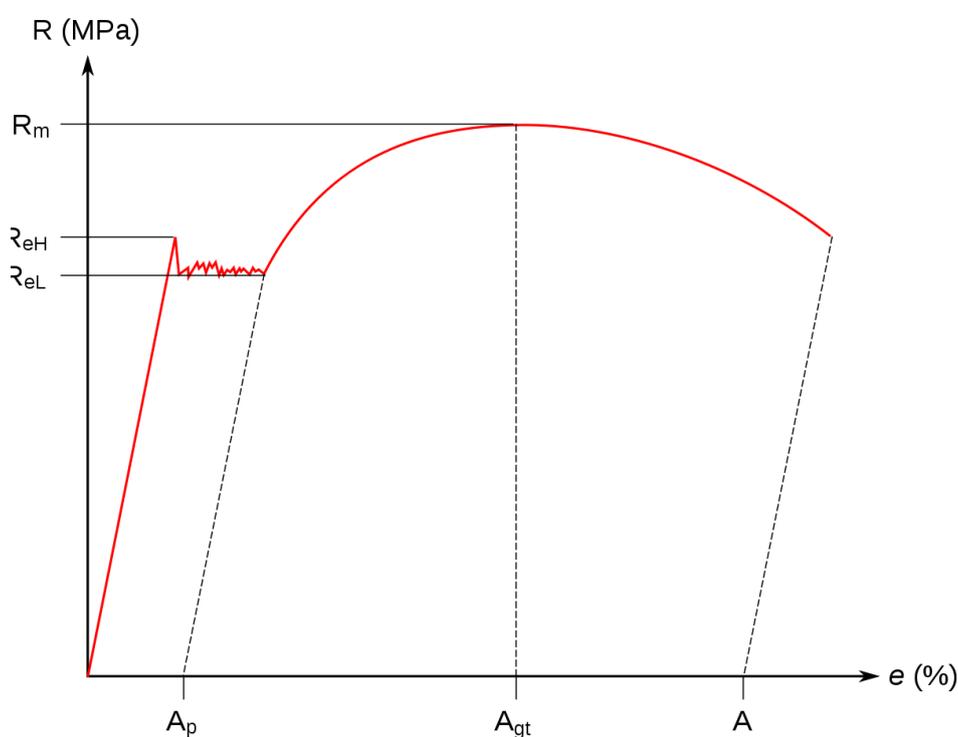


Figura 9: Gráfico ilustrativo de una curva de tracción de un acero [9]

Esta curva permite sacar los valores característicos de un metal que sirven después a la realización de cualesquier proyectos industriales.

Hay también varios tipos de ensayos:

- Los ensayos de “tracción estática” que son los más comunes y los más básicos. Son ensayos que se efectúan a velocidades relativamente bajas hasta la rotura de la probeta. Este estudio enfoca su interés en este tipo de ensayo.
- Los ensayos dinámicos que incluyen los ensayos a velocidad muy alta y los ensayos de “fatiga” donde las cargas cambian de dirección al medio del tiempo, así que el material sufre las cargas en dos direcciones opuestas.

El diagrama de ensayo de los metales, específicamente los aceros, se descompone en 4 partes distintas con muchas diferencias.

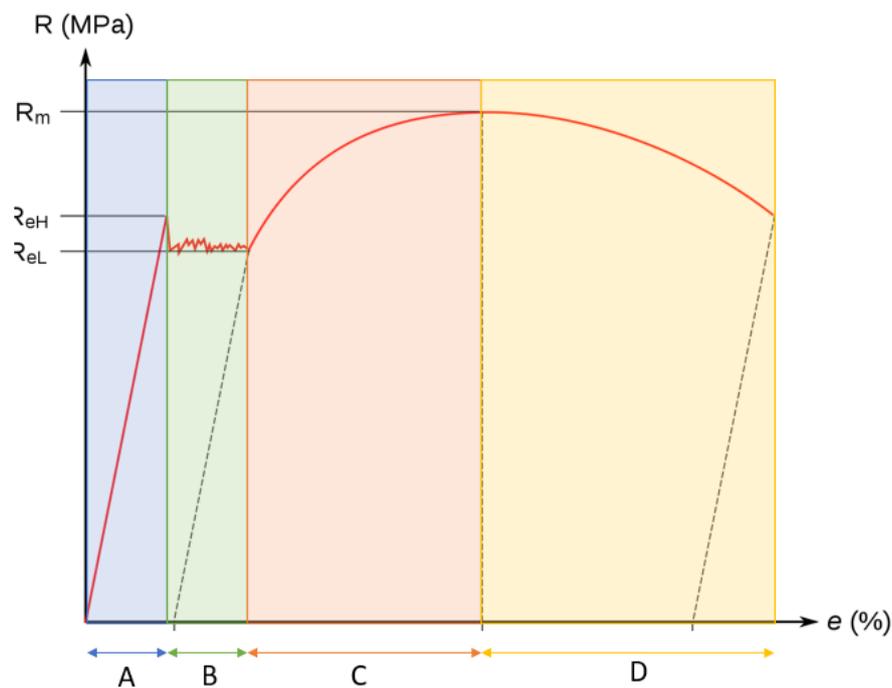


Figura 10: Las zonas en un gráfico de tracción

La zona A corresponde a la zona de elasticidad de un material, así que este material se deforma de manera elástica y a la cesa de la carga vuelve a su estado inicial. Esta zona puede ser aproximada por una recta relacionada con el módulo de elasticidad  $E$ .

La zona B se llama “Zona de fluencia”, es el periodo de transición donde el metal sufre un endurecimiento por deformación.

La zona C representa la zona de deformación plástica: el material se deforma de manera irreversible hasta la resistencia máxima que el material puede soportar.

Finalmente, la zona D llamada “Periodo de estricción” es, como su nombre lo describe, la zona donde se procede la estricción hasta la rotura de la probeta.

### 1.2.1 El límite convencional

A causa de una dificultad de determinación del fin de la recta de Hooke, existe la “límite convencional” o “límite 0.2” que permite fijar la carga capaz de producir un alargamiento permanente de 0.2%  $l_0$  y su valor se obtiene trazando el paralelo a la recta de Hooke con un origen de 0.2% de la longitud inicial.

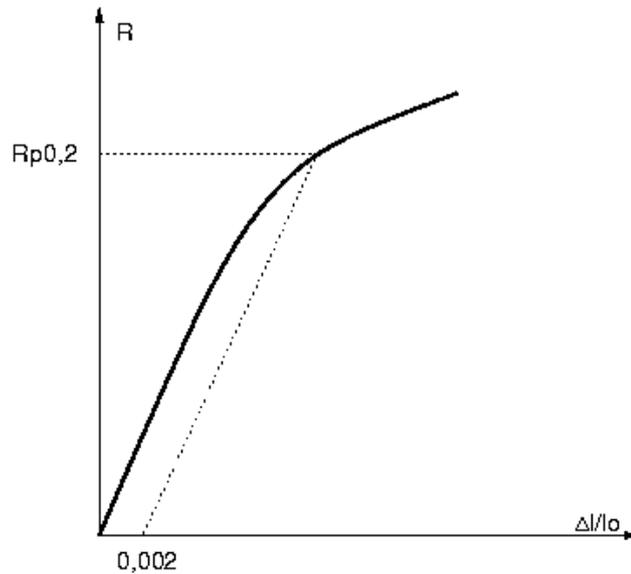


Figura 11: Resistencia convencional a 0,2 [10]

El límite convencional obtiene también con la fórmula [1]:

$$\sigma_{0.2} = \frac{P_{0.2}}{S_0} \quad (2.1)$$

### 1.2.2 Efectos de carga

Visto anteriormente las cargas/tensiones son aplicadas uniformemente sobre la sección transversal y para conseguir correctamente las cargas se necesitan sistemas autocentrantes en las máquinas de ensayos universal. De esta manera se observa el efecto de las condiciones de aplicación de las cargas sobre el material. A mayor velocidad de ensayo se observa un retraso de la aparición de las deformaciones plásticas más un aumento de la resistencia del material. Al contrario, a menor velocidad se nota una disminución del límite de fluencia, un aumento de la resistencia y una disminución de la ductilidad del material.

Siguiendo la norma ASTM E8 [6] se nota 5 criterios de ensayo:

- Velocidad en vacío de dispositivos aplicando la carga
- Velocidad de separación de las mordazas
- Tiempo de ensayo
- Incremento de los esfuerzos
- Velocidad de alargamiento

### 1.2.3 Valores significativos

Dando un gráfico de ensayo de tracción hay varios valores que se encuentran con su lectura. Los valores pueden ser categorizados en 2 partes: los valores relacionados con la resistencia y ellos relacionados con la deformación [1].

#### **Resistencia:**

$$\text{Resistencia estática a la tracción: } R_{ET} = \frac{P_{max}}{S_0} \quad (MPa) \quad (2.2)$$

$$\text{Tensión al límite inicial de fluencia: } R_f = \frac{P_f}{S_0} \quad (MPa) \quad (2.3)$$

$$\text{Tensión al límite convencional 0.2: } R_{0.2} = \frac{P_{0.2}}{S_0} \quad (MPa) \quad (2.4)$$

Para tener una idea de los límites, son los siguientes:

- Límite superior de fluencia  $R_{eH}$
- Límite inferior de fluencia  $R_{eL}$
- Límite elástico convencional 0.2  $R_{p0.2}$
- Límite de alargamiento  $R_t$

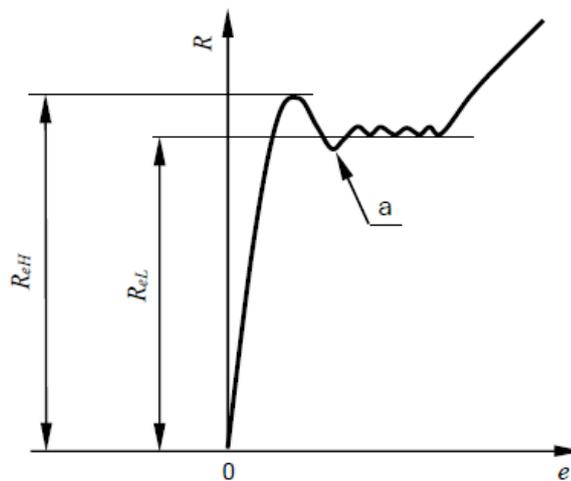


Figura 12: Los límites de resistencia [4]

#### **Deformación:**

Varias extensiones existen tal que:

- Extensión porcentual del escalón de fluencia ( $A_e$ )
- Extensión total porcentual bajo tensión máxima  $A_{gt} = \frac{\Delta Lm}{L_e} \quad (2.5)$   
con  $\Delta Lm$  la extensión total bajo tensión máxima
- Extensión plástica porcentual bajo tensión máxima  $A_g = \left( \frac{\Delta Lm}{L_e} - \frac{Rm}{m_E} \right) \times 100 \quad (2.6)$   
con  $m_E$  la pendiente de la parte elástica

- Extensión total porcentual de rotura  $A_t = \frac{\Delta L_f}{L_e} \times 100$  (2.7)  
con  $\Delta L_f$  la extensión al momento de la rotura

- Alargamiento porcentual de rotura:  $A_{\%} = \frac{\Delta l}{l_0} \times 100 = \frac{l - l_0}{l_0} \times 100$  (2.8)

- Estricción:  $Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \times 100$  (2.9)  
con  $S_u$  a medir con una precisión de  $\pm 2\%$

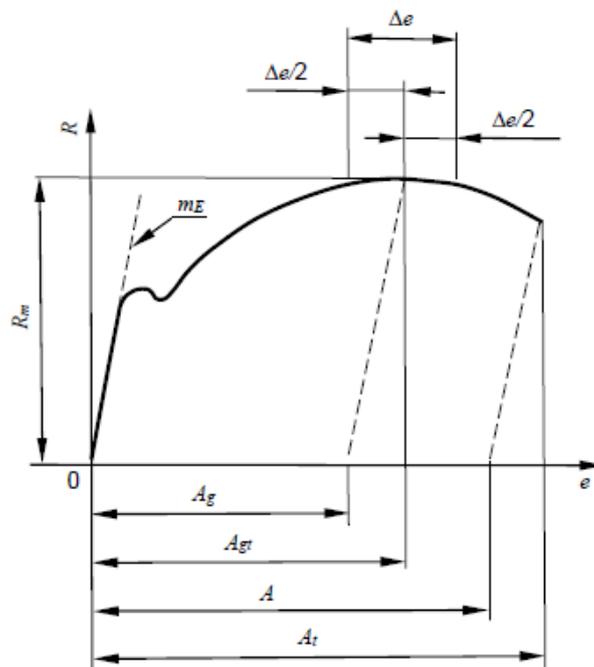


Figura 13: Gráfico de tracción estándar [4]

#### Referencias:

- $A$  alargamiento porcentual de rotura (determinado a partir de la señal del extensómetro o directamente en la probeta)
- $A_g$  extensión plástica porcentual bajo tensión máxima
- $A_{gt}$  extensión total porcentual bajo tensión máxima
- $A_t$  extensión total porcentual de rotura
- $e$  extensión porcentual
- $m_E$  pendiente de la parte elástica de la curva de tensión extensión porcentual
- $R$  tensión
- $R_m$  resistencia a la tracción
- $\Delta_e$  longitud de la meseta

#### 1.2.4 Efectos debilitadores

Son numerosos los efectos debilitadores de un material, pero los más observados son:

- Las variaciones de la velocidad de deformación
- La aparición de estados complejos de tensión
- Las bajas temperaturas

#### 1.2.5 Extensómetros

Con la necesidad de medición de las deformaciones del orden del centésimo o milésimo de una determinada longitud se ve necesario el empleo de medidores de deformación para calcular los límites convencionales y todos los otros valores característicos del ensayo de tracción. Así aparecen los extensómetros que existieron a lo largo de la historia.

##### Los extensómetros mecánicos:

Son extensómetros que tienen precisiones entre 0,01 a 0,0003 mm y que se usan para medir deformaciones de 5 a 250 mm hasta 1000 mm para los extensómetros construido específicamente para un proyecto. Esta categoría incluye el extensómetro de Huggenberger o el extensómetro con reloj micrométrico y a palancas.

##### Los extensómetros ópticos:

Usan los principios ópticos para medir las deformaciones.

Es el caso de los extensómetros a espejos usando el método Martens con una precisión de 0.001mm.

##### Calibres eléctricos:

Usan las deformaciones del material directamente para medirlas. Es el caso de los calibres de inductancia variable usando la variación de impedancia tal que:

$$Z = \sqrt{(2\pi f \times L)^2 + R^2} \quad (\Omega) \quad (2.10)$$

Existen los calibres de capacidad variables sobre el mismo principio, pero con la variación de la capacidad. También hay calibres "óhmicos" llamados "rosetas" que varían sus resistencias eléctricas con las deformaciones.

Por otra parte, son calibres con muy buena precisión, pero son influenciados por la temperatura u otros impactos del medio exterior. Así deben ser corregidos y por eso se usa lo que se llama el "factor de calibración":

$$k = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon} \leftrightarrow k = \frac{\Delta R/R_0}{\Delta l/l_0} \leftrightarrow \varepsilon = \frac{\Delta R/R_0}{k} \quad (2.11)$$

Con  $-12 \leq k \leq 4$  experimentalmente.

Entonces, por consecuencia, para elegir un calibre se debe prestar atención a varios parámetros en esta lista no exhaustiva:

Tabla 8: Parámetros de elección de calibre [1]

Temperatura	Variaciones de deformación
Estabilidad de temperatura	Rango de medición
Estado de deformación	

Los extensómetros son así categorizados por sensibilidad y exactitud en 6 categorías de la norma ASTM E83-96.

#### 1.2.6 Las máquinas de ensayo de tracción

Un tema principal en las máquinas de ensayo mecánico es su precisión, así que para estandarizar se usa una calibración siguiente, la norma NM-ISO 7500-1 y debe ser calibrada por un calibre de categoría 1.

Para determinar el límite elástico convencional se necesita un extensómetro de clase 1 (ISO 9513) y para otras propiedades con alargamiento mayor un extensómetro de clase 2 (ISO 9513).

#### 1.2.7 Condiciones de ensayo

Para realizar un ensayo de tracción “estática” (con velocidades de deformación bajas) hay varios métodos posibles y 2 principales:

A) Control de la velocidad de deformación:

El método A pretende minimizar la variación de las velocidades de ensayo en el momento en el que se determinan los parámetros sensibles a la velocidad de deformación para disminuir la incertidumbre de medición.

Se describen dos tipos diferentes de controles de la velocidad de deformación. El primero es el control de la velocidad de deformación en sí misma, que se basa en la información obtenida de un extensómetro.

El segundo es el control de la velocidad estimada de deformación en la longitud calibrada que se obtiene controlando la velocidad de separación de las mordazas a una velocidad igual a la velocidad de deformación deseada multiplicada por la longitud calibrada.

B) Control de la velocidad de incremento de tensión:

El método B permite ensayar controlando el incremento de tensión de la máquina de ensayo.

### 1.2.8 Velocidades de ensayo

Las velocidades de ensayo resultan muy importantes para determinar las propiedades de un material y que durante los ensayos cada sección de tiempo tiene su velocidad apropiada. Las velocidades de ensayo cambian según el método adoptado, así que es necesario usar las tablas 9 y 10 para ajustar los parámetros.

#### Método A:

Tabla 9: Método A

	IRAM	ISO	E8/E8M	E8/E8M
Unidad	s <sup>-1</sup>	s <sup>-1</sup>	s <sup>-1</sup>	min <sup>-1</sup>
ReH	0,00025	0,00025	0,00025	0,015
Rp				
Rt				
ReL	0,00025	0,00025		
Ae				
Rm	0,0067	0,0067		
Agt, Ag				
At, A				
Z				
Si extensómetro	0,00007	0,00007		

#### Método B:

Tabla 10: Método B

	IRAM min	IRAM max	ISO min	ISO max	E8/E8M min	E8/E8M max
Unidad	s <sup>-1</sup>					
ReH	0,00005	0,0005	0,00005	0,0005	0,00083	0,00833
Rp	0,00005	0,004	0,00005	0,004		
Rt						
ReL						
Ae						
Rm	0,00005	0,01	0,00005	0,01		
Agt, Ag						
At, A						
Z						

	IRAM min	IRAM max	ISO min	ISO max	E8/E8M min	E8/E8M max
Unidad	MPa/s	MPa/s	MPa/s	MPa/s	MPa/s	MPa/s
ReH	8	80	8	80	1,15	11,5
Rp						
Rt						

NOTA: Para los símbolos ver Anexo 1.

Las tablas 9 y 10 dan la velocidad a utilizar para determinar cada propiedad mecánica del material en función de la norma y del método elegido.

Gráficamente, se resume tal que:

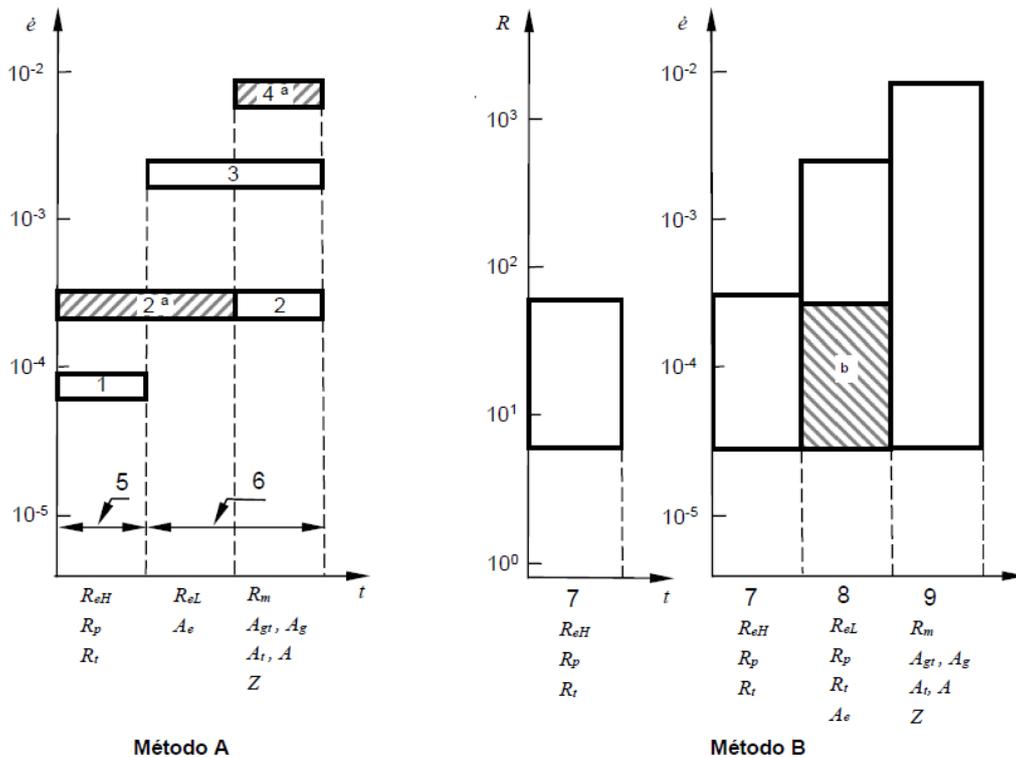


Figura 14: Resumen gráfico de las velocidades de ensayo [4]

NOTA 1: Para los símbolos ver Anexo 1

Con la legenda siguiente [4]:

- $\dot{\epsilon}$  velocidad de deformación, en 1/segundo
- $\dot{R}$  velocidad de incremento de tensión, en megapascal por segundo
- $t$  tiempo
- 1 intervalo 1:  $\dot{\epsilon} = 0,000\ 07\ s^{-1}$ , con una tolerancia relativa de  $\pm 20\%$
- 2 intervalo 2:  $\dot{\epsilon} = 0,000\ 25\ s^{-1}$ , con una tolerancia relativa de  $\pm 20\%$
- 3 intervalo 3:  $\dot{\epsilon} = 0,002\ s^{-1}$ , con una tolerancia relativa de  $\pm 20\%$
- 4 intervalo 4:  $\dot{\epsilon} = 0,006\ 7\ s^{-1}$ , con una tolerancia relativa de  $\pm 20\%$
- 5 modo de control: control de desplazamiento del extensómetro o control del cabezal
- 6 control de desplazamiento del cabezal
- 7 rango elástico del ensayo
- 8 rango elástico para la determinación de  $R_{eL}, R_p, R_t, A_e$
- 9 valor máximo de velocidad de tensión para la determinación de  $R_m, A_{gt}, A_g, A_t, A, Z$
- a Intervalo recomendado
- b Intervalo expandido para velocidades bajas

### 1.3 [Tecnología EDM y proceso de corte por hilo](#)

#### 1.3.1 [Introducción](#)

La tecnología EDM (del inglés, Electrical Discharge Machining) o mecanizado por electroerosión es un proceso que permite realizar un trabajo complejo y de precisión. Se aplica únicamente a los materiales conductores eléctricamente como los aceros u otras aleaciones conductivos. Básicamente, el proceso permite cortar un material mediante una serie de descargas eléctricas entre dos electrodos (el material de trabajo y la máquina).

#### 1.3.2 [Principio físico](#)

El proceso de corte por hilo es relativamente sencillo. La mesa de trabajo donde está mantenido en posición el bloque a cortar está alimentado eléctricamente con una carga negativa (cátodo) y el hilo es alimentado con una carga positiva (ánodo). De esta manera, cuando se acerca el hilo de la pieza a cortar ocurren pequeñas chispas (diámetros de las chispas de aproximadamente 0.1 mm) que erosionan el material en la trayectoria del hilo.

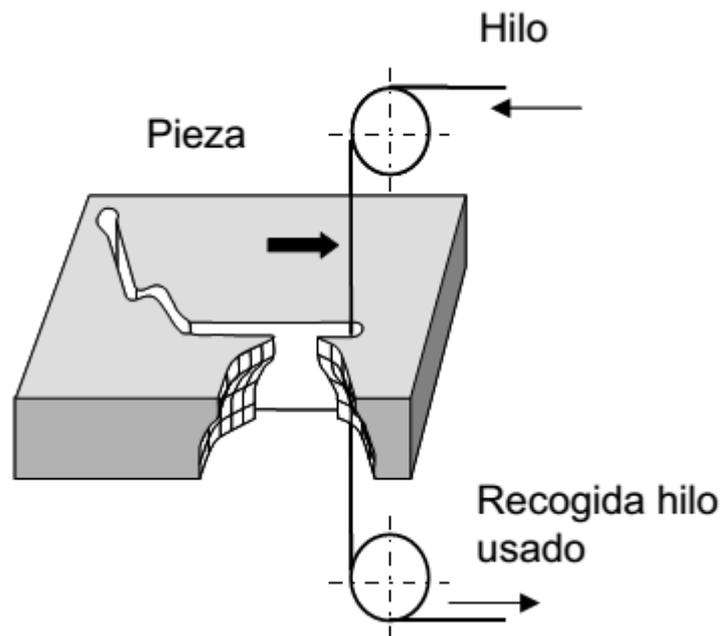


Figura 15: Principio físico ilustrado del corte por hilo [11]

El hilo es envuelto alrededor de un rodillo y da ida y vuelta para uniformizar el desgaste del hilo sobre toda su longitud. El hilo de corte tiene un diámetro de 0.18 mm y una longitud total de aproximadamente 400 m.



Figura 16: Rollo de hilo

## 1.4 [Problema y objetivos](#)

### 1.4.1 [Problemas](#)

En el sector del nuclear, los reactores son construidos de tal manera que el corazón radioactivo es contenido en un contenedor de metal con un espesor de capa muy alta.

De todos modos, los científicos se acuerdan sobre la idea que la capa protectora de metal es impactada para las radiaciones del corazón radioactivo. Así se deteriora la capa de metal del reactor y pueden aparecer problemas de fugas.

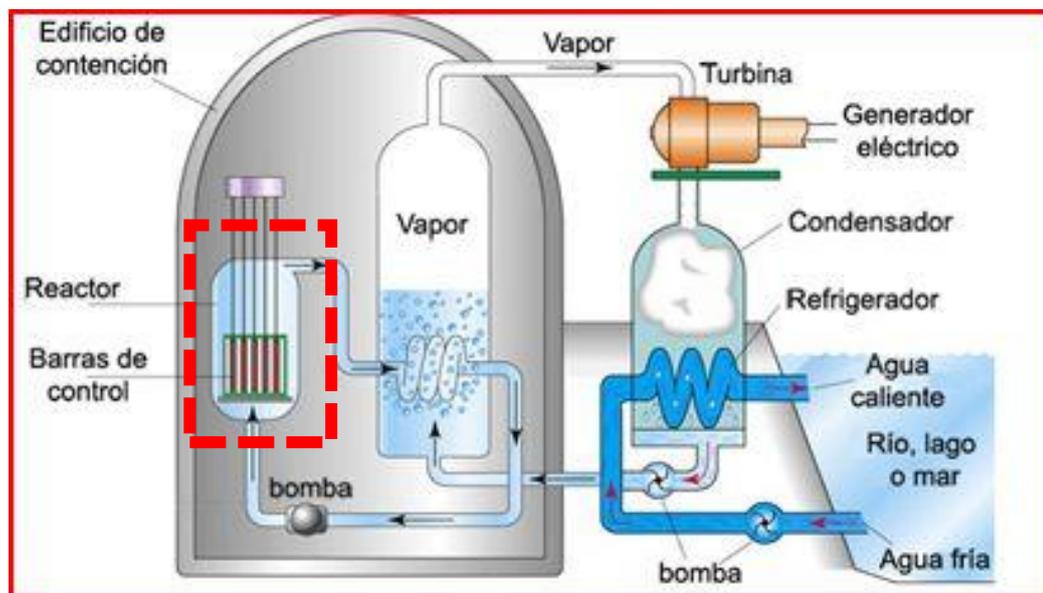


Figura 17: Funcionamiento de un reactor nuclear [12]

### 1.4.2 Objetivos

Para estudiar este impacto radioactivo, varias cápsulas de pequeño tamaño que contienen probetas mecánicas se insertan en los reactores para poner el material de estudio en situación radioactiva. Hay que notar que estas cápsulas son de tamaño muy pequeño, así que para optimizar el número de probetas impactadas es necesario reducir el tamaño de las probetas también.

Entonces, la pregunta de este proyecto es:

**“¿Cuáles son los efectos mecánicos de la reducción de las probetas mecánicas y si es posible obtener los mismos resultados con ellas que con las probetas de tamaño estándar?”**

Los objetivos son entonces:

- Afianzar conceptos de ensayos mecánicos/propiedades de los aceros
- Aprender a utilizar equipo de corte por hilo de la institución para realización de probetas de tracción
- Puesta a punto y realización de probetas de tracción con corte por hilo
- Puesta a punto y realización de ensayos mecánicos
- Evaluar resultados y verificar capacidad de ensayos con simetrías distintas

## 2 Metodología

### 2.1 [Sitio de estudio](#)

#### 2.1.1 [Laboratorio ITBA – CeMat](#)

El Centro de materiales “CEMAT” del ITBA se ubica en Parque Patricios, distrito tecnológico de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. en la sede Distrito Tecnológico ITBA. El mismo busca formar a los futuros ingenieros como dar servicio a los investigadores de la universidad en temas relacionados con calificación de materiales.

A continuación, se dará una breve presentación de dos máquinas que sirvieron al desarrollo del proyecto.



Figura 18: Máquina de corte por hilo del ITBA

#### La máquina de corte por hilo:

AR35-MA NOVICK COCHIOLA

Computadora numérica

Modelo 510R

N° : E0031742

Es un equipo de corte por hilo el cual dispone del funcionamiento con alambre de molibdeno. La mesa de trabajo se puede mover sobre dos ejes X e Y. Además, se puede manejar la posición en Z manualmente en función del ajuste deseado debido al espesor del bloque a cortar. El hilo se encuentra enrollado en un carretel el cual avanza y retrocede sistemáticamente a medida que el corte avanza en el material.



Figura 19: Máquina de tracción del ITBA

La máquina de ensayos universal:

*INSTRON 3382 + Logicial*

*Data de calibración: 04/12/2019*

*Referencia: 3382U2338*

La máquina de tracción representada en la figura 19 es usada para todos los ensayos del estudio. Este tipo de equipos permite hacer ensayos de tracción y compresión. El desplazamiento se hace únicamente en el eje Z.

### 2.1.2 [Laboratorio CNEA](#)

El laboratorio de la Comisión Nacional de Energía Atómica (CNEA) se ubica en Buenos Aires y es constituido de varios departamentos que manejan varias actividades. Fui a visitar dos sectores distintos:

- El departamento técnico de ensayos mecánicos con la presencia de Enrique Chomik. Vi algunos ensayos de Charpy y de tracción convencional.



Figura 20: Máquina de tracción del CNEA

- El departamento de tratamiento de superficie y de caracterización metalográfica con la presencia de Martin Griffiths.

## 2.2 [Muestras](#)

### 2.2.1 [Desarrollo de las probetas](#)

Después del estudio de las varias normas que condicionan los tamaños de probetas estándares, hay que sacar el tipo, el tamaño y el material de nuestras probetas que vamos a ensayar para el proyecto.

Así se evalúa cómo se desarrollará el experimento. En el proyecto se van a ser ensayadas tres categorías de probetas, cada una separada en otras tres subcategorías de tamaño:

- Las probetas planas con un estado de superficie de corte por hilo
- Las probetas planas con un estado de superficie después del pulido
- Las probetas cilíndricas mecanizadas

Todas las categorías se dividen en 3 tamaños: grandes, medianas y pequeñas.

Se utiliza el principio de proporcionalidad entendido en las normas para el dimensionamiento de las probetas. Las pequeñas están por fuera de la norma. Se definió el tamaño por sugerencia de documentación de la IAEA. Ya que permitiría obtener un resultado de comportamiento de material con porciones de muestras pequeños. Se encuentran los planos de cada tipo de probetas en el anexo 3.

### 2.2.2 Organización de corte y definición del bloque de metal

Uno de los requisitos del proyecto es el de obtener todas las probetas del mismo bloque de metal para así asegurar la mayor homogeneidad posible entre las probetas en sus estructuras. De tal manera se debía pensar cómo cortar el bloque de metal para sacar probetas de varios tamaños y de varios espesores.

Un primero intento sobre papel fue el principio para buscar la mejor organización de las probetas en el metal. Fue relevante para aproximar el tamaño conveniente para el bloque, de manera que entre sin problema en las dimensiones de la máquina de corte por hilo.

El segundo intento fue más preciso con el uso del software Autocad para establecer planos en el bloque directamente.

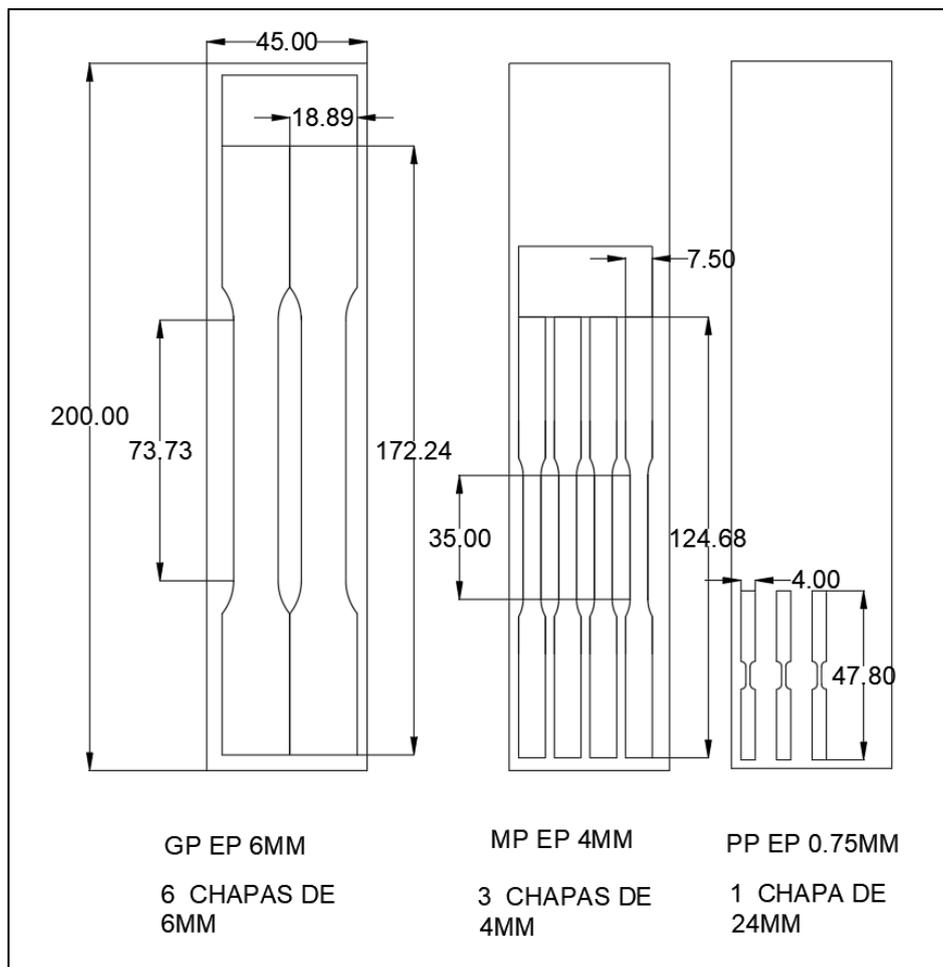


Figura 21: Geometrías de las probetas planas

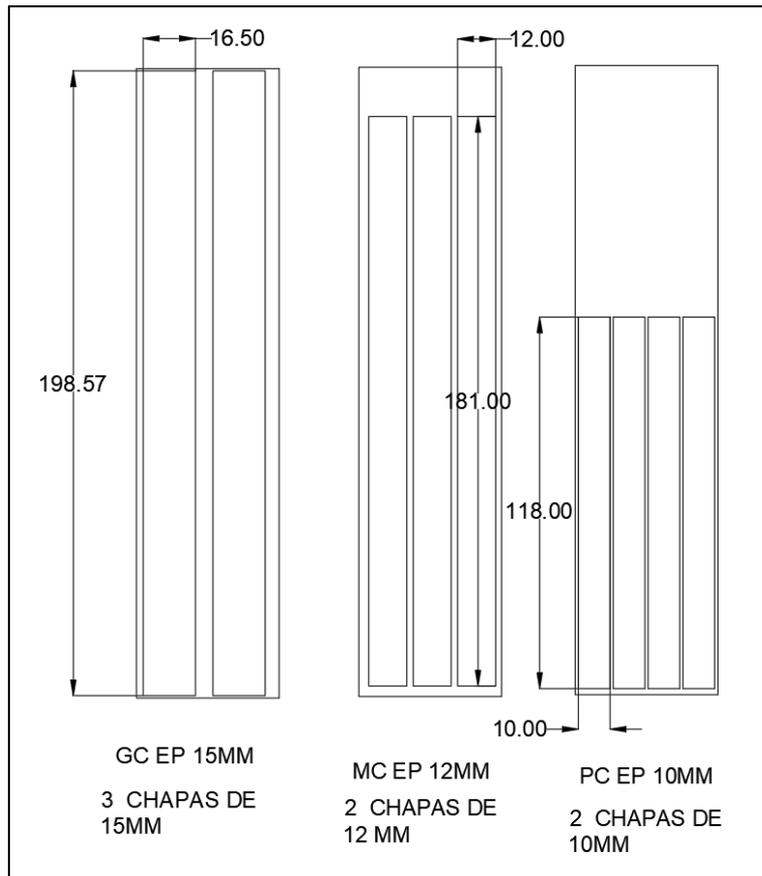


Figura 22: Geometrías de las probetas cilíndricas

Estos planos nos permiten definir el tamaño del bloque de metal mínimo y del bloque de metal a comprar:

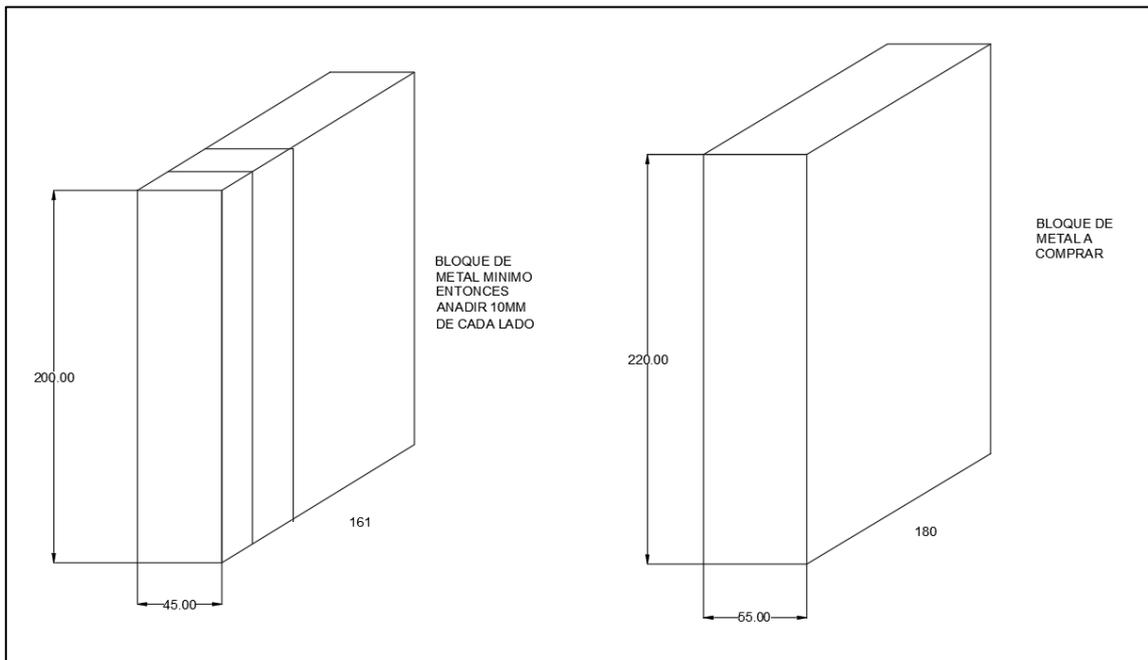


Figura 23: Geometría del bloque de acero

La figura 24 es una representación de la posición de las probetas en el bloque que va a ser cortado en chapas como la foto que sigue.

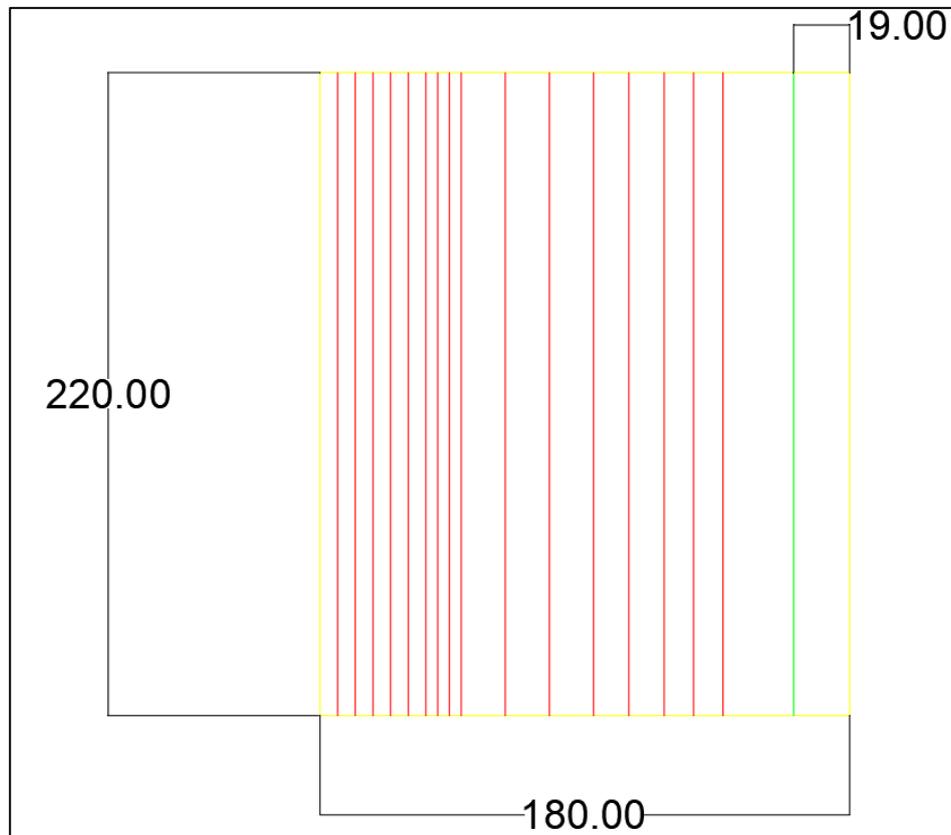


Figura 24: Esquema del corte de las chapas en el bloque

Los procesos de corte se dividen de tal manera:

A partir del bloque se necesita:

- Rectificar 2 planos
- Cortar las diferentes chapas utilizando corte por hilo sucesivamente.

Probetas planas:

Grandes: 6 chapas de 6 mm de espesor

Medianas: 3 chapas de 4 mm de espesor

Pequeñas: 1 chapa de 24 mm de espesor

(Para las pequeñas probetas sacamos 3 bloques de metal con forma de la probeta y después sacamos de estos bloques las 12 pequeñas probetas).

Las probetas planas son 6 (superficie "corte por hilo") y 6 rectificadas.

Probetas cilíndricas:

Grandes: 3 chapas de 15 mm de espesor

Medianas: 2 chapas de 12 mm de espesor

Pequeñas: 2 chapas de 10 mm de espesor

Las probetas cilíndricas se cortan por hilo en chapas y después para sacar los bloques brutos de las probetas cilíndricas se puede usar una sierra cinta. El uso de tornos es necesario para la obtención de los cilindros.

Total, de chapas: 17 chapas de espesores diferentes

Espesor acumulado de las chapas: 161 mm de material

Se prestó atención a:

- Como instalar las chapas en el corte por hilo
- La longitud de marga de 20 mm para el corte por hilo
- Las margas de material para la puesta en posición en el torno: 50 mm para las mordazas y 5 mm para la contra punta

Para concluir esta parte, las siguientes figuras (25, 26, 27, 28) resumen los tamaños, formas y camino de corte para cada probeta.

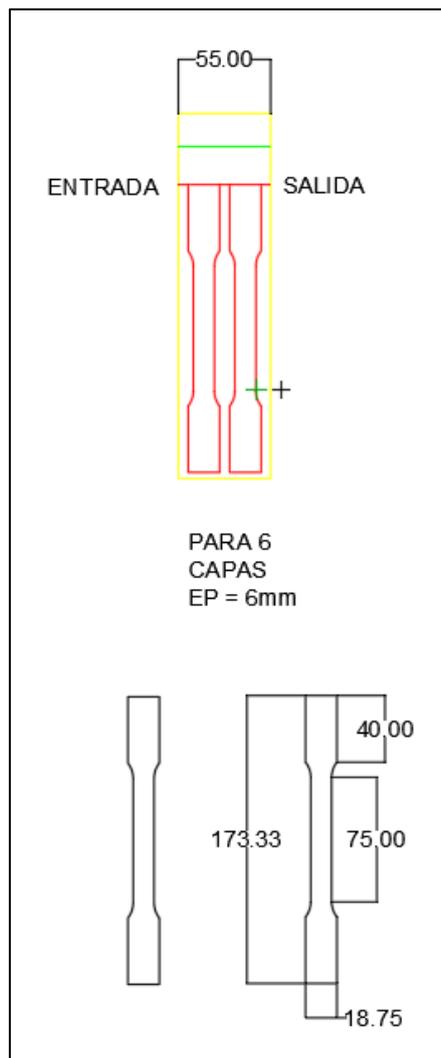


Figura 25: Probetas grandes



Figura 26: Probetas medianas

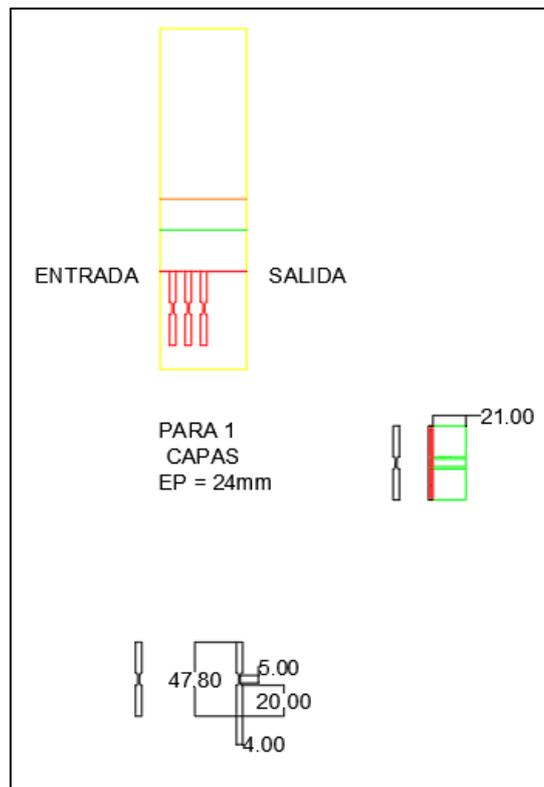


Figura 27: Probetas pequeñas

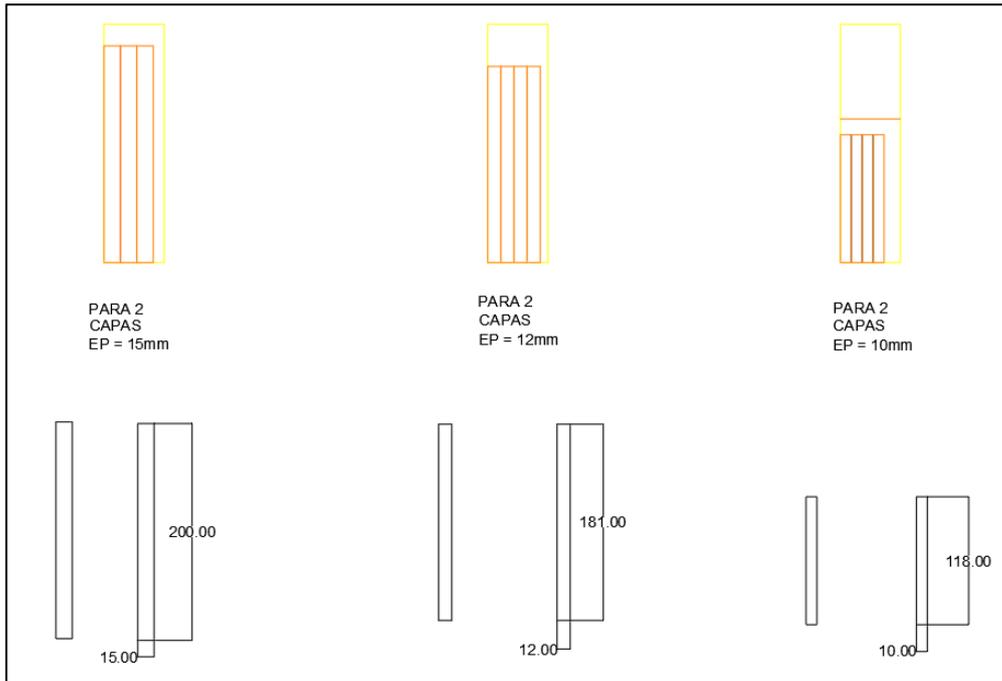


Figura 28: Repartición de las probetas cilíndricas en las chapas

Tipo de acero del bloque:

El acero elegido para el bloque es un acero 4140. Químicamente, el acero 4140 es respectivamente simple en la asimilación con varios aceros para herramientas. Tiene teóricamente entre 0,38% y 0,42% de carbono, 0,30% de silicio, 0,20% de molibdeno, 1,00% de manganeso y 1,00% de cromo por masa. Además, consigue tener purezas de fósforo en cantidades traza y azufre - hasta 0,025% [13].

Después de una observación con el microscopio electrónico de barrido, obtuvimos los espectros del acero real.

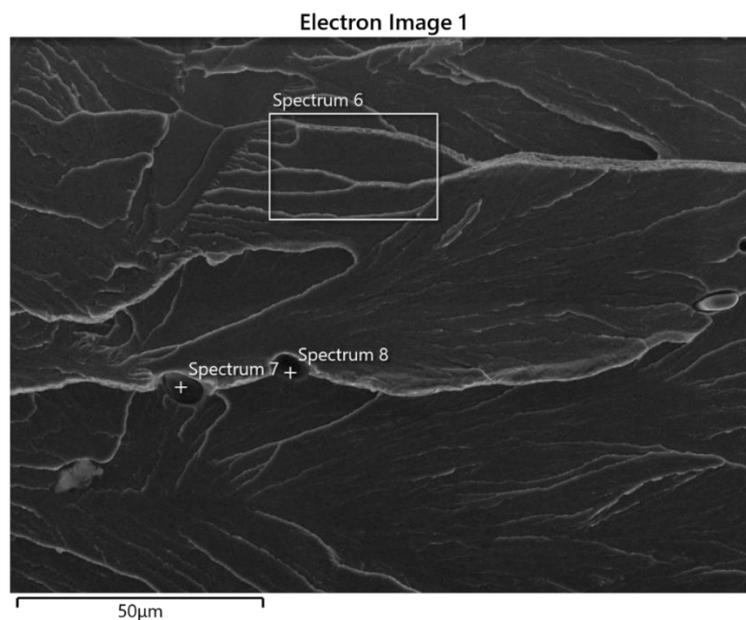


Figura 29: Observación de la rotura x2000

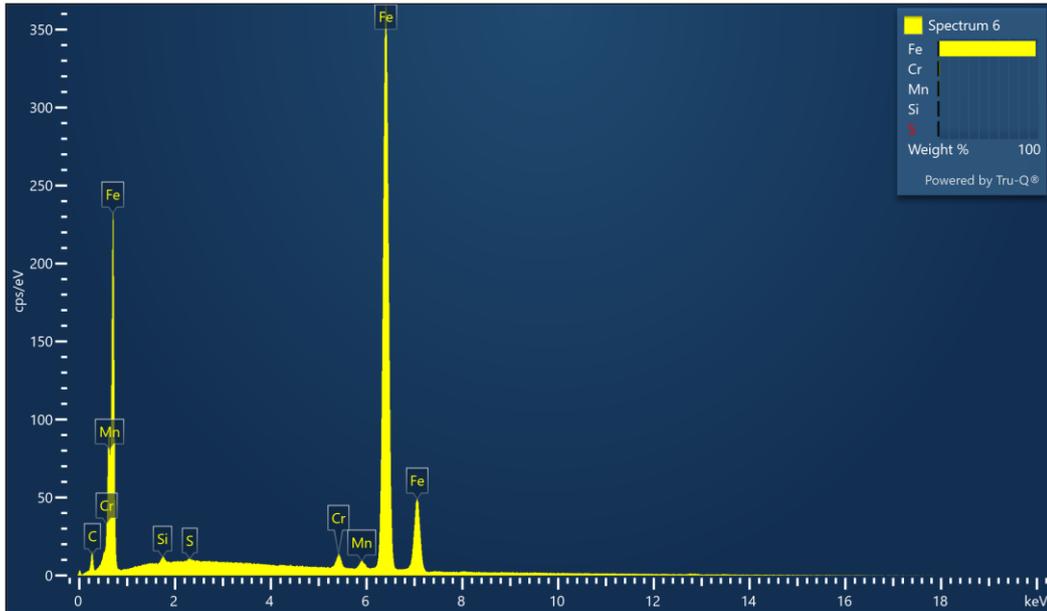


Figura 30: Espectro de la composición química del acero

La figura 30 ilustra la composición química real del acero que tuvimos para este proyecto. La tabla 11 recuerda todos los datos numéricos de la composición en porcentaje de peso (columna 5 de la tabla 11) y tenemos un porcentaje de carbono cerca de 13% (dato que viene del proveedor).

Tabla 11: Composición química del acero

Elemento	Line Type	Apparent Concentration	k Ratio	Wt%	Wt% Sigma	Standard Label	Factory Standard
Si	K series	0.25	0.00199	0.31	0.03	SiO2	Yes
S	K series	0.09	0.00076	0.08	0.03	FeS2	Yes
Cr	K series	2.07	0.02067	1.26	0.04	Cr	Yes
Mn	K series	1.28	0.01278	1.01	0.05	Mn	Yes
Fe	K series	125.90	1.25902	97.35	0.07	Fe	Yes
Total:				100.00			

Los otros espectros son los de las inclusiones que son muy comunes en este tipo de acero, como inclusiones de sulfuro o de molibdeno.

### 2.2.3 Corte por hilo de las probetas planas

Pedimos el bloque a la empresa Aceros CAS Ar (<http://www.aceroscas.com.ar/>) con las dimensiones teóricas de 220 mm x 180 mm x 55 mm y recibimos un bloque de acero estándar 4041 con las dimensiones de 230 mm x 183 mm x 57 mm así que tuvimos un margen de algunos milímetros. El bloque estaba casi perfecto, pero tenía una pequeña desviación de espesor entre el lado derecho y el lado izquierdo de 1mm de diferencia (57 y 58 mm respectivamente).

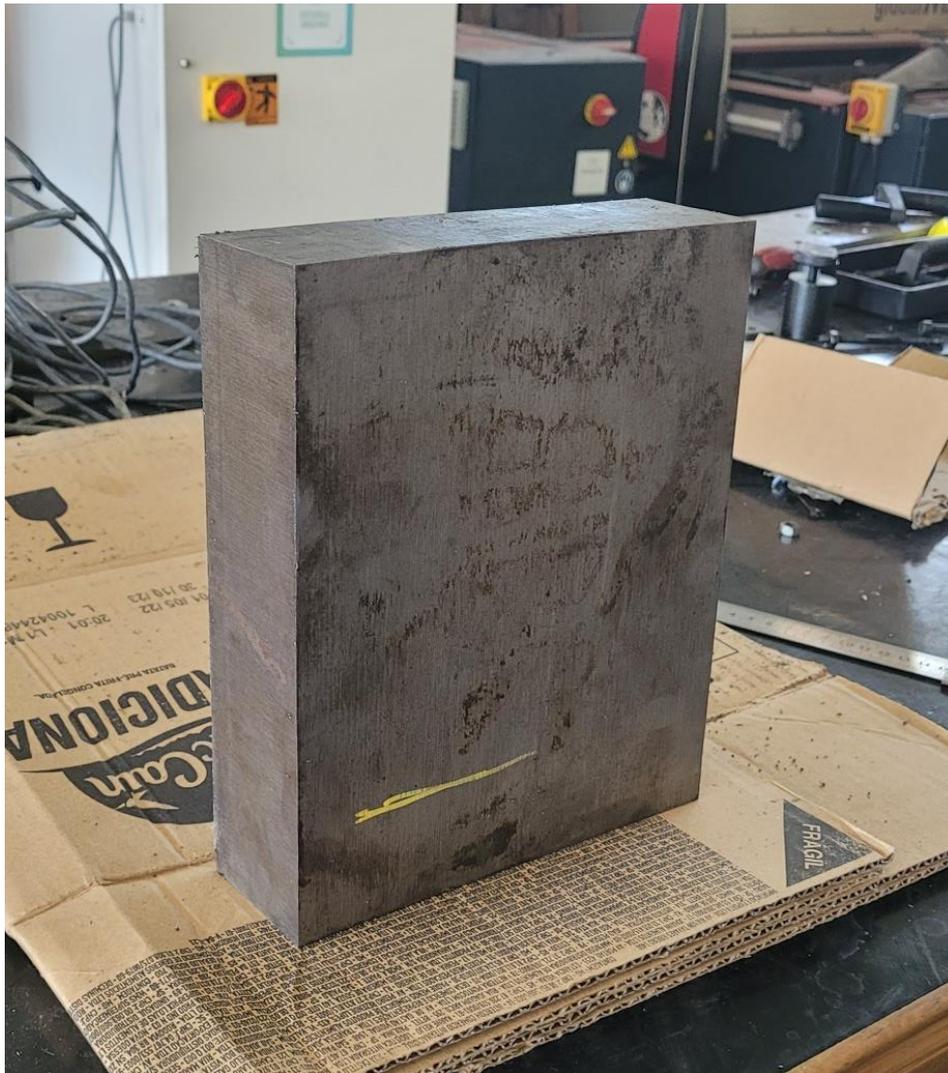


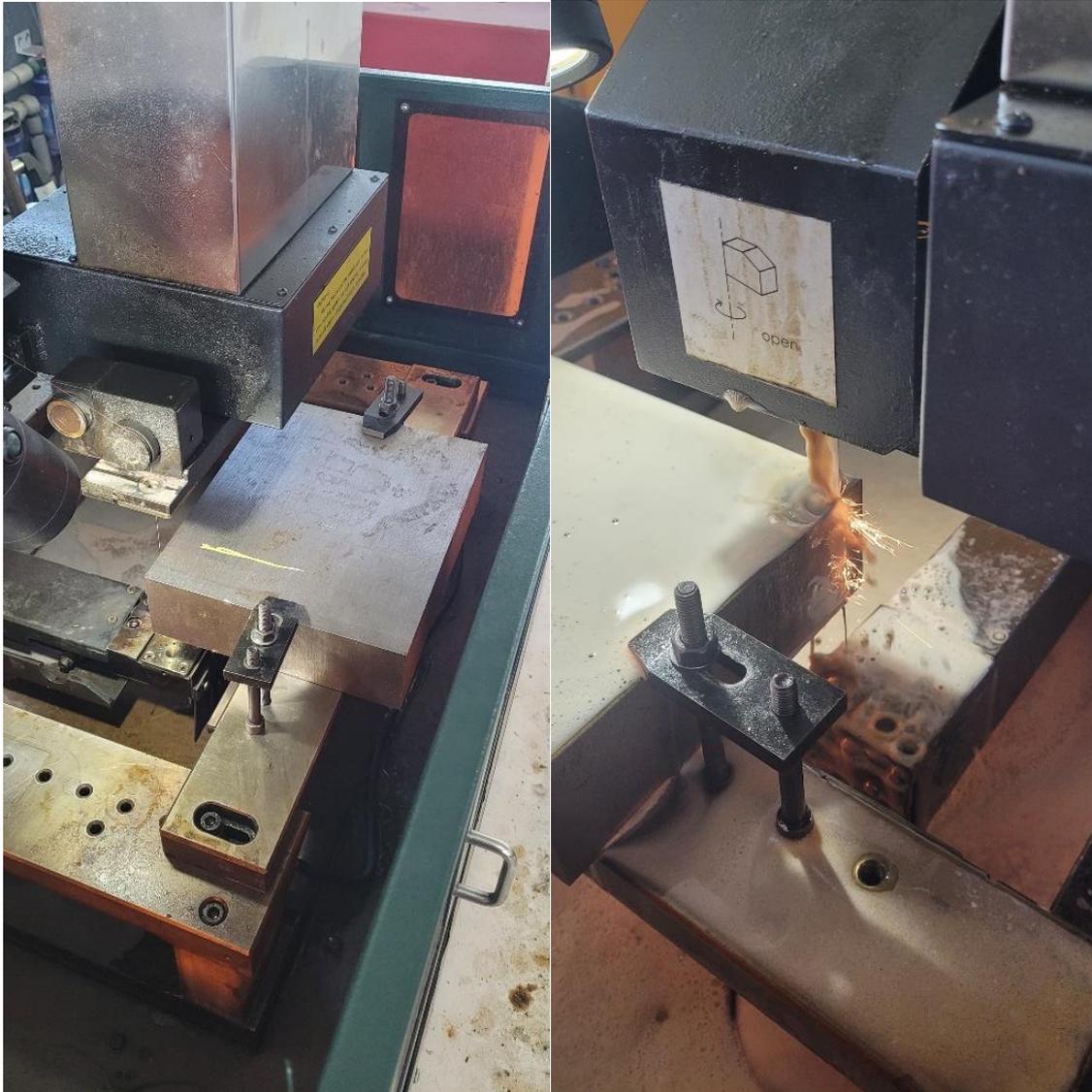
Figura 31: Bloque de metal del proyecto

#### 2.2.3.1 Obtener las chapas a partir del bloque

La primera etapa es de sacar por hilo las diferentes chapas de acero del bloque, así que tenemos estas chapas para después cortar, todavía por electroerosión, la forma de las probetas al tamaño requerido.

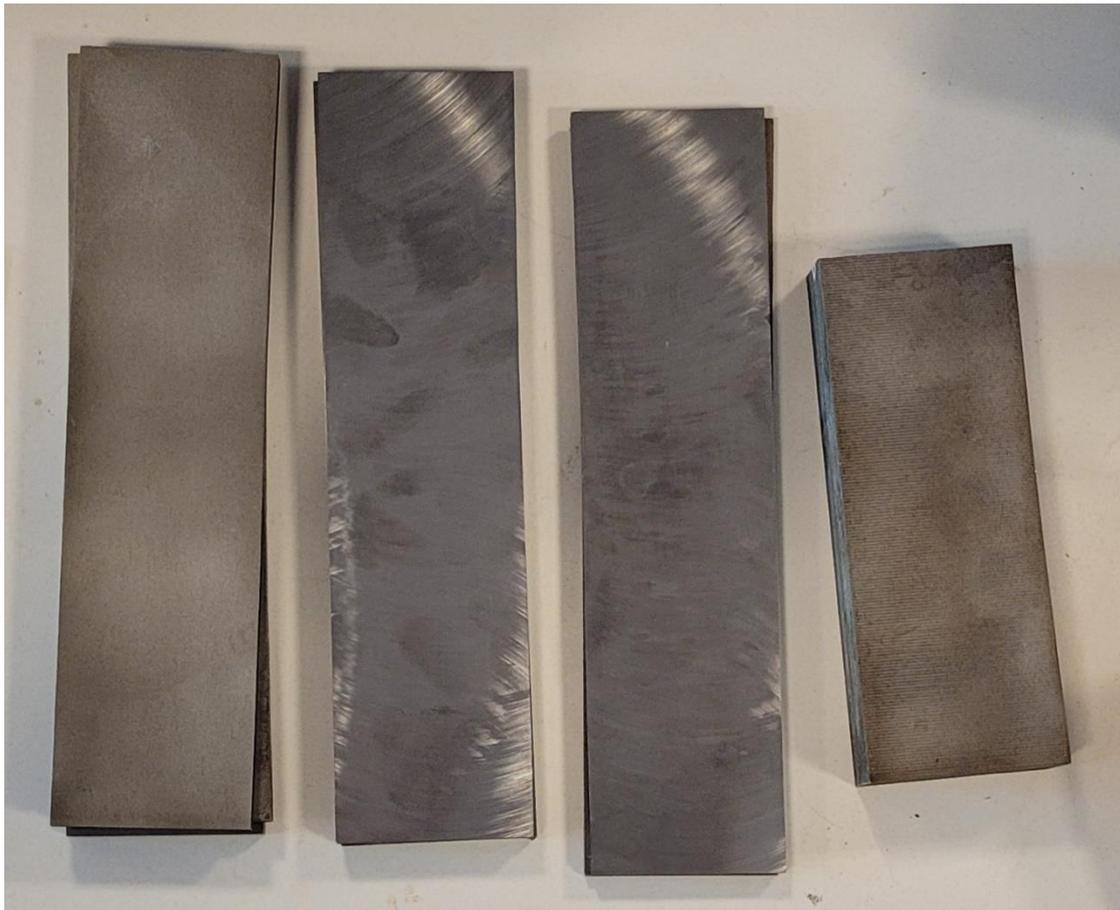
En esta etapa el desafío principal fue de mantener en posición horizontal el bloque porque a causa de su peso elevado (18,74 Kg teóricamente) tenía una tendencia a inclinarse, así que el bloque ha tenido varias posiciones durante el corte (ver la figura 32).

De tal manera que para cada corte (corte de chapas o de probetas) hay una necesidad de controlar la horizontalidad y la perpendicularidad del corte con un palpador acompañado de un movimiento de la máquina sobre los ejes X, Y, Z.



*Figura 32 : Posición inicial del bloque en la máquina de corte por hilo*

El orden de corte es indicado en la figura 24 y permite entender como estaba cortando la máquina de corte por hilo. Hay que notar que con un bloque de este rango de espesor el corte tarda mucho, la velocidad de corte con una tecnología de desgaste del corte por hilo para un espesor de 57 mm era de 1.6 mm/min así que el total de tiempo para todas las chapas resulto 38 horas de corte más el tiempo de desplazamiento y los problemas.



*Figura 33: Chapas de metal después del corte por hilo y rectificación*

Durante este periodo de corte de las chapas tuve varios problemas con la máquina, pero son relacionados directamente a esta máquina precisamente y se pudieron evitar sus incidencias.

Problema n.º 1:

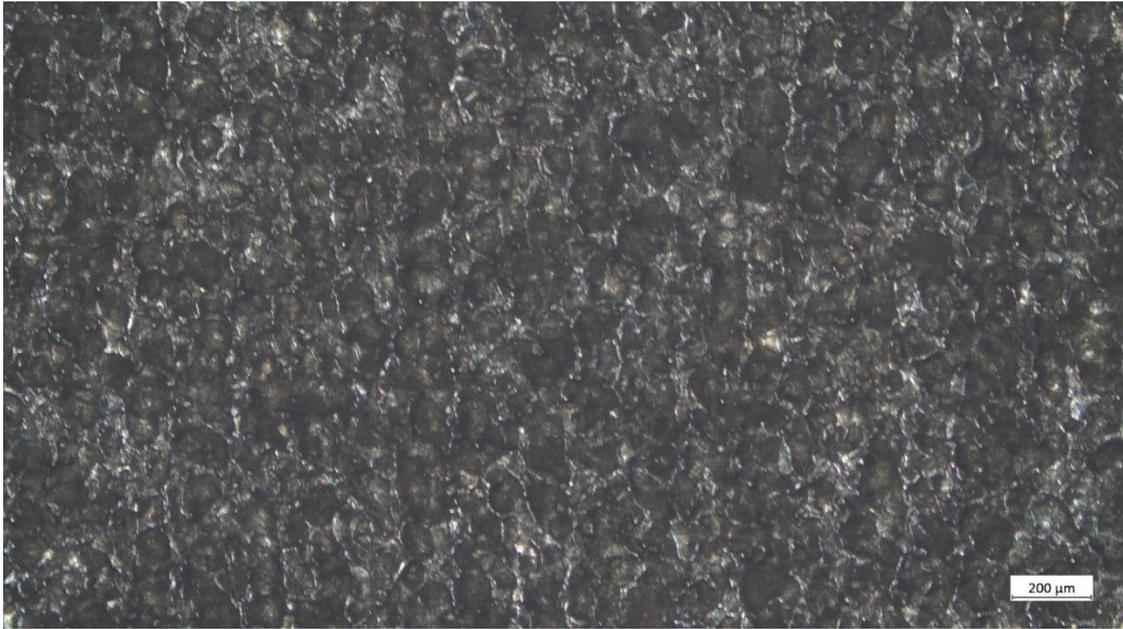
El hilo se cortó varias veces durante los días de corte, así que cada vez la máquina se paraba y había que cambiar el hilo. El hilo puede romper por varias razones, pero las más frecuentes son los desgastes del mismo hilo o una lubricación deficiente.

Problema n.º 2:

Cuando cae una chapa se pone en posición inclinada, pero sigue en contacto con el bloque y cuando toca el hilo genera un corte circuito que para la máquina automáticamente por seguridad, así que no sigue cortando. Se puede arreglar este problema sacando cada chapa directamente después de su corte.

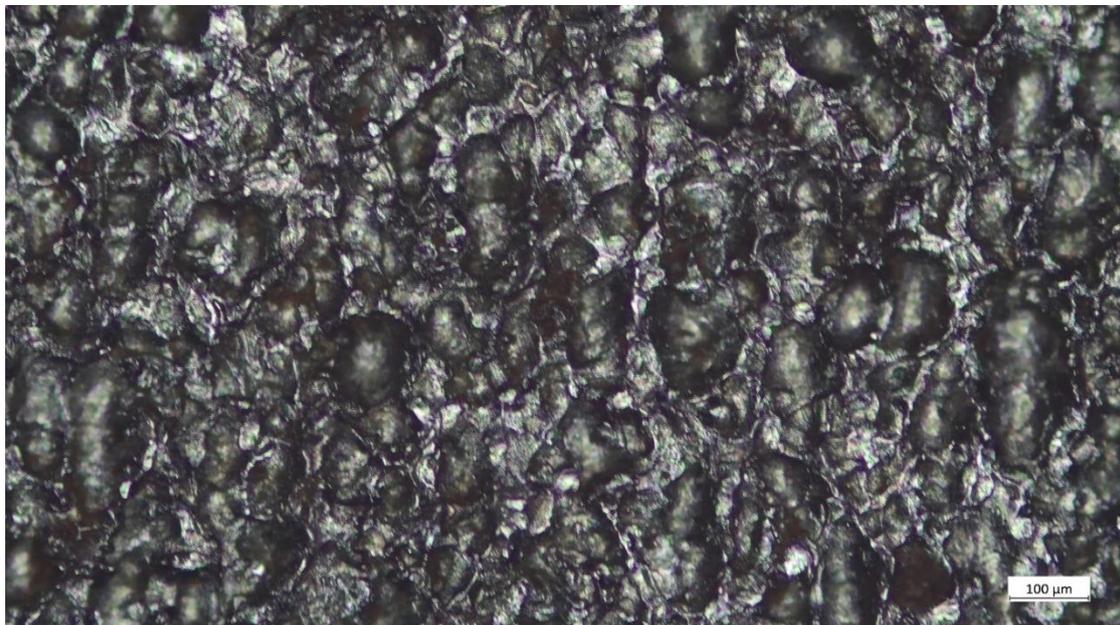
2.2.3.2 Transformación de superficie

Después de la etapa de corte, había que analizar el estado de superficie de las diferentes chapas y aplicar una transformación a varias de ellas, así que observamos al microscopio el estado de superficie que resultaba del corte por hilo.



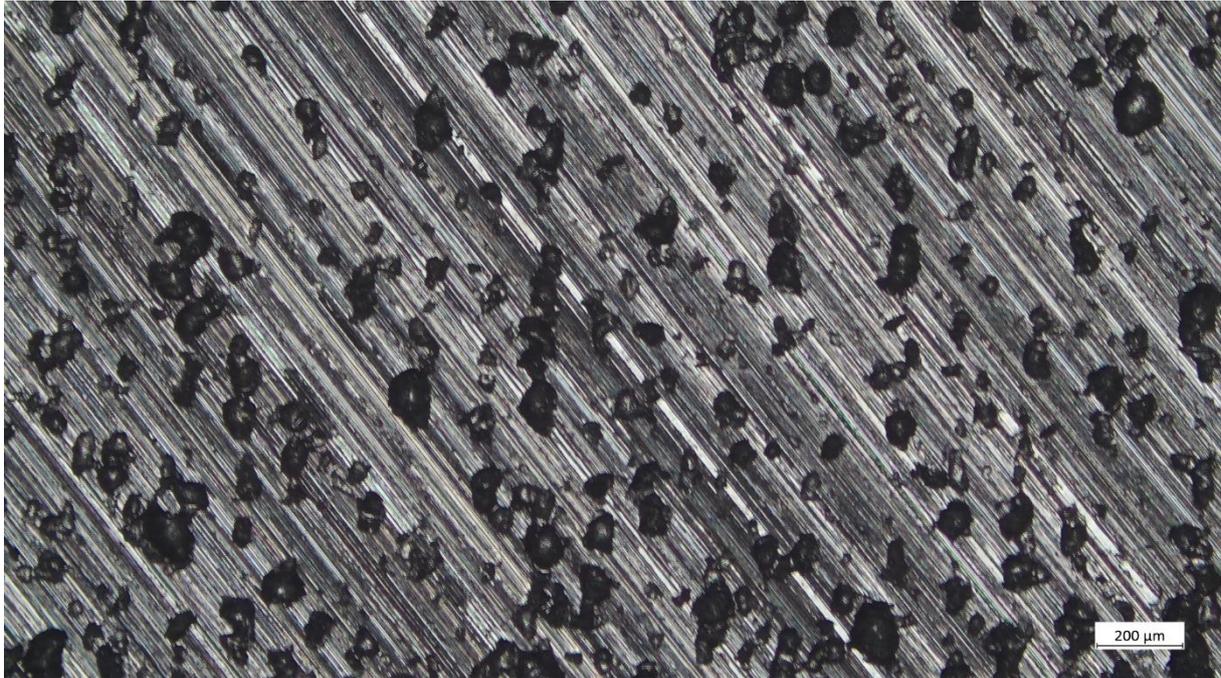
*Figura 34: Estado de superficie "Corte por hilo"*

Se puede observar que, saliendo del corte, las chapas están sucias de polvo debido al proceso de corte por hilo. Así que se le realizó un arenado superficial, en un corto período de tiempo para no endurecer la superficie, pero suficiente para limpiarla.

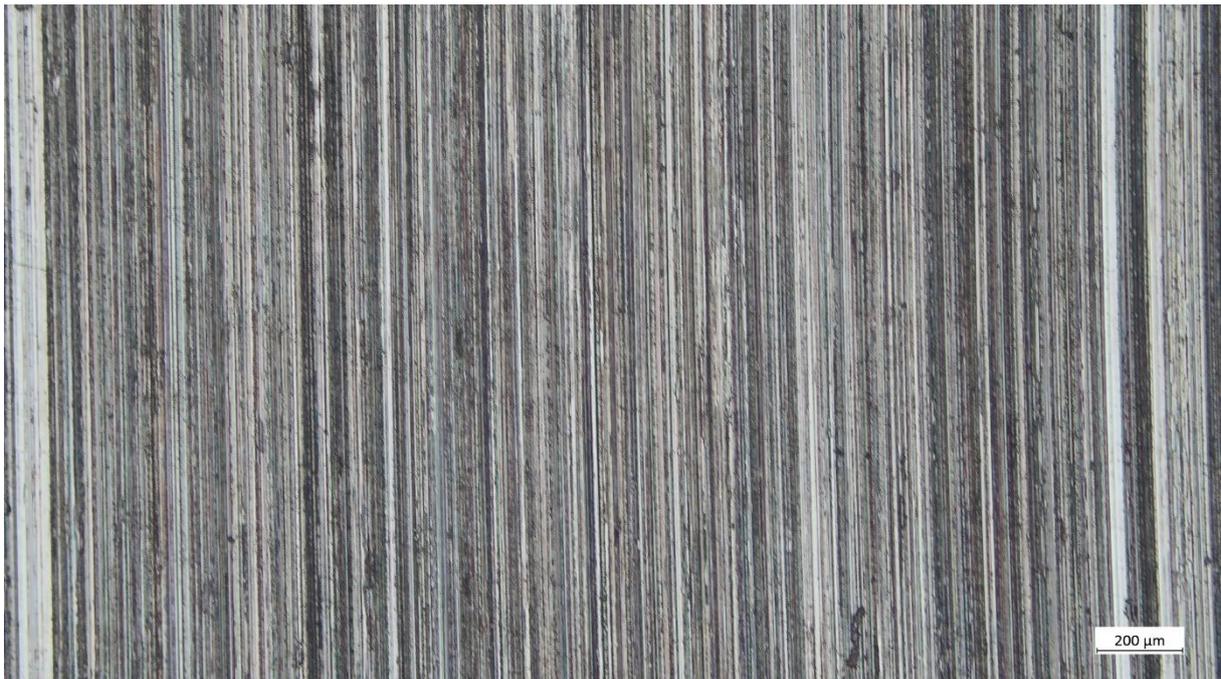


*Figura 35: Estado de superficie "Arenado"*

Algunas de las chapas fueron rectificadas para un trabajo de comparación entre las probetas de superficie.



*Figura 36: Estado de superficie después de la mitad de la rectificación*



*Figura 37: Estado de superficie "Rectificado"*

### 2.2.3.3 Obtener las probetas a partir de las chapas

Después de las chapas hay que cortar la forma de cada probeta en las chapas que tienen el espesor apropiado al tipo de probeta. Hay que notar que la velocidad de corte depende del espesor del bloque a cortar y de la tecnología utilizada (tiene una influencia sobre el estado de superficie final).

Se dividen en 3 categorías entonces:

- El corte por hilo de las probetas planas grandes que solamente necesitan el archivo .dxf de la trayectoria del corte y la máquina hace su trabajo sin problema.

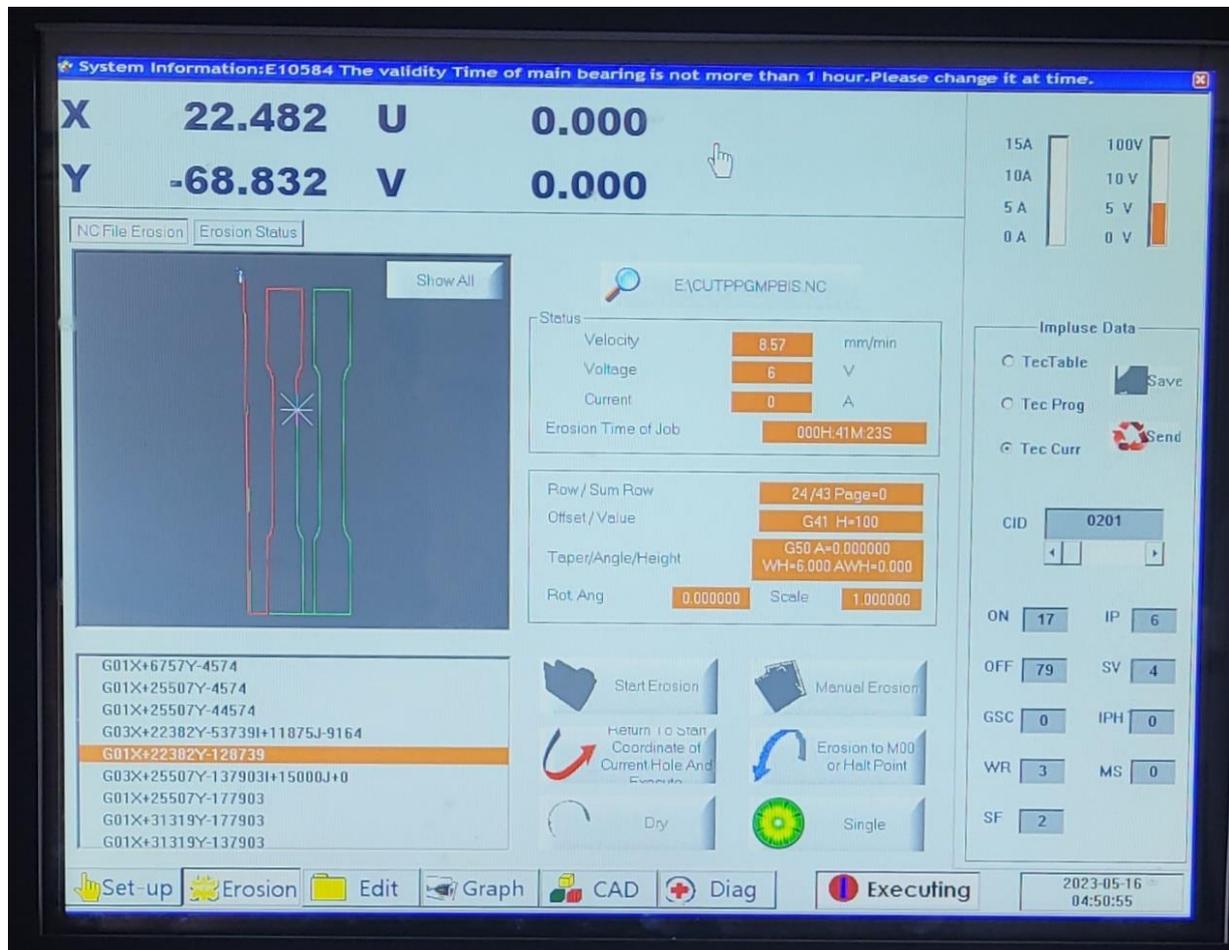
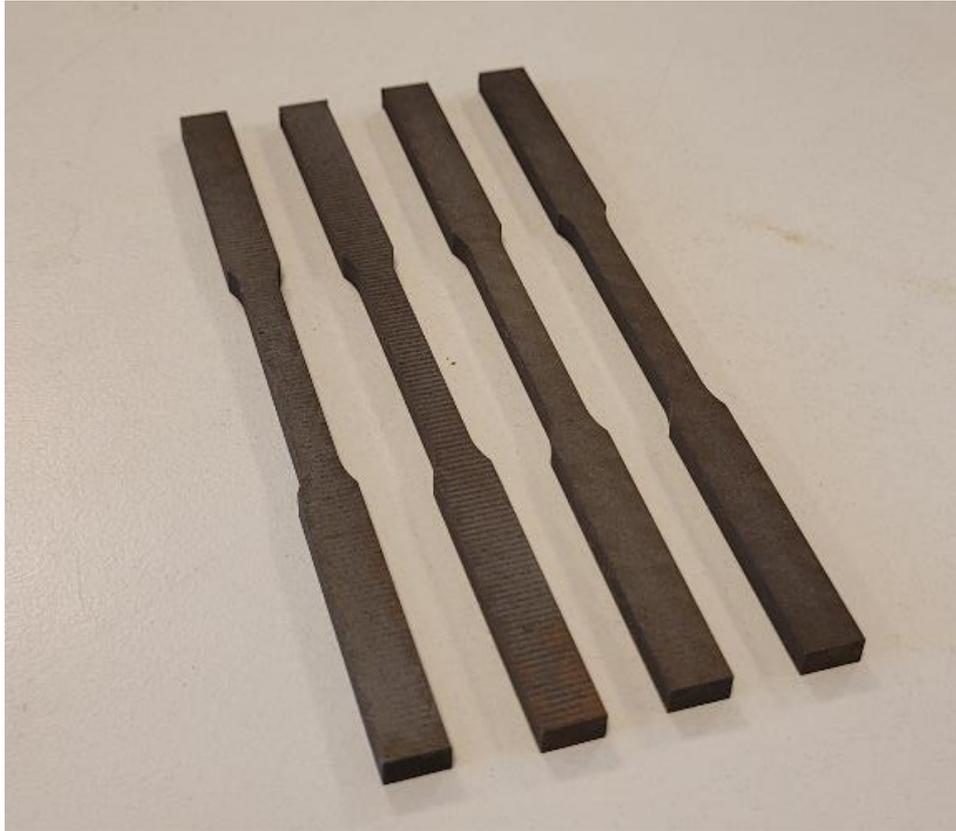


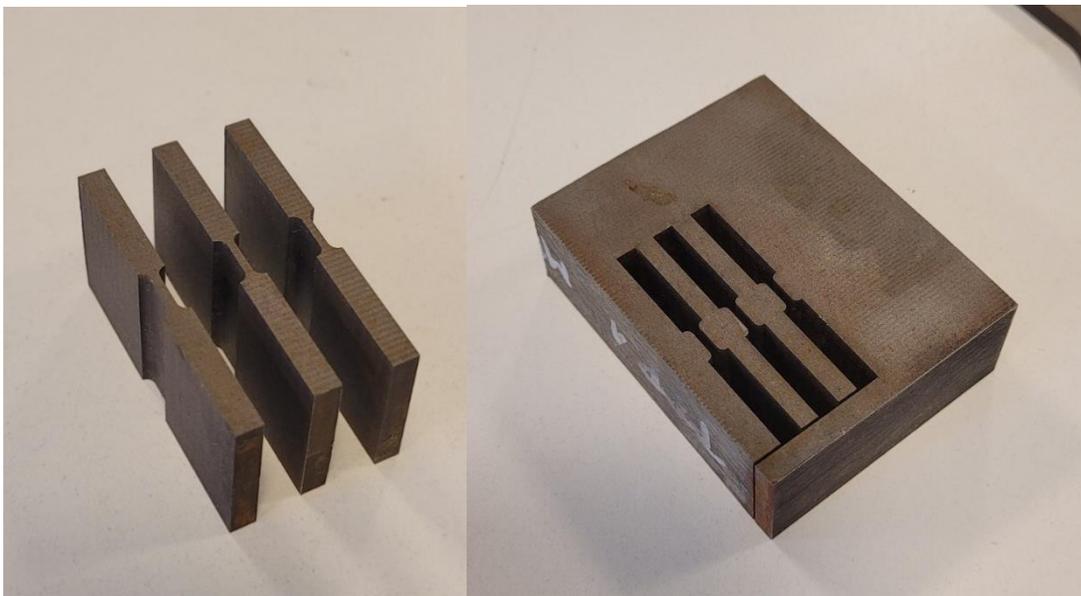
Figura 38: Interfaz de control del corte por hilo

- Igual para las probetas de tamaño medianos.



*Figura 39: Probetas medianas*

- Últimamente las probetas chicas tienen una etapa más:



*Figura 40: Bloque con la geometría "Probetas chicas"*

- Primero sacar los bloques con la forma de las probetas planas chicas dentro de una chapa más gruesa. El objetivo es hacer un corte tipo "pan lactal" el cual consiste en

cortar el perímetro de la probeta. Luego tomar esta pieza (figura 40 izquierda) y realizar cortes en feta con el espesor buscado.

- Segundo cortar estos bloques en chapitas que son las probetas pequeñas de 0,75 mm y de 1 mm.



Figura 41: visión general de los cortes

#### 2.2.4 Mecanizado de las probetas cilíndricas

##### Características del torno CNC:

El mecanizado de las probetas cilíndricas es una parte que necesitaba una reflexión mayor porque la mayoría de las probetas cilíndricas estándares son al principio sacadas de una barra del metal a ensayar y esta forma inicial del material facilita mucho todo el mecanizado de las mismas en un torno CNC.

En nuestro caso, donde el objetivo es de sacar todas las probetas del mismo bloque de material, empezamos con una simetría cuadrada para sacar las probetas. Entonces, la primera etapa después del corte de los bloques para cada unidad es la de cilindrarlos para obtener una simetría cilíndrica que se puede tornear. Esta etapa se hace sobre un torno convencional con un plato de "4 mordazas". Se mecanizó primero el agujero para la contrapunta de un lado y del otro lado una geometría cilíndrica sobre una longitud de aproximadamente 40 mm.



*Figura 42: Inicio de la mecanización de las probetas cilíndricas medianas*

El primer ensayo de corte en el torno CNC resulta en un fallo con una probeta torcida debido a las fuerzas de corte. Eso es porque la relación longitud-diámetro estaba mal calculada y los esfuerzos de corte eran demasiados grandes.



*Figura 43: Fallo de la mecanización*

Una solución al este problema es de cilindrar todo el largo de la probeta a un diámetro de 7 mm (probetas de tamaño medio), después cortar con la sierra el excedente de material y finalmente mecanizar la parte a ensayar de la probeta a un diámetro de 5 mm.

Una de las conclusiones que tuvimos en cuenta con estos intentos de corte CNC es que el laboratorio no estaba equipado para mecanizar probetas de tamaños tan chicos y que el torno CNC fue demasiado grande para esta operación.

Al final tuvimos muchos problemas con el torno CNC y el Gcode así que omitimos este parte del trabajo sobre las probetas cilíndricas por una razón de tiempo y de objetivos.

Se puede encontrar el Gcode que usamos para torneear en el anexo 4.



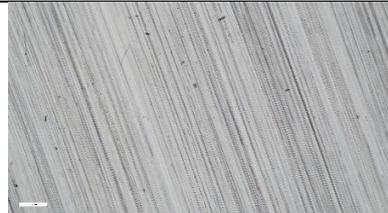
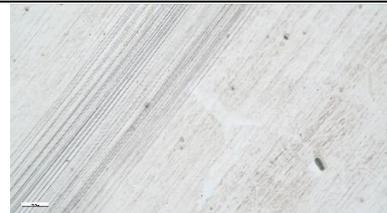
Figura 44: Operación de torneado

### 2.2.5 Metalografía

Para el estudio de la microestructura utilizamos dos pequeñas partes del bloque de metal que incrustamos en una muestra en poliuretano para aplicaciones de micrografía. Así se puede pulir el material para una observación al microscopio sencillamente.

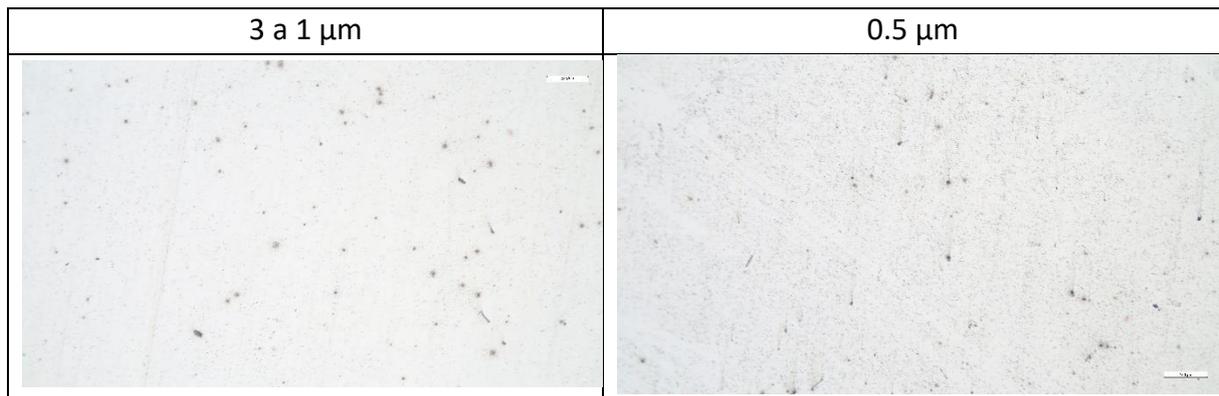
Hicimos un lijado con la pulidora con lijas de 60, 120, 360, 600, 1000 y resultaron las fotografías siguientes:

Tabla 12: Proceso de pulido

120	600	1000
		

Se puede observar una evolución muy distinta del tamaño de las rayas en la superficie del material que se afinan con el grano de las lijas. Cada vez después de un pulido se limpia la muestra con alcohol isopropílico se seca para guardar la muestra sin marcas en superficie. Después cambiamos de método con una pasta abrasiva de 3 a 1  $\mu\text{m}$  y después de 0.5  $\mu\text{m}$ .

Tabla 13: Observaciones del estado de superficie después del pulido final



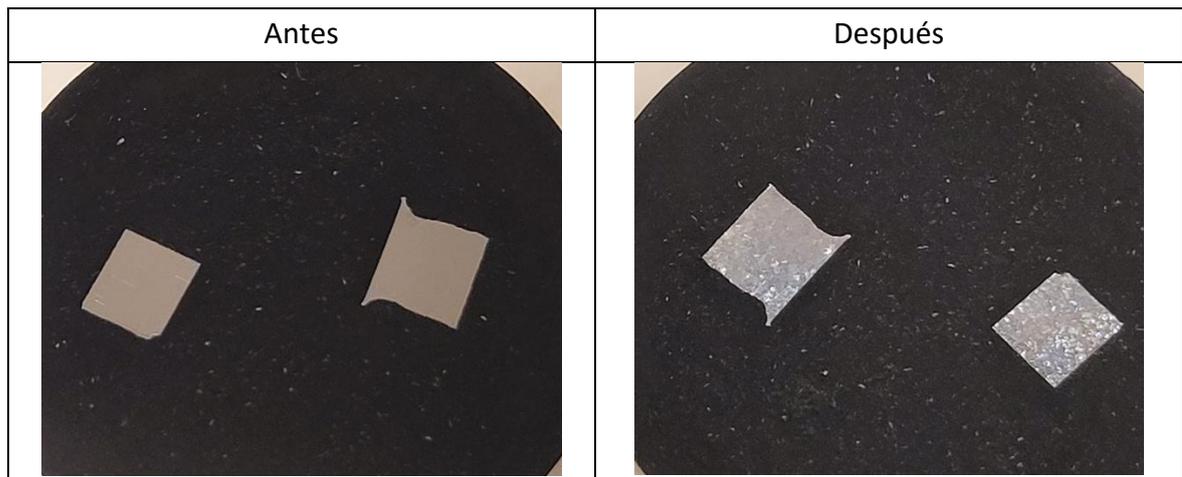
Los puntos negros que se observan sobre las fotos son inclusiones en el metal, pero los puntitos más chiquitos son suciedad, así que la muestra necesita una limpieza más profunda. Para esta limpieza de la muestra se usa un limpiador ultrasónico con un baño de alcohol isopropílico:



Figura 45: Estado de superficie de la muestra después de la limpieza

Cuando tenemos una superficie pulida limpia la pusimos en un baño de Nital 2% que es una solución de alcohol y ácido nítrico usada para ataques químicos de metales. Es especialmente adecuado para revelar la microestructura de aceros al carbono.

Tabla 14: Comparación Antes/Después del baño de Nital 2%



Las figuras que siguen son las observaciones microscopias de cada lijado junto con un análisis de microestructura después del baño de Nital 2%:

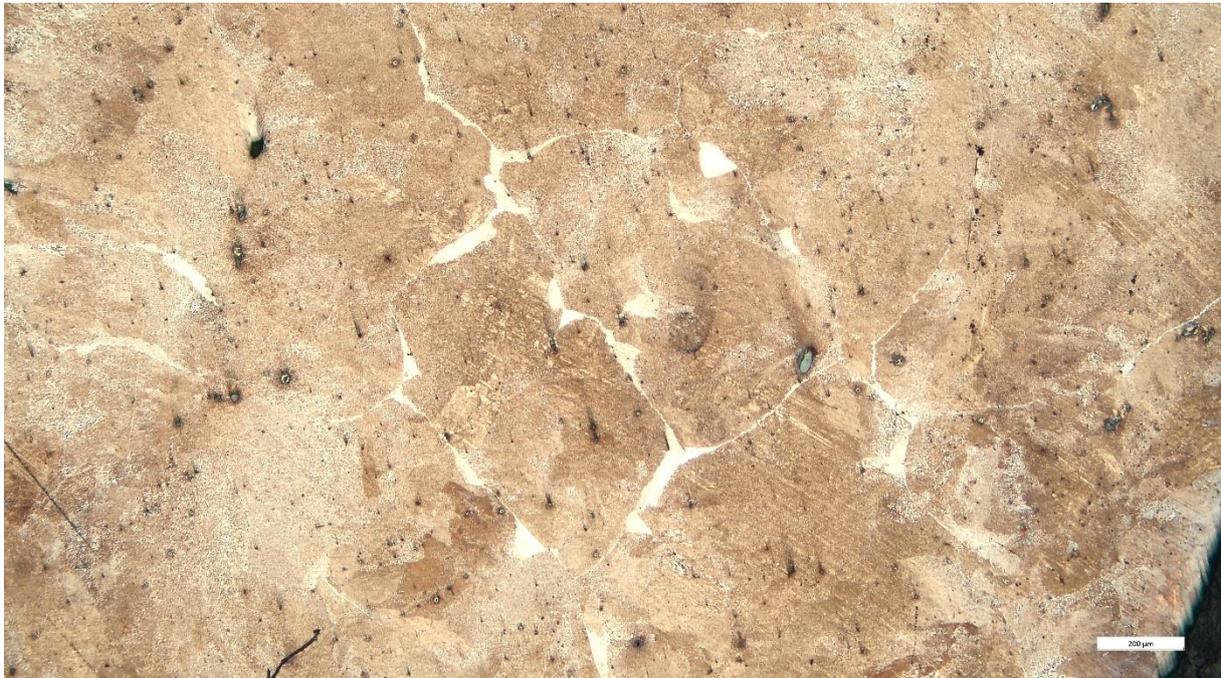
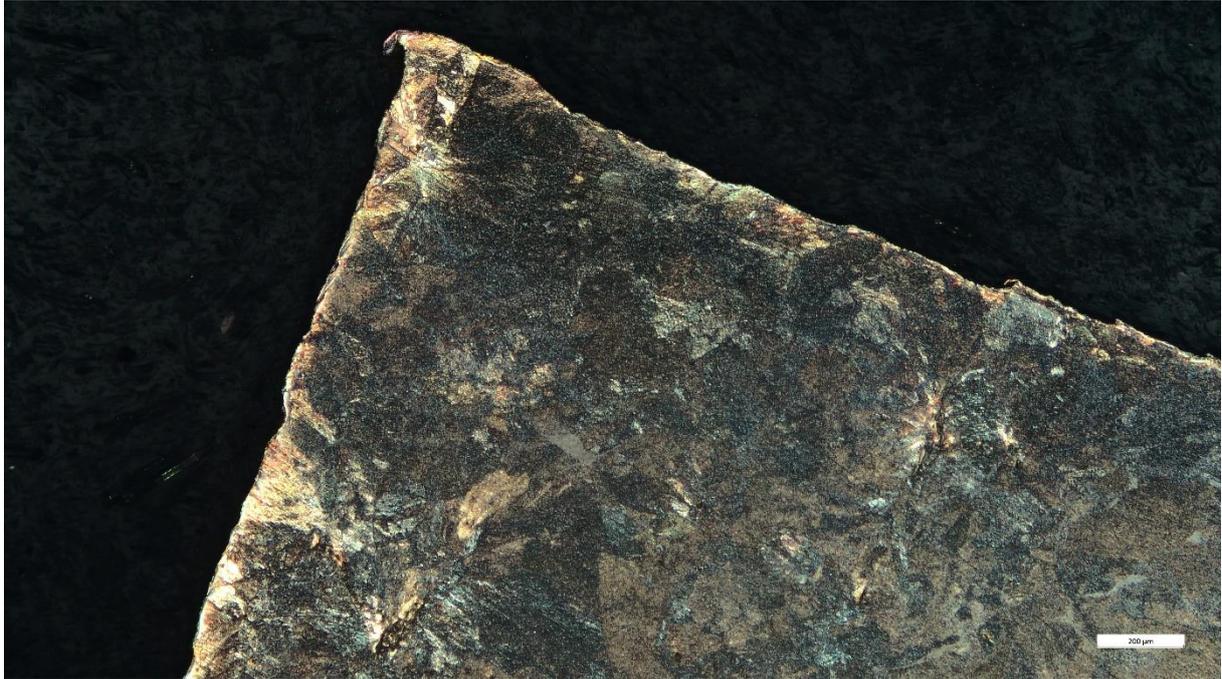


Figura 46: Observación con campo claro x50 de la red de ferrita en la perlita

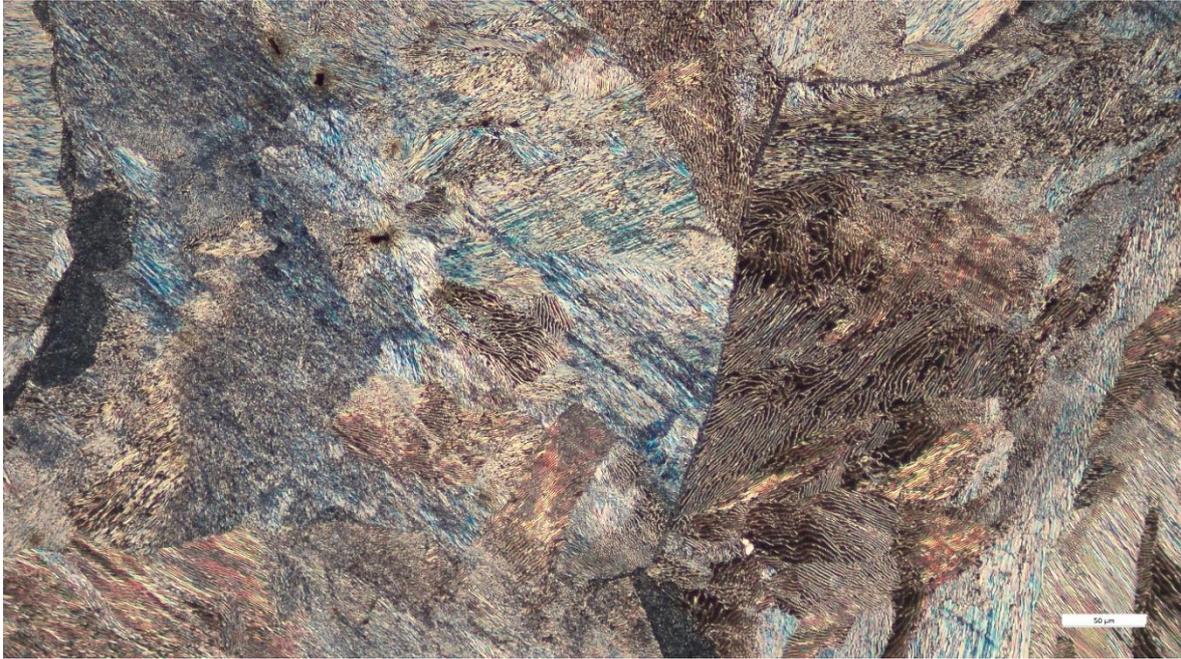
Podemos ver en la figura 46 que el bloque tiene un contenido de perlita gruesa de aproximadamente 95% con una red de ferrita (parte blanca en la figura).



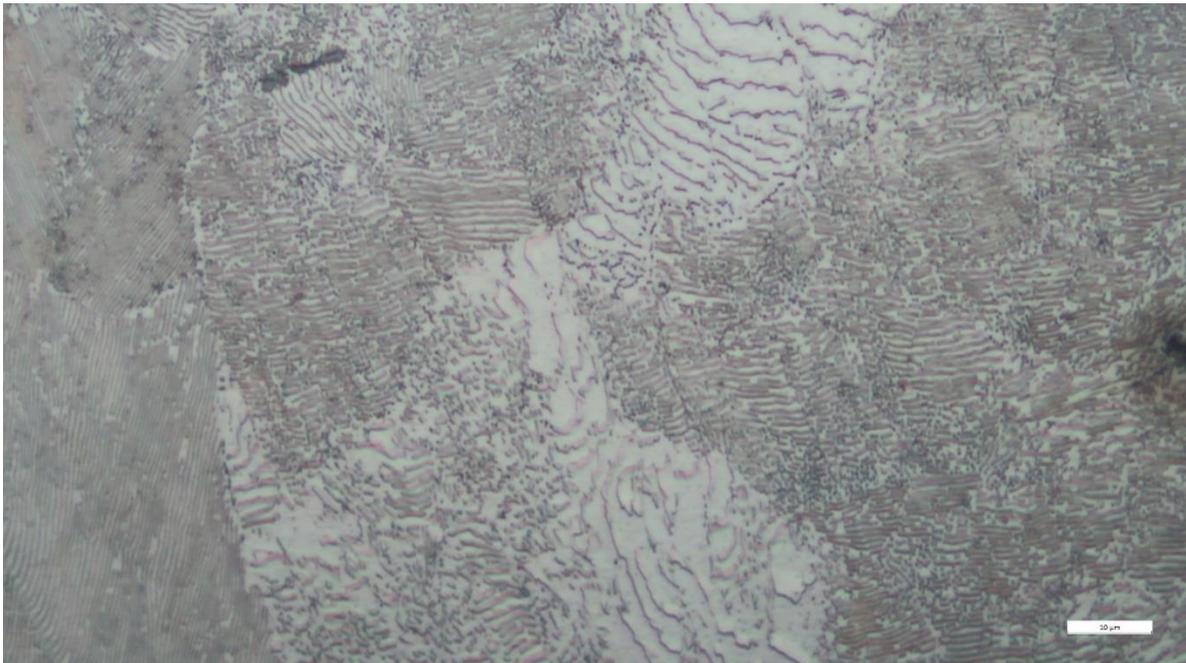
*Figura 47: Observación con campo polarizado x50*



*Figura 48: Observación con luz DF x50*



*Figura 49: Observación con luz DF x200*



*Figura 50: Observaciones con campo claro x1000 de granos de perlita*

Con la observación x1000 se puede ver la orientación de los granos de perlita.

### 2.2.6 Tema de la superficie

#### Rugosidad:

La rugosidad es un valor que define la textura de una superficie. La rugosidad evalúa las pequeñas desviaciones verticales de la superficie de un material que vienen normalmente determinadas por las características del material, el proceso de transformado de la pieza o las aportadas por el propio recubrimiento. El rugosímetro (dispositivo para medir la rugosidad) evalúa una serie de mediciones y después hace una media compensada por la desviación generada por la posición del rugosímetro.

En nuestro caso el proceso de transformación fue el corte por hilo que con la tecnología utilizada nos permitirá llegar a una rugosidad entre 2 a 10  $\mu\text{m}$ .

Para las probetas grandes y medianas, un proceso de rectificación fue suficiente y muy eficiente. Para bajar de rugosidad en las probetas chiquitas entra el tema del pulido y la pregunta: ¿cómo pulir uniformemente una cara tan pequeña sin facetarla?

La solución más sencilla y económica era de usar un bloque de metal rectificando con una cinta doble faz y 2 probetas a lado para tener una superficie plana más larga.



Figura 51: Sistema de pulido de las probetas chicas

Por fin, había que pensar al efecto de arenar una superficie sobre las características mecánicas que provoca un endurecimiento local y que podría impactar sobre los resultados. Por lo que decidimos de no arenar las probetas de tamaño chico.

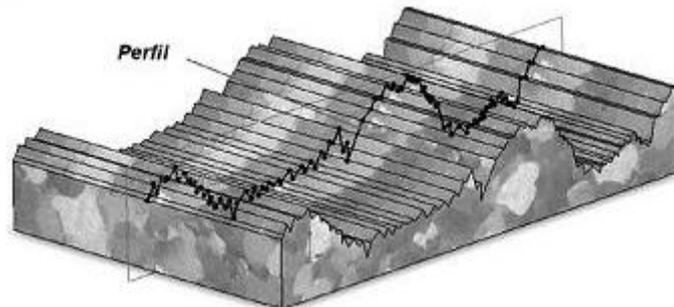


Figura 52: Ilustración del principio de rugosidad [14]

### 2.2.7 Primer ensayo de tracción

El primer ensayo de tracción simple fue realizado en el laboratorio del ITBA para demostrar los efectos y el proceso general. La probeta ensayada fue de tipo plana, de tamaño estándar (ver anexo 1) y el material era aluminio.

Los resultados son incluidos en el informe de ensayo n.º 1.

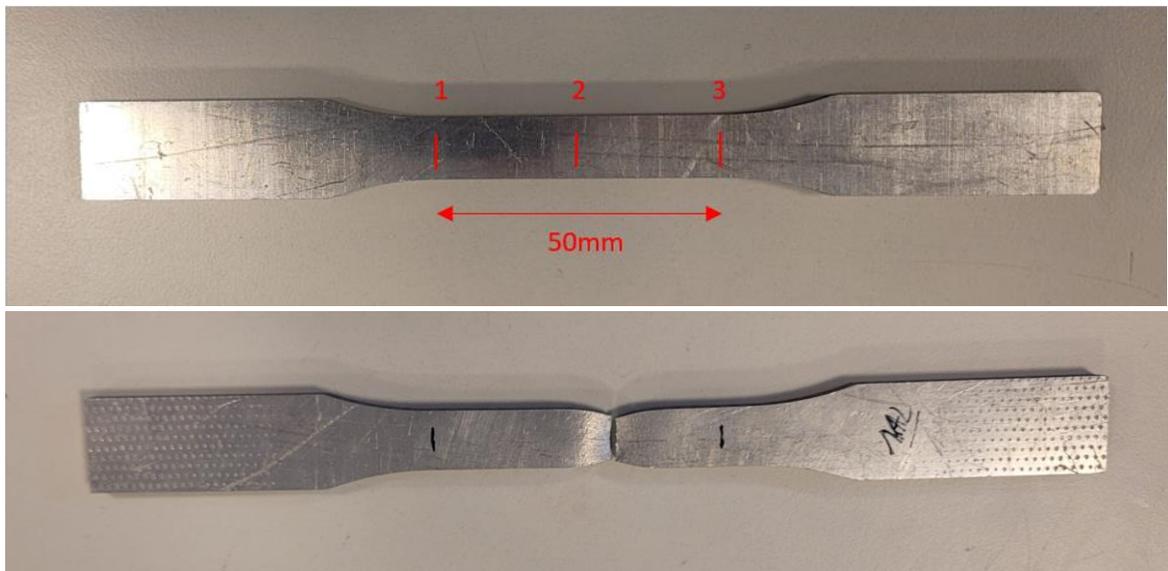


Figura 53: Foto de la primera probeta ensayada del proyecto

### 3 Resultados

#### 3.1 Método ensayo de tracción práctico

En la práctica, los ensayos de tracción son realizados siguiendo un método que puede variar, pero que es definido en cualquier situación para que los ensayos sean comparables y utilizables.

A continuación, se describe el método que usé para todos los ensayos de este estudio:

- Encender la máquina de tracción y conectarla al software “Bluehill”
- Preparar las probetas de tracción:
  - Medir en 3 puntos espesor y ancho con un calibre y anotarlo en un Excel (Foto)
  - Hacer varios ensayos de dureza Rockwell (u otro tipo) sobre cada una de las probetas
  - Marcar la longitud inicial con un marcador y dos otras marcas de cada lado de los bordes de L0 a 10% de esta longitud (Ej.: una probeta con L0 = 50 mm debe ser marcada con una marga de 5 mm de cada lado de las extremidades)
- Preparar el software con los datos de ensayo y de la probeta a ensayar (dimensiones, velocidades de ensayo, alerta para retirar el extensómetro)

Las dimensiones de cada tipo de probeta plana se pueden encontrar en los anexos. Además, la velocidad de ensayo se caracteriza por 2 rampas diferentes de velocidad que permite sacar varias informaciones. La rampa 1 corresponde a la zona elástica y de fluencia, mientras que la rampa 2 sirve para el resto del ensayo en la zona plástica y de rotura.

Tabla 15: Velocidades de ensayo por tamaño

Tamaño de probeta	Rampa 1 (en mm/min)	Rampa 2 (en mm/min)
Probetas grandes (área = 75 mm <sup>2</sup> )	0,927	26,403
Probetas medianas (área = 20 mm <sup>2</sup> )	0,505	14,28
Probetas pequeñas (área = 1,2 mm <sup>2</sup> )	0,101	2,870

La señal para retirar el extensómetro también varía en función de las probetas:

Tabla 16: señal de retiro de extensómetro

Tamaño de probeta	Señal de retiro extensómetro (en mm/mm)
Probetas grandes (área = 75 mm <sup>2</sup> )	0,002
Probetas medianas (área = 20 mm <sup>2</sup> )	0,002
Probetas pequeñas (área = 1,2 mm <sup>2</sup> )	/

- Preparar y verificar la calibración del extensómetro. Este parte varía entre los 3 tipos de probetas con la variación de la longitud inicial “L0”. Para el tamaño grande, la longitud fue calibrada a 50 mm y 25 mm para el tamaño medio.  
Para las probetas más chicas el extensómetro INSTRON no conviene para una longitud tan chica (L0 = 5 mm) y se usa los datos de extensión de la máquina de ensayo.
- Poner la probeta en posición lo más vertical posible y asegurar la sujeción firme de la misma
- Volver a una carga nula y restablecer la posición inicial del cabezal, aunque sea muy cerca de la última posición inicial
- Apretar el extensómetro a la probeta con elástico para que no se puede mover sin deformación del material
- Equilibrar el extensómetro para que muestre un 0 de deformación
- Verificar una última vez que todo esté en orden
- Arrancar el ensayo de tracción
- Cuando el extensómetro llega a la deformación de retiro, retirar el extensómetro cortando los elásticos
- Esperar que se termine el ensayo a la rotura de la probeta y finalizar el ensayo
- Sacar la probeta y limpiar la zona

#### Tratamiento de los datos:

- Sacar los datos numéricos del archivo CSV:
- Los datos por sacar son:
  - La curva relación tensión-deformación extensómetro
  - La curva relación tensión-desplazamiento del cabezal
  - La recta de tendencia de la zona elástica que se encuentra sacando la curva de tendencia del gráfico con los primeros valores de tensión-deformación
  - Rp0,2
  - Rm
  - Una verificación del módulo de Young con el cálculo
  - El alargamiento a la rotura y la estricción con la medición de la longitud y el área finales después de la deformación
- Reagrupar los datos para comparación

### 3.2 [El extensómetro](#)

El extensómetro usado durante el estudio es el modelo 50 mm de la serie 2630-100 de INSTRON y tiene un rango de medición de 50 mm hasta 25 mm mínimo.



Figura 54: Extensómetro INSTRON 50mm

### 3.3 [Resultados probetas planas grandes](#)

#### 3.3.1 [Características de las probetas](#)

Para el estudio de las probetas grandes, tenemos 5 unidades que tienen varias características de superficie. Se estudian 3 categorías:

- Arenadas
- Pulidas sobre la cara mayor
- Pulidas sobre la cara mayor y sobre los lados

Siguen las medidas (en mm) de las probetas planas grandes con sus características:

Tabla 17: Dimensiones de las probetas planas grandes (PPG)

Probetas	Descripción	Ancho 1	Ancho 2	Ancho 3	Espesor 1	Espesor 2	Espesor 3
PPG1	Arenada	12,51	12,50	12,51	6,04	6,03	6,04
PPG2	Arenada	12,52	12,53	12,53	6,03	6,03	6,04
PPG3	Pulida (Cara + lados)	12,47	12,46	12,47	6,03	6,02	6,00
PPG4	Pulida (Cara + lados)	12,47	12,45	12,46	6,01	6,00	6,01
PPG5	Pulida (Cara)	12,52	12,52	12,52	6,00	5,95	5,98

Podemos ver que según esta tabla 17 el corte con la máquina de corte por hilo nos permite tener una precisión de  $\pm 0,05$  mm.

Otras dos características interesantes de las probetas son la dureza y la rugosidad de la superficie.

## Dureza:

Tabla 18: Durezas de las probetas planas grandes (PPG)

Probetas	Dureza (HRC)						Media	Rango
PPG1	10,4	8,8	9,3	12,1	7,4	9,8	9,63	4,7
PPG2	7	6,8	6,9	6,8			6,88	0,2
PPG3	7,2	8,9	7,7	10,5			8,58	3,3
PPG4	8,1	6,7	5,9	7,5	10,4		7,72	4,5
PPG5	8,8	9,7					9,25	0,9

Las durezas de las probetas muestran una tendencia alrededor de 8 HRC (Dureza Rockwell) que define nuestro acero de probeta como un material blando.

En consecuencia, era un buen complemento hacer un estudio de micro dureza Vickers. Resulta la tabla 19 con los datos de micro dureza:

Tabla 19: Micro dureza Vickers

Dureza n°	HV
1	194,7
2	198,1
3	183,7
4	180,9
5	200,2
Media	191,5
Fuerza aplicada (N)	1000

## Rugosidad:

Tabla 20: Rugosidad de las probetas planas grandes (PPG)

Probetas	Rugosidad ( $\mu\text{m}$ )					Media
PPG Test	3,713	4,252	4,264	4,669	4,322	4,244
PPG Arenada 1	3,362	4,059	3,517	4,931	4,257	4,025
PPG Arenada 2	3,99	4,24	4,438	5,089	4,854	4,522
PPG Rectificada 1	0,576	0,454	0,198	0,207	0,863	0,460
PPG Rectificada 2	0,304	0,717	0,22	0,297	0,181	0,344

El tema de la rugosidad depende directamente del tipo de superficie que tiene la probeta a ensayar. Las probetas que son arenadas tienen una rugosidad cerca de 4  $\mu\text{m}$  y las rectificadas son más cerca de 0,5  $\mu\text{m}$ .

Finalmente, notamos el tipo de celda de carga que usamos para este lote de ensayo que es una celda de carga INSTRON de 100 kN.

### 3.3.2 Resultados gráficos

Después de aplicar a cada ensayo el método práctico, se obtuvieron los diferentes gráficos de ensayo. Los dos principales son la relación tensión-deformación y la relación tensión-desplazamiento del cabezal.

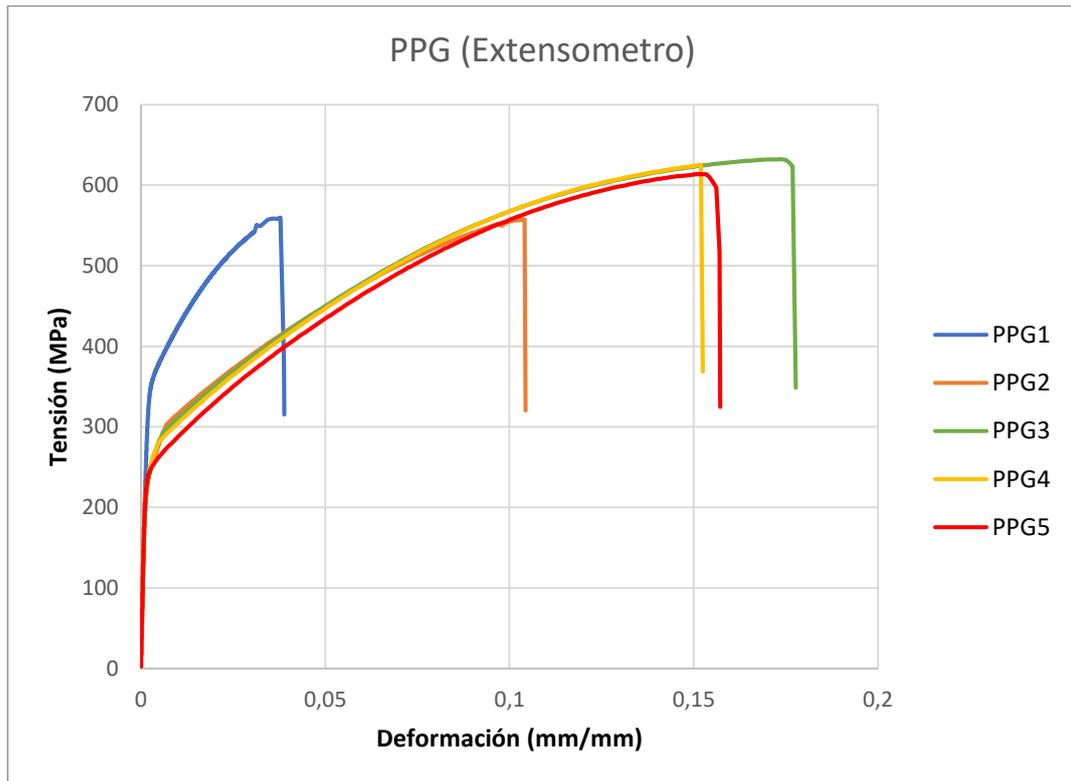


Gráfico 1: Relación tensión - deformación de las probetas grandes

El gráfico 1 se saca con los datos de deformación (en mm/mm) obtenidos con la señal del extensómetro calibrado para una longitud inicial de 50 mm y los datos de tensión (en MPa) obtenidos con la celda de carga de la máquina de ensayo. Esta relación permite sacar dos datos principales: la curva de tendencia de la zona elástica y  $R_{p0,2}$ . En realidad los datos reales del extensómetro se paran a una deformación de 0,02 mm/mm, el resto de los datos son cálculos del extensómetro para alinearse sobre los datos de desplazamiento del cabezal. De hecho, el extensómetro debe ser retirado antes de la rotura para no dañarlo y la curva hasta la rotura está permitida por los datos de deformación que vienen de la máquina de tracción.

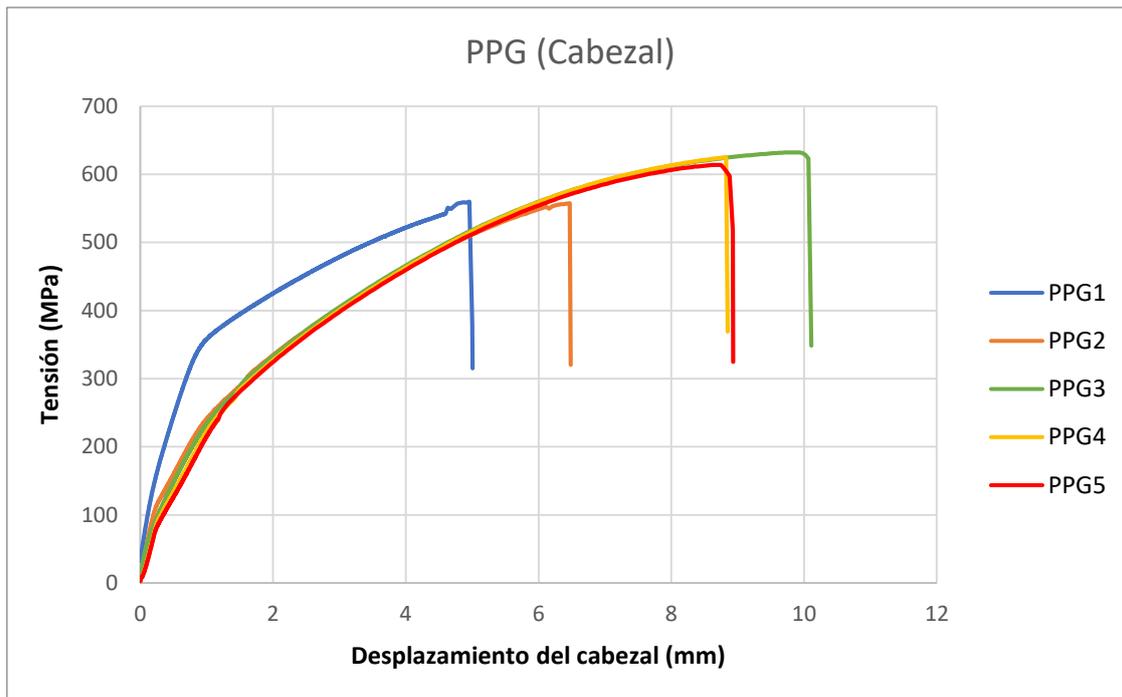


Gráfico 2: Relación tensión - desplazamiento del cabezal de las probetas grandes

El gráfico 2 es la representación de los datos de tensión (en MPa) con los datos de desplazamiento del cabezal (en mm) de la máquina de tracción. Este gráfico permite sacar  $R_m$  y el alargamiento a la rotura (A%) que también puede ser medido directamente sobre la probeta rota con un calibre.

### 3.3.3 Datos numéricos

Los gráficos se completan con los datos numéricos que dan las características de cada probeta. Así sigue la tabla 21 que recuerda todos los resultados de los ensayos sobre las probetas planas grandes.

Tabla 21: Características mecánicas de las probetas grandes (PPG)

Probetas Planas Grandes – PPG (Área = 75 mm <sup>2</sup> )					
	Descripción	Rp0,2	Rm	E	A%
PPG1	Arenada	269	560	210	
PPG2	Arenada	266	557	194	5,3
PPG3	Pulida (Cara + lados)	260	630	216	
PPG4	Pulida (Cara + lados)	261	625	212	7,7
PPG5	Pulida (Cara)	252	614	218	6,3

Tabla 22: Estricción de las probetas planas grandes (PPG)

Probetas Planas Grandes – PPG (Área = 75 mm <sup>2</sup> )					
	Reducción de área (%)	Área inicial (mm <sup>2</sup> )	Área final (mm <sup>2</sup> )	Ancho f (mm)	Espesor f (mm)
PPG1	4,3%	75,50	72,27	12,25	5,90
PPG2	4,1%	75,49	72,40	12,23	5,92
PPG3	6,2%	75,01	70,38	12,01	5,86
PPG4	5,6%	74,70	70,49	12,07	5,84
PPG5	6,2%	74,49	69,89	12,05	5,8

### 3.4 [Resultados probetas planas medianas](#)

#### 3.4.1 [Características de las probetas](#)

De la misma manera que las probetas grandes, las probetas planas medianas se dividen en 3 categorías de superficie: arenadas, pulidas en la cara principal y pulida sobre la cara principal más los lados exteriores.

Siguen en la tabla 23 las medidas (en mm) de las probetas planas medianas:

Tabla 23: Dimensiones de las probetas planas medianas (PPM)

Probetas	Ancho 1	Ancho 2	Ancho 3	Espesor 1	Espesor 2	Espesor 3
PPM1	4,88	4,99	4,99	3,96	3,96	3,96
PPM2	4,99	4,99	4,99	3,96	3,96	3,96
PPM3	4,98	4,99	4,99	3,97	3,97	3,97
PPM4	4,99	4,99	5,00	3,97	3,97	3,97
PPM5	4,95	4,93	4,95	3,96	3,95	3,95
PPM6	4,97	4,95	4,95	3,95	3,96	3,95
PPM7	4,96	4,94	5,00	3,96	3,97	3,98
PPM8	5,00	5,00	5,00	3,97	3,98	3,99

Se puede observar que el orden de dispersión de las medidas obtenidas con el proceso de corte por hilo están dentro del rango de  $\pm 0,05$  mm, notando que las medidas menores corresponden a las probetas que tienen un cambio de superficie post corte (pulido).

## Dureza:

Tabla 24: Dureza de las probetas planas medianas (PPM)

Probetas	Dureza (HRC)				Media	Rango
PPM1	7,4	8,7	10,5	8,4	8,75	3,1
PPM2	11	8,6	6,2	15,3	10,28	9,1
PPM3	8	9,4	8,1	7,5	8,25	1,9
PPM4	4,2	10,9	8,8	10,8	8,68	6,7
PPM5	7,9	10,4	9,4	7,8	8,88	2,6
PPM6	9,8	10,4	10,7		10,30	0,9
PPM7	10,5	9,8	10,2	10,7	10,30	0,9
PPM8	10,3	8,9	9,6	9,5	9,58	1,4

Similarmente a los resultados de dureza de las probetas grandes, este tamaño de probeta mediano muestra una dureza alrededor de 9 HRC que, de nuevo, caracteriza el material como blando.

Para la manejar la carga, usamos la celda de carga INSTRON de 100 kN para los ensayos de este tipo de probetas.

Finalmente, antes de arrancar con los ensayos, hicimos una verificación de la dispersión del extensómetro con la ayuda de un equipo de calibración milesimal. La tabla 25 resume los datos de medición. El método de verificación es comparar la deformación del extensómetro cada décima a la ida y a la vuelta, así nos aseguramos los resultados del extensómetro.

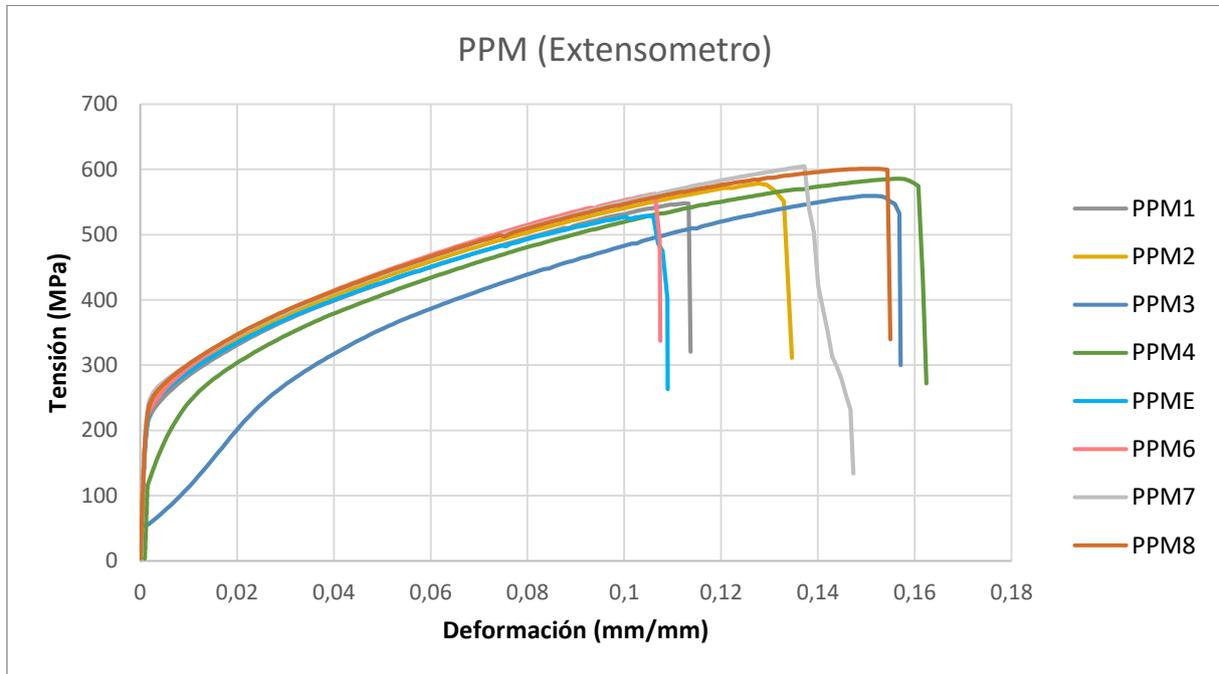
Tabla 25: Datos de calibración experimental del extensómetro

mm	Deformación ida	Deformación vuelta	
0	0	0,00015	Teórico
0,1	0,00373	0,00409	0,00398
0,2	0,00764	0,00812	0,00794
0,3	0,01172	0,01192	0,01186
0,4	0,01568	0,01608	0,01575
0,5	0,0197	0,02008	0,01961
0,6	0,02367	0,02411	0,02344
0,7	0,02767	0,02813	0,02724
0,8	0,03169	0,03209	0,03101
0,9	0,03576	0,03609	0,03475
1	0,03978		0,03846

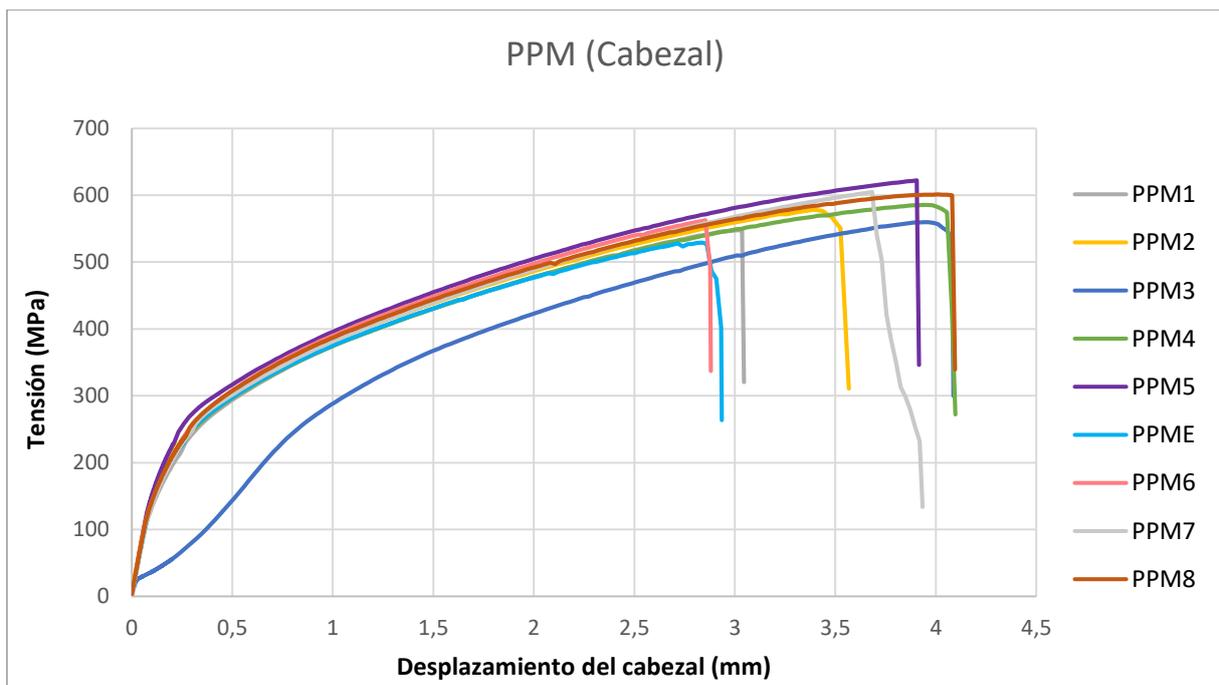
La primera columna es el desplazamiento del equipo (en mm), las dos del centro la deformación del extensómetro (ida y vuelta) y la última es la base teórica de deformación que el extensómetro debería medir.

### 3.4.2 Resultados gráficos

De nuevo, sacamos los gráficos de las relaciones tensión-deformación y tensión-desplazamiento del cabezal.



El gráfico 3 permite sacar los datos de  $R_{p0,2}$  con los datos sacados del extensómetro adaptado a una longitud inicial de 25 mm.



Este gráfico 4 permite observar los datos de Rm y de alargamiento a la rotura (A%).

### 3.4.3 Datos numéricos

Completamos los datos gráficos con los datos numéricos y de descripción que salen de los ensayos de las probetas planas medianas incluidos en las tablas 26 y 27 que siguen.

Tabla 26: Características experimentales de las probetas planas medianas (PPM)

Probetas Planas Medianas - PPM (Área = 12 mm <sup>2</sup> )					
	Descripción	Rp0,2 (MPa)	Rm (MPa)	E (MPa)	A% (%)
PPM1	Arenada	236	548	213	7,64
PPM2	Arenada	250	578	199	
PPM3	Arenada		559		6,76
PPM4	Arenada	160	586		7,6
PPM5	Pulida (Cara + lados)				7,16
PPME	Arenada	247	529	204	
PPM6	Pulida (Cara + lados)	245	563	218	6,24
PPM7	Pulida (Cara + lados)	264	605	208	5,72
PPM8	Pulida (Cara)	259	601	199	7,92

Y los datos de estricción de este tipo de probetas:

Tabla 27: Datos de estricción de las probetas planas medianas (PPM)

Probetas Planas Medianas - PPM (Área = 12 mm <sup>2</sup> )					
	Reducción de área (%)	Área inicial (mm <sup>2</sup> )	Área final (mm <sup>2</sup> )	Ancho f (mm)	Espesor f (mm)
PPM1	3,2%	19,76	19,12	4,89	3,91
PPM2	4,1%	19,76	18,95	4,86	3,9
PPM3	4,9%	19,81	18,85	4,87	3,87
PPM4	5,0%	19,81	18,83	4,84	3,89
PPM5	3,2%	19,47	18,86	4,86	3,88
PPME	6,6%	19,99	18,67	4,85	3,85
PPM6	2,9%	19,60	19,04	4,87	3,91
PPM7	5,3%	19,61	18,58	4,74	3,92
PPM8	5,0%	19,90	18,91	4,86	3,89

### 3.5 [Resultados probetas planas pequeñas](#)

#### 3.5.1 [Características](#)

Las probetas chicas son el punto principal del estudio y puede ser considerado como el desafío del proyecto. Así fue una parte importante y diferente de las dos primeras que tratan de las probetas de tamaño mayor.

La primera diferencia es relacionada con la celda de carga usada. Usamos una celda de carga de 5kN en lugar de la de 100kN porque teóricamente la carga máxima calculada para este modelo de probeta debería ser alrededor de 600N. Tuvimos una celda de carga de 500N, pero fue tomar un riesgo de usarla en esta situación.

Además de la celda de carga, las mordazas fueron cambiadas de las mordazas clásicas a una pareja de mordazas planas. El nuevo modelo nos permitió tener una distancia inter-mordazas muy pequeñas para que la probeta pueda ser apretada correctamente.

Finalmente, sacamos el extensómetro del método porque no era adecuado para el tamaño de probeta.

No hicimos ensayo de dureza debido a que resultaría igual que los precedentes (cerca de 10 HRC). Por lo tanto, no hicimos arenado tampoco para evitar cambiar la dureza de superficie de una probeta con un espesor tan delgado (1 mm).

Finalmente, las probetas chicas se dividen en 2 categorías: las que presentan el estado de la superficie después del corte por hilo y las pulidas. Hay que notar que el espesor varía entre las dos categorías en más o menos una décima.

Sigue la tabla 28 con las medidas de las probetas pequeñas:

*Tabla 28: Dimensiones de las probetas planas pequeñas (PPP)*

Probetas	Ancho (mm)	Espesor (mm)
PPP1	1,180	1,000
PPP2	1,208	1,030
PPP3	1,206	1,031
PPP4	1,209	1,035
PPP5	1,205	1,022
PPP6	1,201	0,928
PPP7	1,212	0,959
PPP8	1,181	0,997
PPP9	1,176	0,993

Notamos que las medidas fueron tomadas con un reloj comparador digital de la marca Mitutoyo que permite medir las distancias hasta la milésima. Sigue la figura 55 del método de medición.



*Figura 55: Sistema de medición de las probetas pequeñas*

Tuvimos un bloque de metal rectificado como mesa de medición y el reloj comparador fijado en una posición definida y calibrada. El método de medición es tipo “relativo”.

### 3.5.2 Resultados gráficos

Sacamos los gráficos clásicos y sacamos los datos que nos interesan.

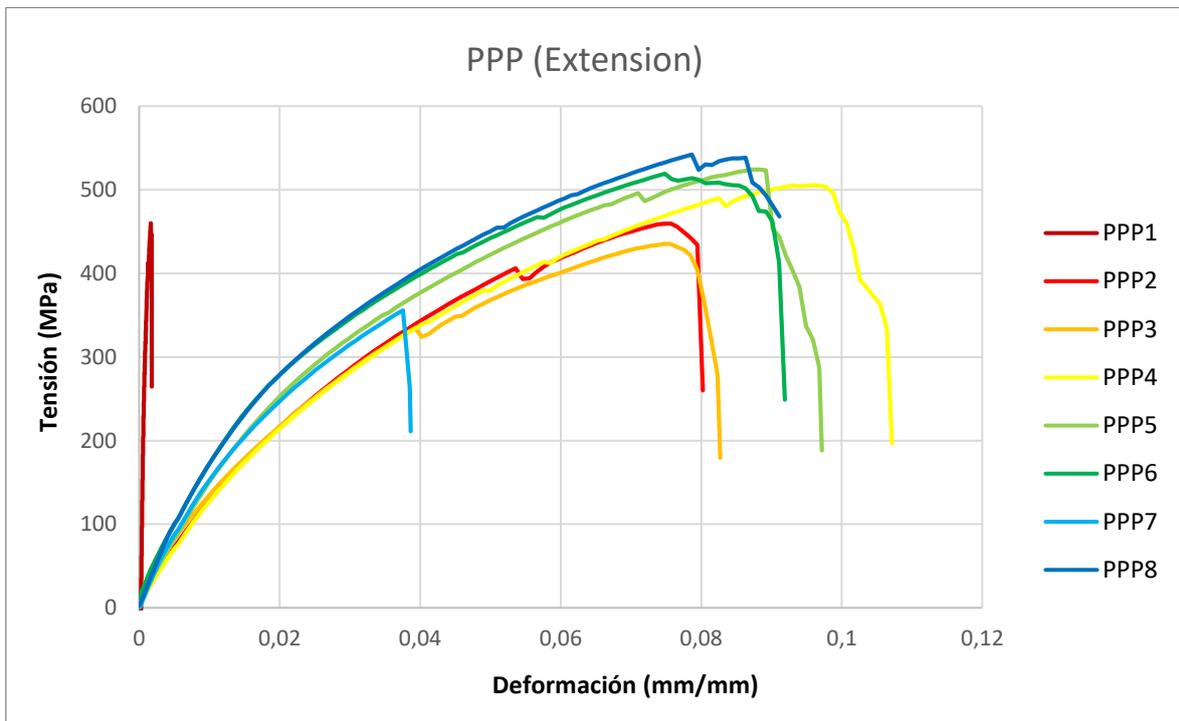


Gráfico 5: Relación tensión - deformación de las probetas pequeñas

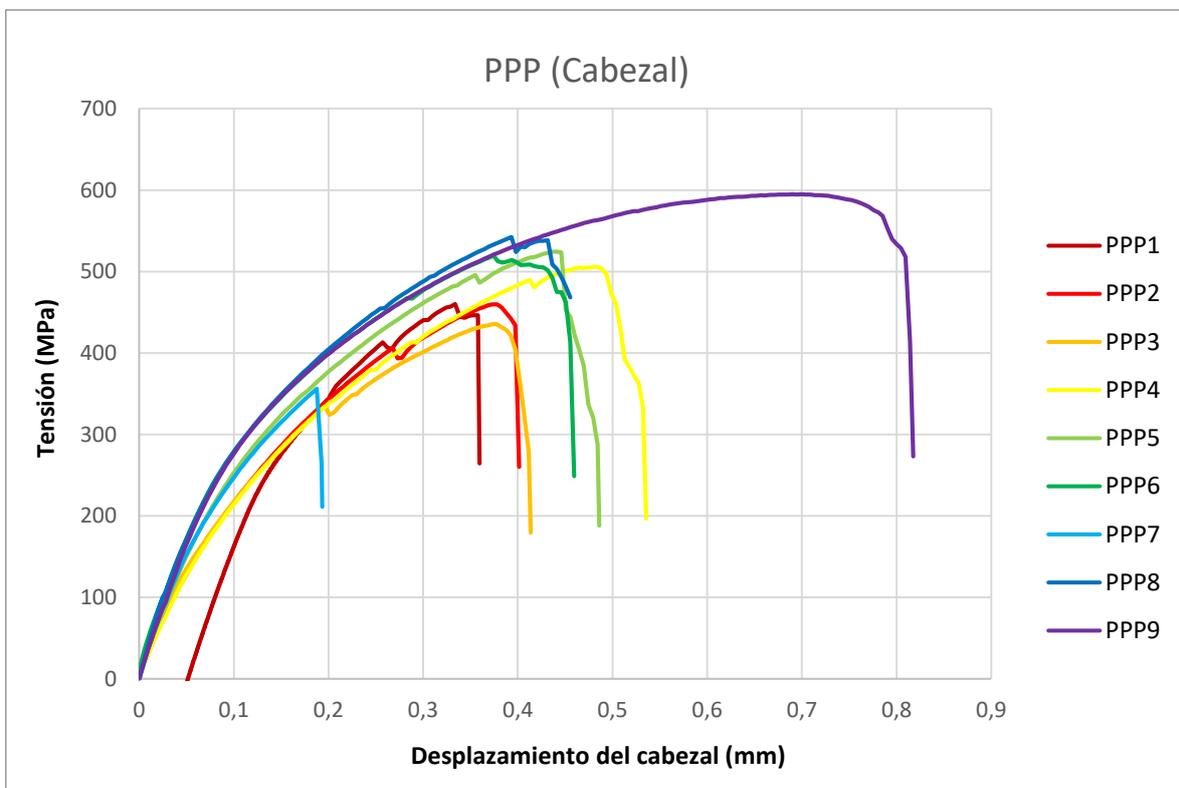


Gráfico 6: Relación tensión - desplazamiento del cabezal de las probetas pequeñas

### 3.5.3 Datos numéricos

Completamos con los datos numéricos que provienen de la máquina de ensayo.

Tabla 29: Características mecánicas experimentales de las probetas planas pequeñas (PPP)

Probetas Planas Pequeñas - PPP (Área = 1,2 mm <sup>2</sup> )							
	Descripción	Rp0,2 (MPa)	Rm (MPa)	E (GPa)	A%	Lfinal (mm)	L0 (mm)
PPP1	Normal		460	250	2,4%	5,12	5
PPP2	Normal	170	460	173	1,6%	5,08	5
PPP3	Normal	155	435	161			
PPP4	Normal	116	505	186	2,2%	5,11	5
PPP5	Normal	132	524	217	2,0%	5,10	5
PPP6	Pulida	155	520	275	5,0%	5,25	5
PPP7	Pulida	143	356	234			
PPP8	Pulida	179	542	266	4,6%	5,23	5
PPP9	Pulida	179	595	226	5,2%	5,26	5

#### Datos de estricción:

Tabla 30: Estricción de las probetas planas pequeñas (PPP)

Probetas Planas Pequeñas - PPP (Área = 1,2 mm <sup>2</sup> )					
	Reducción de área (%)	Área inicial (mm <sup>2</sup> )	Área final (mm <sup>2</sup> )	Ancho f (mm)	Espesor f (mm)
PPP1	5,8%	1,180	1,111	1,136	0,978
PPP2					
PPP3	7,3%	1,243	1,153	1,166	0,989
PPP4	8,3%	1,251	1,147	1,185	0,968
PPP5					
PPP6	7,5%	1,115	1,031	1,083	0,952
PPP7					
PPP8					
PPP9	5,9%	1,168	1,098	1,166	0,942

Las medidas para calcular la estricción fueron tomadas con la ayuda de un comparador óptico (figura 56) que nos permite medir electrónicamente la imagen de una lupa. De esta manera obtenemos una precisión mayor que con un calibre estándar.

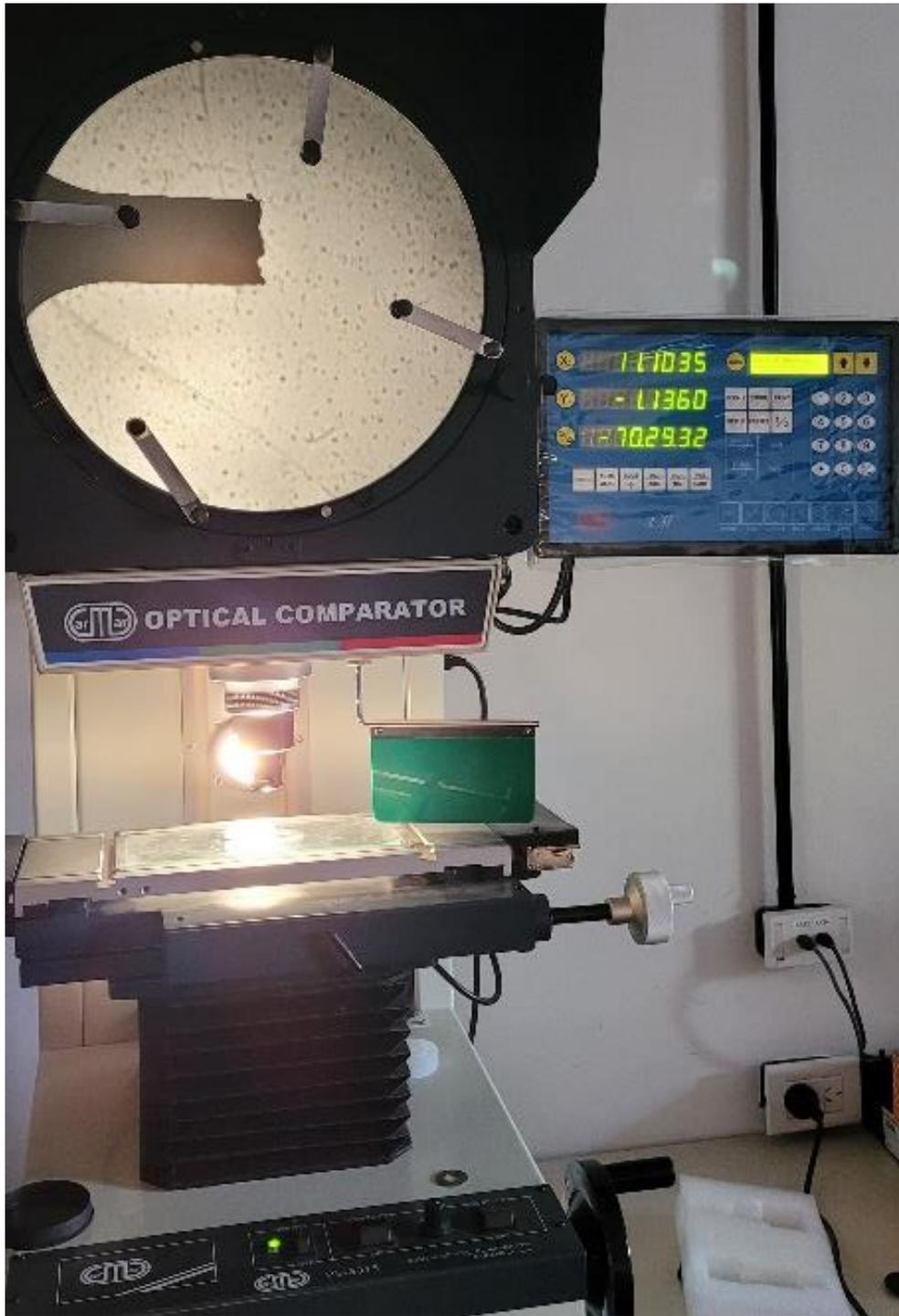
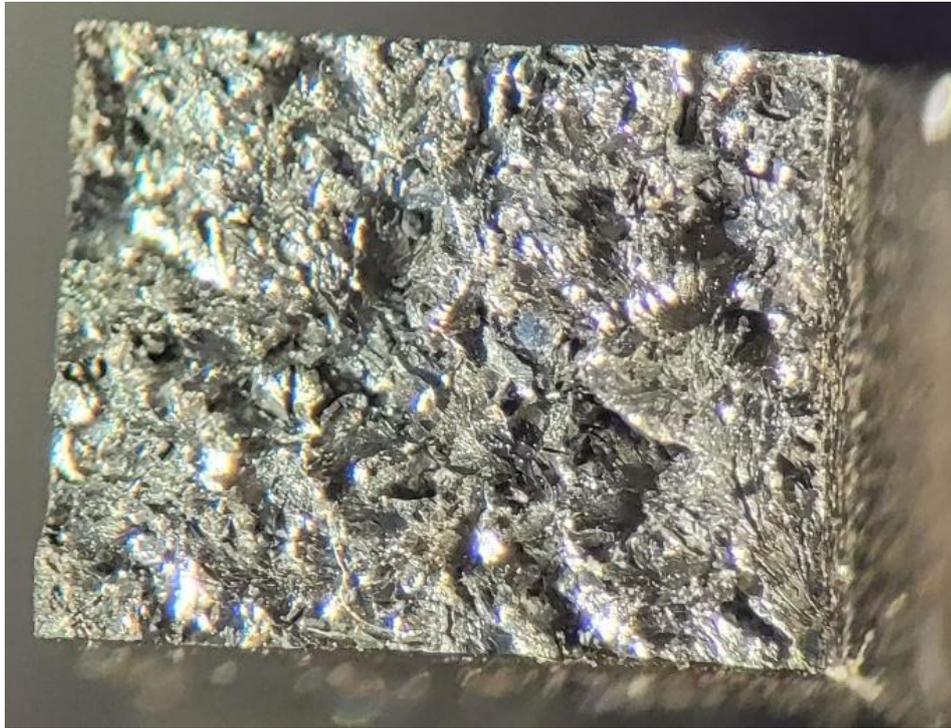


Figura 56: Comparador óptico

### 3.6 Observación de la rotura

Con las observaciones de la rotura a la lupa observamos granos muy gruesos que son la prueba de un enfriamiento en mucho tiempo (la presencia de perlita del punto de la metalografía es coherente con esta conclusión). Resulta un acero muy poco dúctil que rompió de manera frágil y no uniforme.

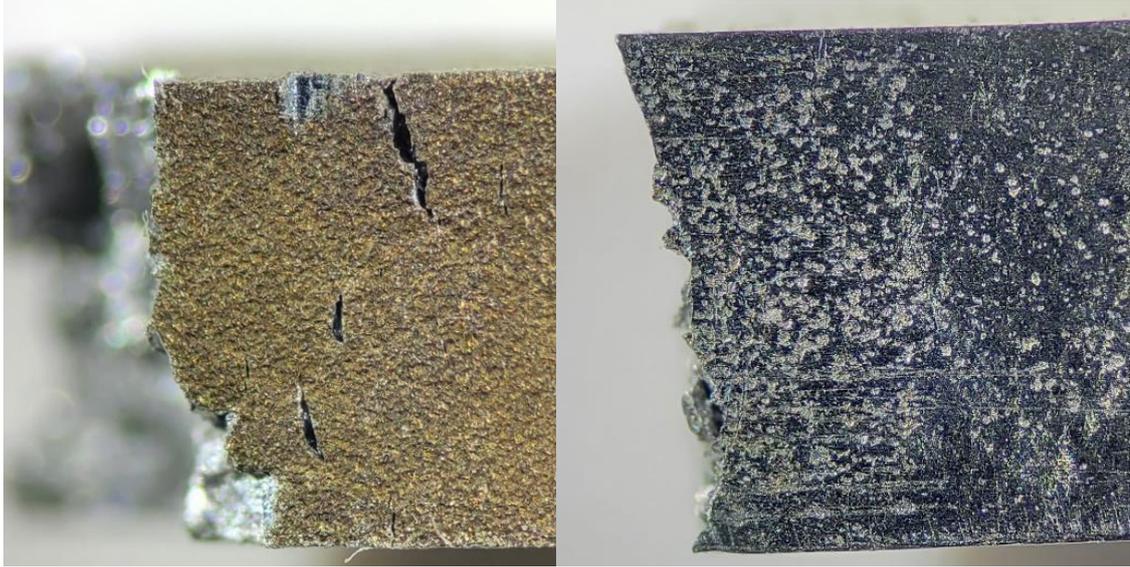


*Figura 57: Rotura de una probeta mediana*



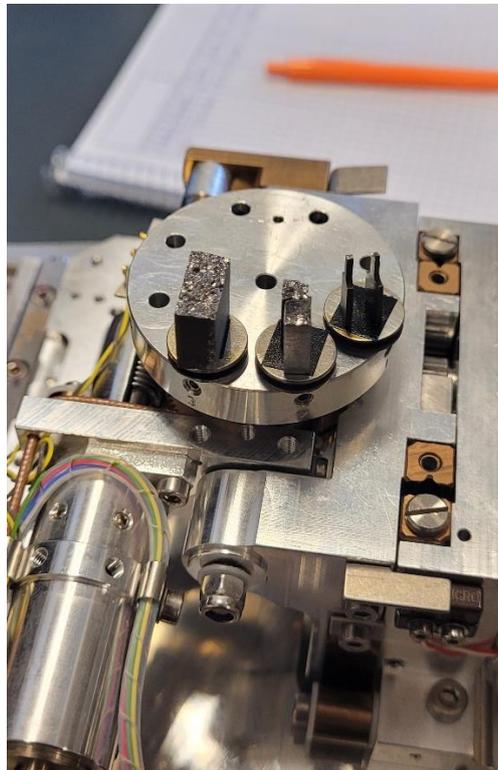
*Figura 58: Rotura de una probeta grande*

Se observa también, en la figura 59, pre-fisuras en la zona de la rotura de las probetas arenadas que pueden ser consecuencias de las inclusiones en el material de base o de un estado de superficie poco homogénea en la escala del micrómetro. Las probetas rectificadas no presentaban este tipo de defecto.



*Figura 59: Comparación a la lupa de la zona de rotura dependiente del estado de superficie*

Para aumentar la precisión del análisis de la fisura, se usó el microscopio electrónico de barrido. Este instrumento nos permitió llegar a un aumento de 8K veces.



*Figura 60: Muestras para observaciones en el microscopio*



Figura 61: Microscopio electrónico de barrido

Como se ve en la figura 60 se observan cinco probetas diferentes: una grande, dos medianas con un estado de superficie diferente y dos pequeñas igualmente de superficie distintas. Arrancamos con el tamaño de probeta mayor para identificar qué tipo precisamente de fractura era. Obteníamos estas fotos siguientes con varios aumentos:

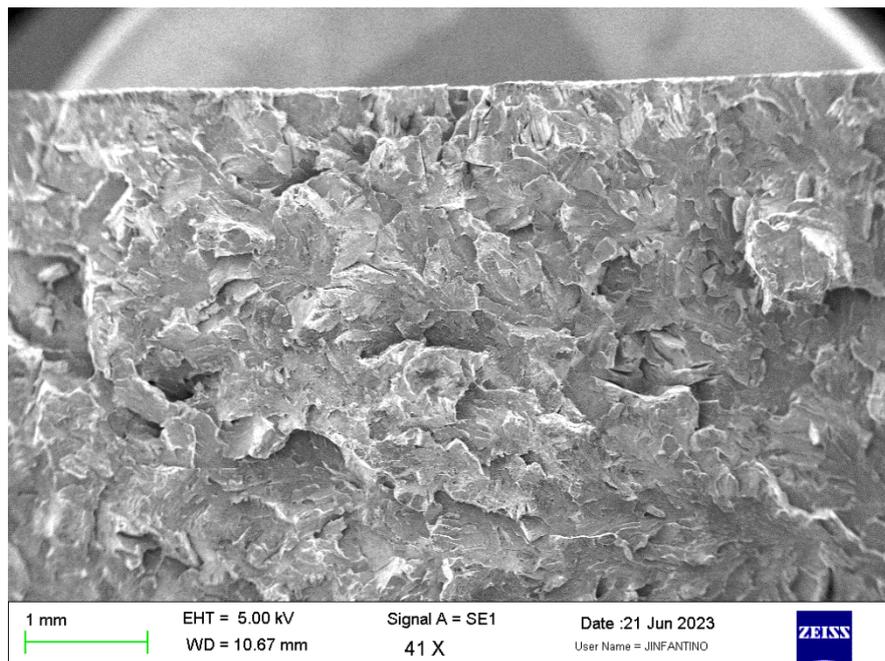


Figura 62: Observación x41 de la zona de rotura de una probeta grande

En la figura 62 se observa el borde de la probeta del punto de vista de la rotura. A primera vista se identifican planos de fractura evidentes que son relacionados con deformaciones frágiles que conducen a una fractura frágil del material. Para mejorar nuestro estudio seguimos aumentando.

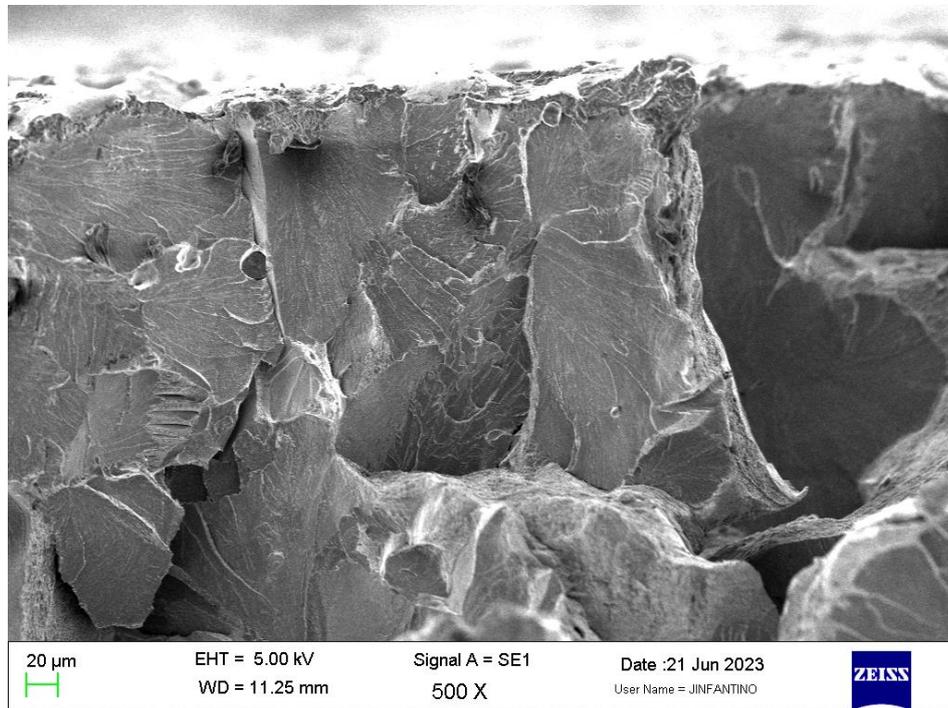


Figura 63: Observación x500 de la zona de rotura de una probeta grande

Todavía nos ubicamos sobre el borde de la rotura y la figura 63 permite tener una visión más detallada de los planos de fractura que confirman un tipo de rotura frágil. Además, se pueden observar varios granos y sus tamaños cercanos de 100 μm.

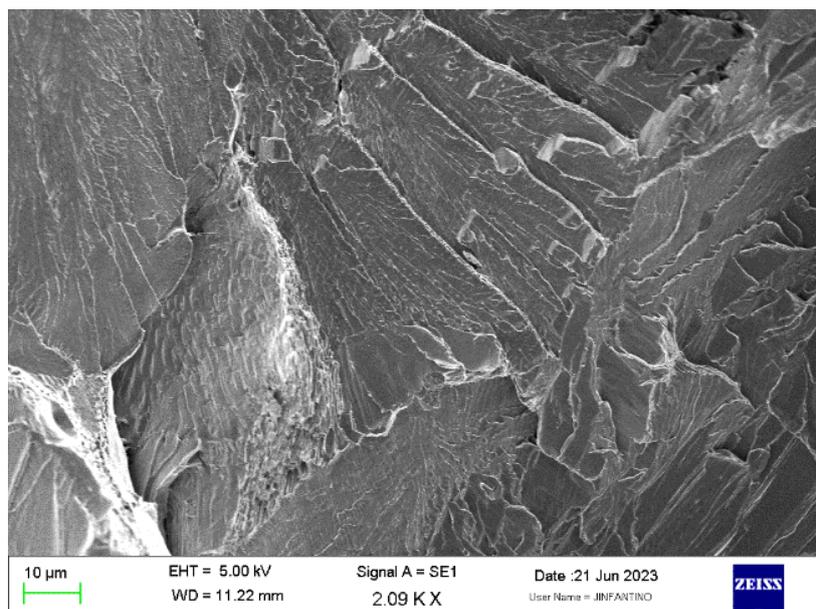


Figura 64: Zona de planos de rotura

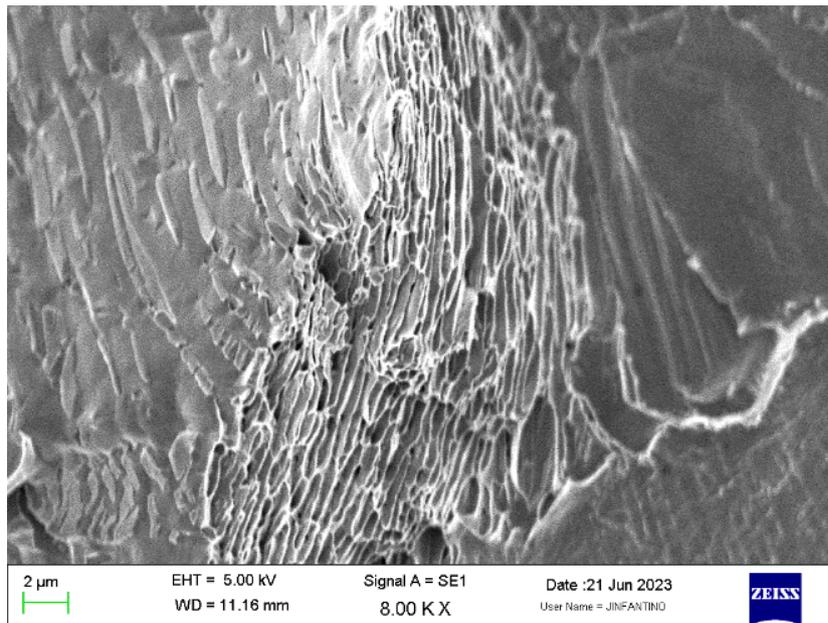


Figura 65: Zona de deformación dúctil

Ahora, seguimos enfocando y podemos ver aparecer la composición interna de la perlita con sucesiones de cementita que tienen un comportamiento frágil y la ferrita (zona de la red blanca) que tiene un comportamiento dúctil como se puede observar en la figura 65 con la aparición de los cráteres típicos de una deformación dúctil.

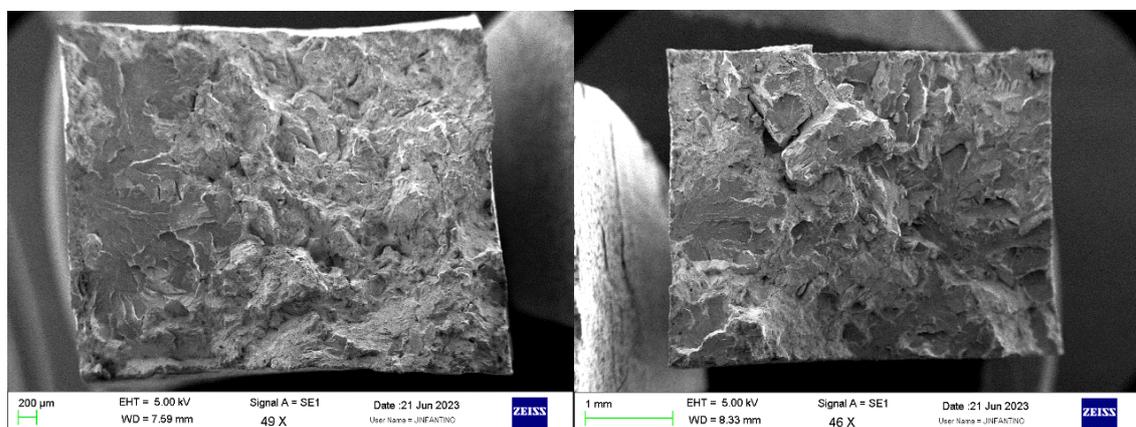


Figura 66: Observación x49 de la zona de rotura de dos probetas medianas

La figura 66 ilustra las dos superficies de rotura de las probetas medianas que muestran un tipo de rotura muy parecido a de la probeta grande.

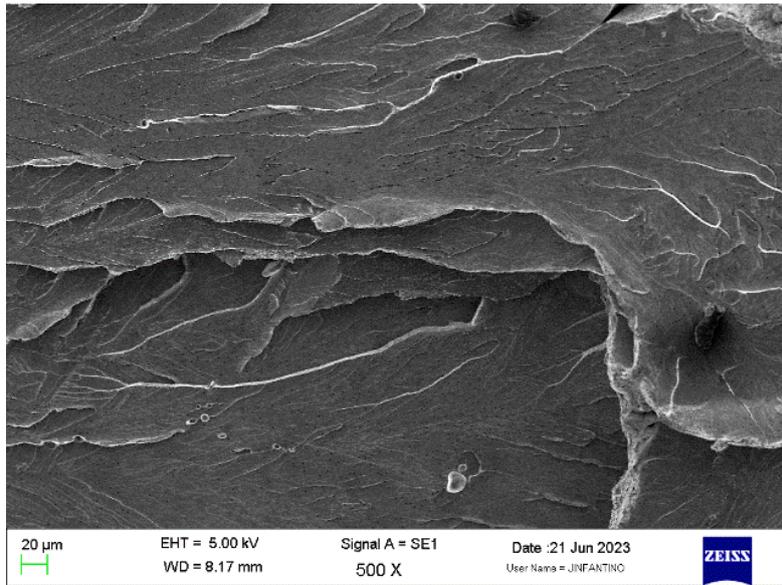


Figura 67: Planos de fractura x500

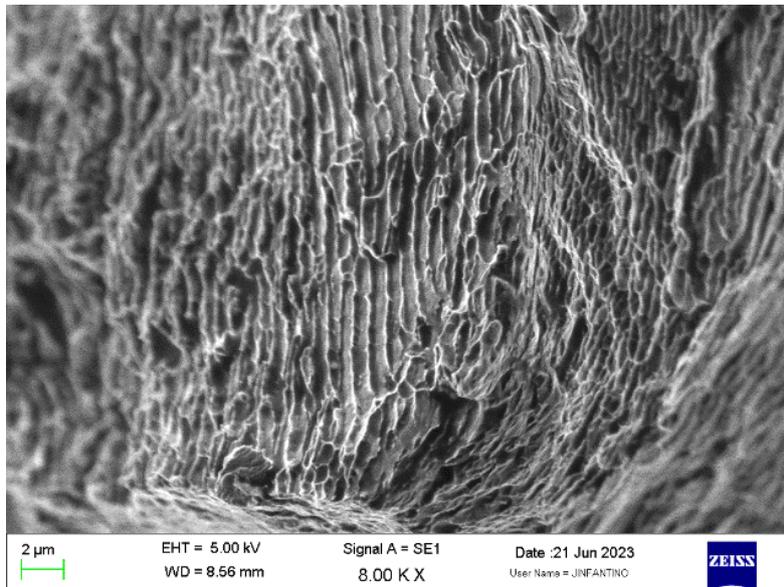


Figura 68: Cráteres dúctiles x8000

Igualmente, que para la probeta grande observamos en la figura 67 los planos de rotura muy pronunciados cerca de un aumento de 500x y cuando seguimos aumentando se pueden observar los cráteres de deformación dúctil.

Finalmente, observamos las probetas chicas. Lo que se puede observar y que marca la superficie de rotura con marcas negras son suciedades.

Se puede sacar la misma conclusión con las pequeñas probetas que rompieron de manera frágil en su mayoría.

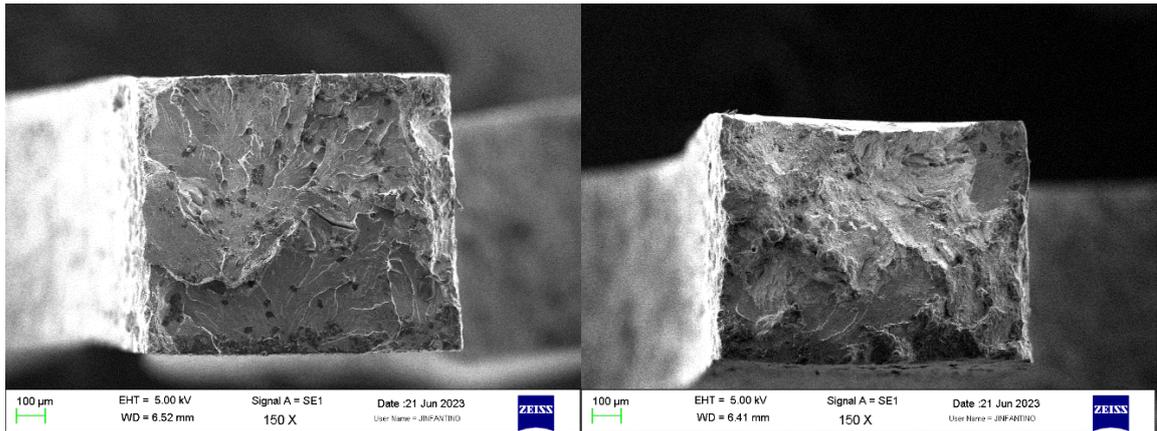


Figura 69: Fracturas probetas chicas

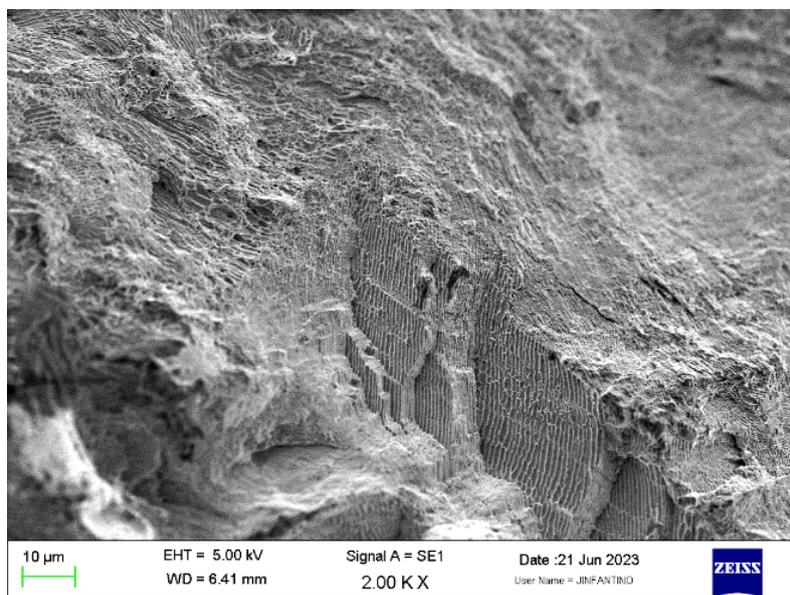


Figura 70: Cráteres x2000

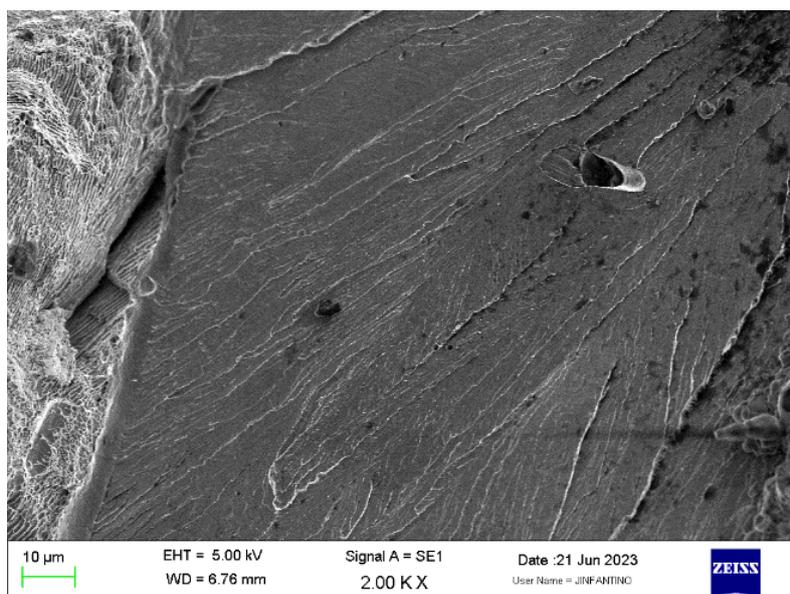


Figura 71: Planos de fractura x2000

En realidad, la conclusión para las probetas pequeñas es más compleja que para los otros tamaños. Se observa en la figura 69 que los granos que componen el acero son de tamaño muy grande comparado al espesor total de la probeta. Además, debido a la orientación de granos en el metal, la rotura puede ser más dúctil, o a veces más frágil. En las figuras 70 y 71 se ilustran 2 granos con orientaciones diferentes que rompieron de manera totalmente distinta. La zona de este clivaje se ubica en la esquina alta derecha de la figura 69. Así, se puede explicar la dispersión en los resultados en la discusión del informe sobre las probetas chicas. Notamos también en la figura 71 una inclusión que es típica del proceso de obtención de este tipo de acero destinado a la industria y que necesitan tratamientos térmicos.

La conclusión sería que la fractura en nuestro estudio toma un comportamiento frágil, pero se necesita hacer de nuevo los ensayos con un acero más homogéneo en su estructura y compararlos a los ensayos de este estudio.

### 3.7 [Análisis de incertidumbre](#)

Antes de discutir los resultados se realiza un análisis de incertidumbre para afirmar que los resultados no se encuentran en el mismo rango de incertidumbre, lo que cancelaría todas las conclusiones relativas a las características mecánicas propias al material.

Para este estudio había que elegir los factores que impactan más en los resultados finales. Salieron después de pensar que los factores mayores eran los instrumentos de medición de las distancias y las incertidumbres relacionadas con la máquina de ensayo y sus componentes. Obviamente, los factores humanos de procedimiento, de operador y de ambiente tienen un impacto, pero no los tenemos en cuenta para este estudio.

Así tuvimos los datos de calibración de los factores con mayor impacto recopilados en la tabla 31, notando que son sacados de los certificados de calibración de los instrumentos.

La primera columna de datos da las incertidumbres expandidas sacadas de los certificados y la segunda las incertidumbres estándares.

*Tabla 31: Incertidumbres del material del proyecto*

Calibre centesimal	0,02	( $\pm$ x mm)	0,01	( $\pm$ x mm)
Comparador milésimal	0,0008	( $\pm$ x mm)	0,0004	( $\pm$ x mm)
Máquina de ensayo (desplazamiento)	0,005	( $\pm$ x mm)	0,0025	( $\pm$ x mm)
Máquina de ensayo (Velocidad)	20	( $\pm$ x ms)	10	( $\pm$ x ms)
celda de carga 100kN	0,16	( $\pm$ x %)	0,08	( $\pm$ x %)
celda de carga 5kN	0,025	( $\pm$ x %)	0,0125	( $\pm$ x %)

Combinando las incertidumbres para cada resultado obtenemos la tabla 32 siguiente que resume todos los rangos de incertidumbre expandida según el resultado y el tipo de superficie de probeta:

*Tabla 32: Incertidumbres de los resultados mecánicos*

	Rp0,2	Rm	A%	Estricción
Unidad	MPa	MPa	%	%
PPG	± 1	± 2	± 0,02	± 0,02
PPM	± 2	± 4	± 0,06	± 0,04
PPP	/	± 0,6	± 0,006	± 0,006

Hay que notar también que para este estudio el factor del operador no está incluido y obviamente representa un factor importante para el análisis de incertidumbre de las probetas planas pequeñas, así habría que desarrollar el estudio para este modelo.

## 4 Discusión

### 4.1 [Introducción a la discusión e hipótesis](#)

Ahora, después de los ensayos y del trabajo experimental, arrancamos la discusión de los resultados para analizarlos y sacar tendencias, conclusiones y pistas de trabajo futuro sobre este tema. El estudio se divide en dos partes principales:

- Una comparación de los resultados por tamaño de probeta a igual estado de superficie.
- Una comparación a igual tipo de tamaño, pero con una superficie diferente.

Por razones de limitaciones de fondos, de material y de tiempo, los ensayos no son muy numerosos, lo que impacta indudablemente en la consolidación de precisión en los resultados, pero ya permite ver algunas tendencias que muestra el material.

Las hipótesis del estudio siguen en lista:

- Los tamaños de probetas grandes y mediano provienen de la norma ASTM E8 y fueron diseñados y elegidos por mí personalmente, pero el diseño de la probeta más chica proviene del CNEA y ajusté solamente partes no funcionales para el ensayo de tracción.
- El tamaño de probeta chico esta fuera de los modelos estándares.
- El bloque de metal provino de un proveedor externo al laboratorio y no cumplió exactamente con las expectativas en el tema de microestructura asociada al mismo.
- Todas las máquinas usadas para el proyecto ya estaban disponibles en el laboratorio, lo que implica un desgaste previo de las máquinas.
- Los ensayos de tracción fueron realizados por un operador, lo que puede impactar hasta un cierto punto en los resultados.



Figura 72: Comparación de los tamaños de probetas

## 4.2 Discusión tamaño por tamaño

### 4.2.1 Probetas grandes

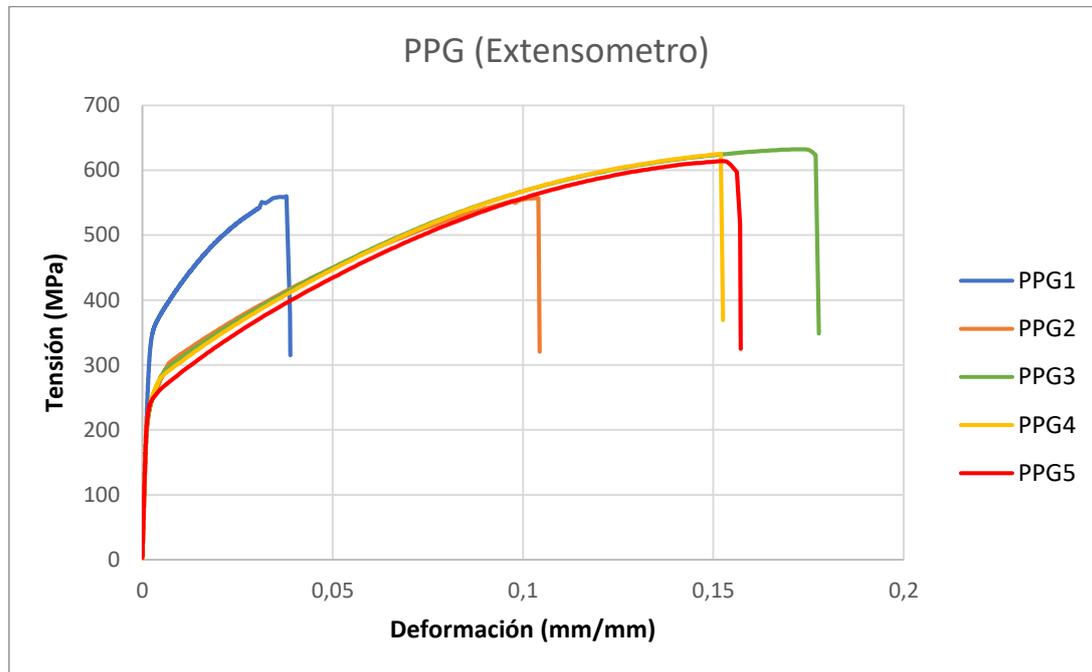


Gráfico 7: Relación tensión - deformación de las probetas grandes

Empezamos por el análisis gráfico de los resultados de los ensayos de las probetas grandes. Primero se saca la probeta n°1 del estudio como prueba de funcionamiento del equipo de ensayos.

Así se puede observar que las curvas son similares en la zona elástica y no muestran una zona de fluencia visible. Se nota una dispersión en la zona de rotura, pero son probetas con superficie diferentes en varias condiciones de ensayo, así que solamente las n°4 y n°5 son realmente comparables. De todos modos, el objetivo del estudio no es comparar las probetas grandes entre ellas, sino ver las diferencias entre los distintos modelos.

De este lote de ensayos sacamos las características mecánicas experimentales de nuestro acero 4140:

Tabla 33: Características mecánicas experimentales de nuestro acero 4140

Característica	Designación	Valor	Unidad	Dispersión
Resistencia convencional	Rp0,2	260	MPa	± 1
Resistencia mecánica a la rotura	Rm	600	MPa	± 20
Alargamiento a la rotura	A%	6,5	%	± 1
Estricción	Z	5	%	± 1

#### 4.2.2 Probetas medianas

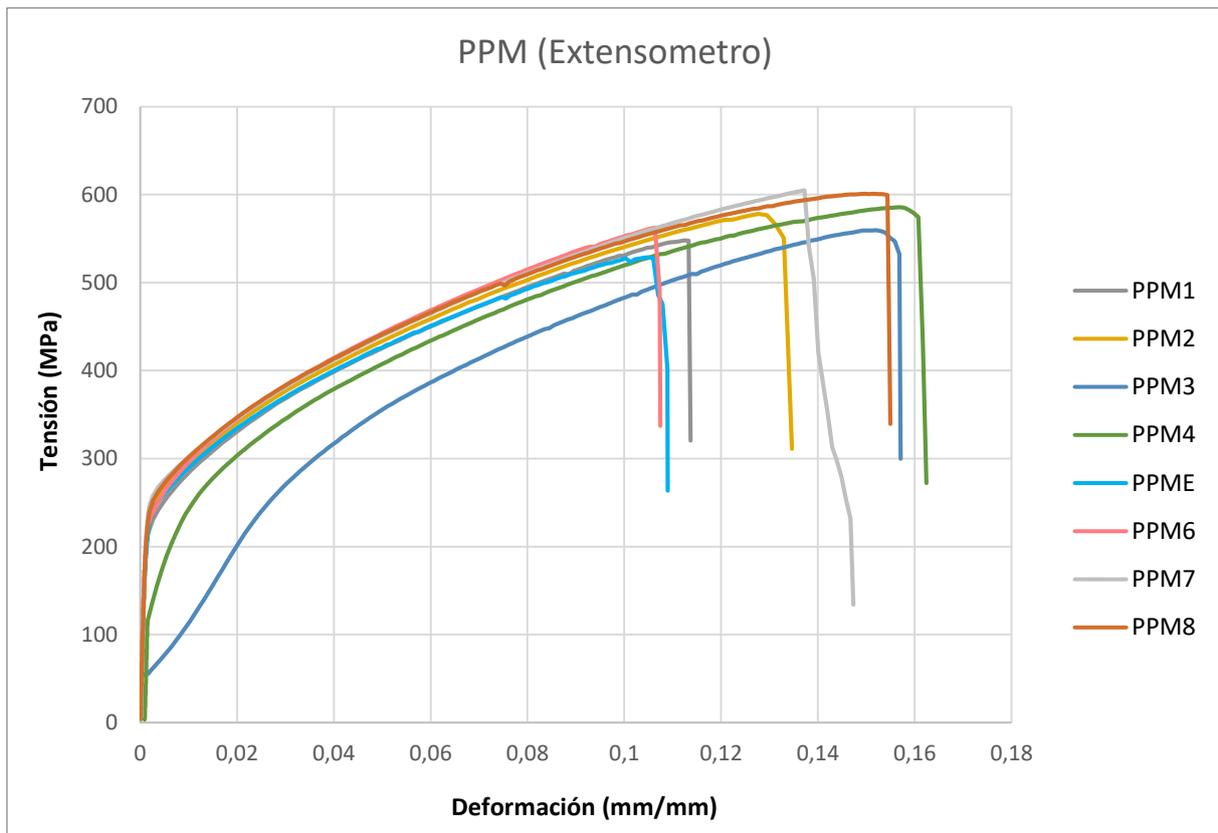


Gráfico 8: Relación tensión - deformación de las probetas medianas

En el caso de las probetas medianas se observan dos anomalías: primero, la probeta n°3 en la que no se encuentra una explicación lógica en la zona elástica, aunque rompió de manera parecida a todas las otras. Segundo la probeta n°4 da esta curva diferente en la zona elástica por una puesta en posición mal hecha.

Siguen las otras probetas que resultaron muy parecidas con una dispersión al nivel de la zona de rotura que se puede explicar por la estructura interna del acero con el tamaño de grano grueso que tiene.

### 4.2.3 Probetas pequeñas

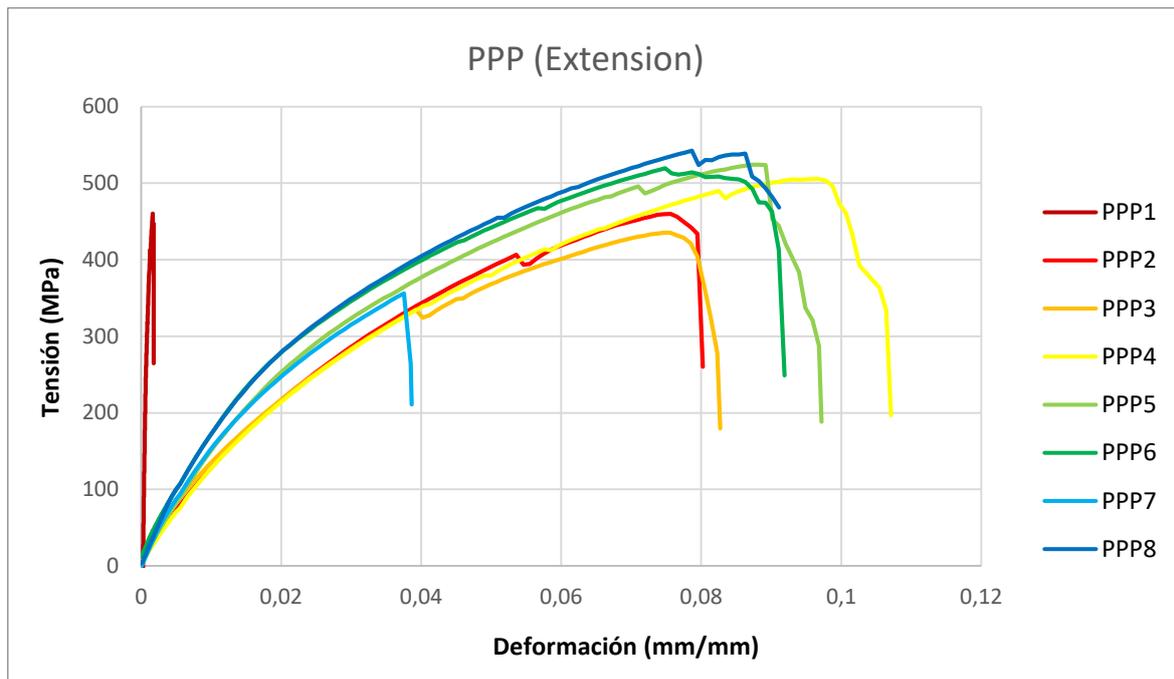


Gráfico 9: Relación tensión - deformación de las probetas pequeñas

Finalmente, el modelo chico de probetas resultará mejor que las expectativas. Aparte de las probetas n°1 y n°7 las curvas se observan similares. La primera probeta da esta curva por un tema de velocidad de ensayo demasiada alta. Se nota un ruido en las curvas que se explica por un tema de sensibilidad de la máquina usando una celda de carga de 5kN para una rotura sobre una carga cerca de 600N.

Hay que notar que no era posible usar el extensómetro Instron para los valores en la zona elástica, así que son los datos de extensión son los de la máquina de ensayo. En consecuencia, es difícil de analizar correctamente este parte del resultado.

Además, se observa una irregularidad recurrente que se puede explicar por un tema de pre-fisuración en un espesor tan pequeño. Las probetas chicas muestran en las observaciones a la lupa las mismas micro fisuras cerca de la zona de rotura.

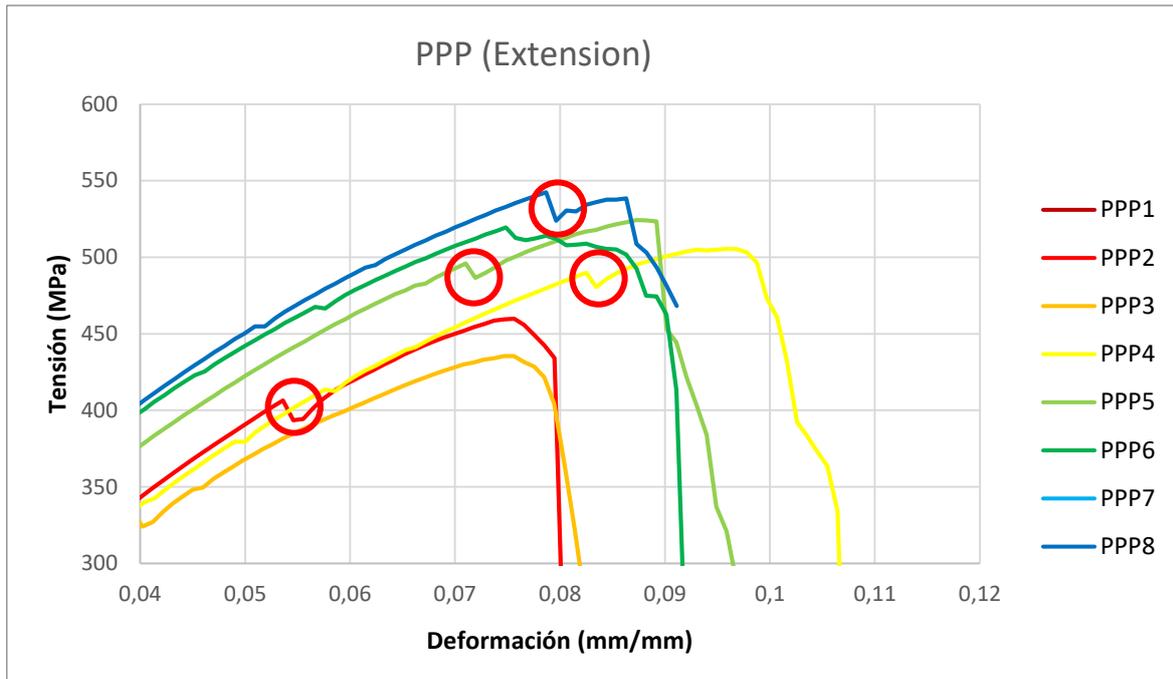


Gráfico 10: Zoom en la relación tensión - deformación de las probetas chicas

Otro factor que puede impactar es la desalineación de la probeta al principio, así que generaba una compresión al principio del ensayo. Lo compensamos con dos otras probetas para que las mordazas no toman esta forma de "V" y que queden bien paralelas entre ellas (hablamos de una pareja de mordazas inferior o superior).

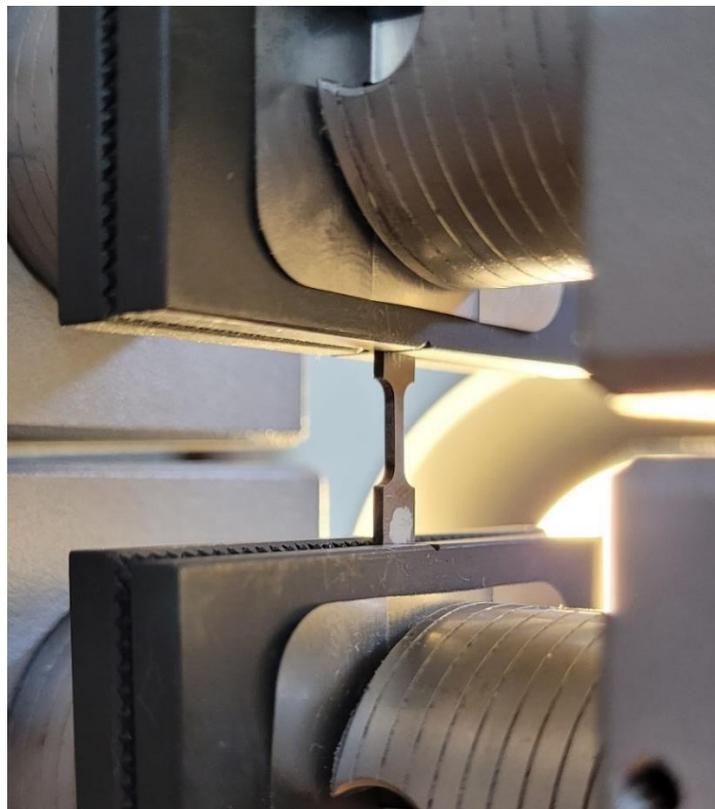


Figura 73: Foto de una probeta chica en la máquina de tracción

### 4.3 Impacto del tamaño en los resultados

Uno de los objetivos principales de este proyecto era analizar el impacto de los tamaños de las probetas en las características mecánicas de un material con el fin de estandarizar un tamaño más chico que tiene varios intereses en la industria actual.

Así, los resultados de los ensayos nos permiten comparar y analizar las diferencias en las 3 categorías de probetas. Más allá del punto de vista económico, disminuir el tamaño de las probetas podría tornarse muy práctico en beneficio de espacio o de transporte de este tipo de muestras.

#### 4.3.1 Rp0,2

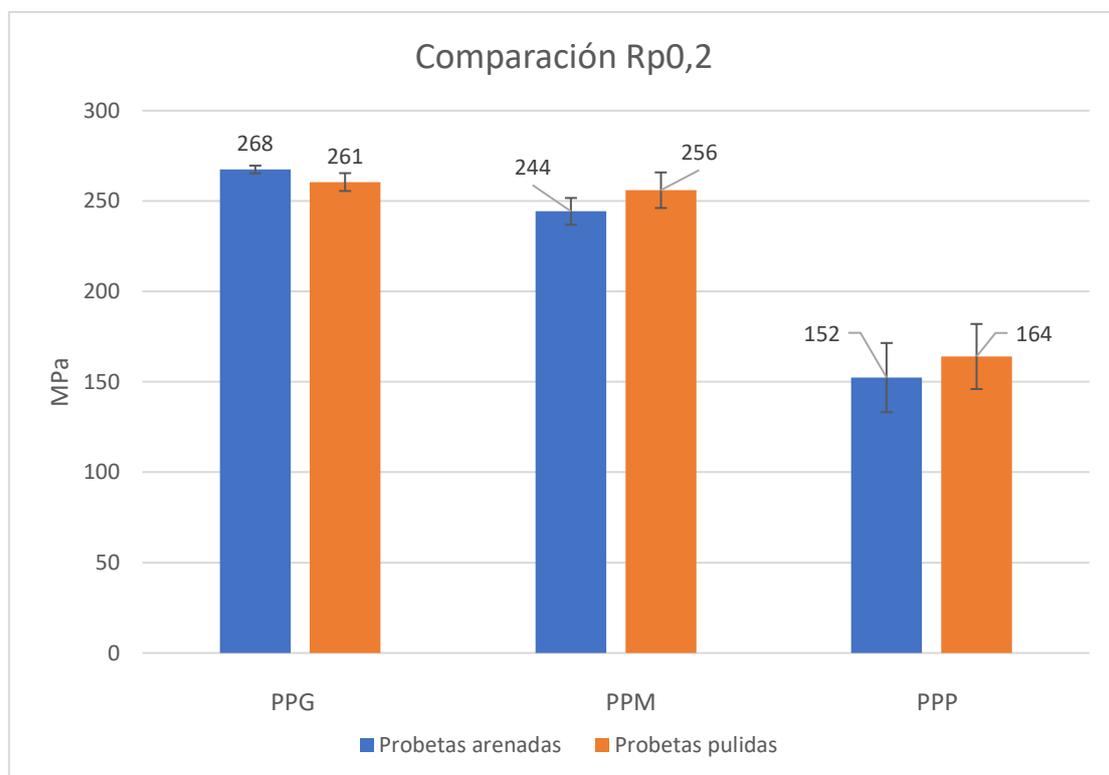


Gráfico 11: Comparación Rp0,2

En este gráfico 11 se compara cada valor de cada color, así que hay que analizar el gráfico solamente por tipo de tamaño a igual estado de superficie para que las probetas sean comparables.

Entre los tamaños grande y mediano se nota una tendencia casi igual y dan un resultado casi en el mismo rango de desviación estándar, lo que puede ser una buena cosa que la reducción de tamaño a este nivel no impacta la resistencia convencional.

Una diferencia mayor se ve con las probetas chicas que muestran un resultado cerca de 100 MPa más bajos, pero hay que tener en cuenta que no los resultados eran sacados de los datos

de extensión de la máquina de tracción, lo que no permite sacar un  $R_{p0,2}$  teóricamente. Así habría que hacer los ensayos con un extensómetro óptico para sacar los valores de resistencia convencional.

#### 4.3.2 $R_m$

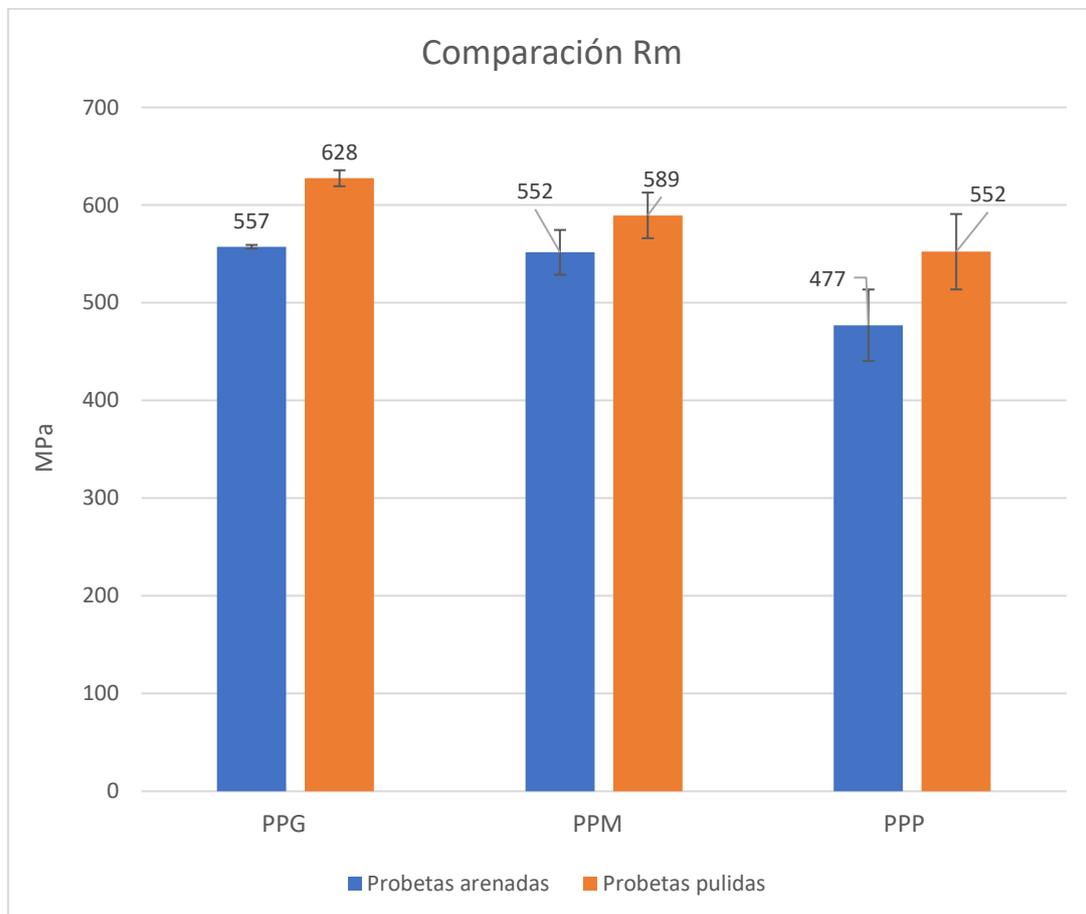


Gráfico 12: Comparación  $R_m$

Para la resistencia mecánica a la rotura se observa una gran regularidad, los tres tamaños presentan valores en casi el mismo rango de incertidumbre estática. Notamos una pequeña disminución de los valores que acompañan la reducción de tamaño, pero con más ensayos los resultados tendrían una tendencia a acercarse.

Además, importa mucho en el proceso de rotura el tamaño de grano del acero usado especialmente con el espesor que tiene el tamaño chico. El impacto de un grano tan grueso sobre la rotura de las probetas pequeñas es obviamente mayor y puede impactar mucho los resultados obtenidos. En conclusión, se podría confirmar una regularidad entre los resultados de  $R_m$ .

### 4.3.3 A%

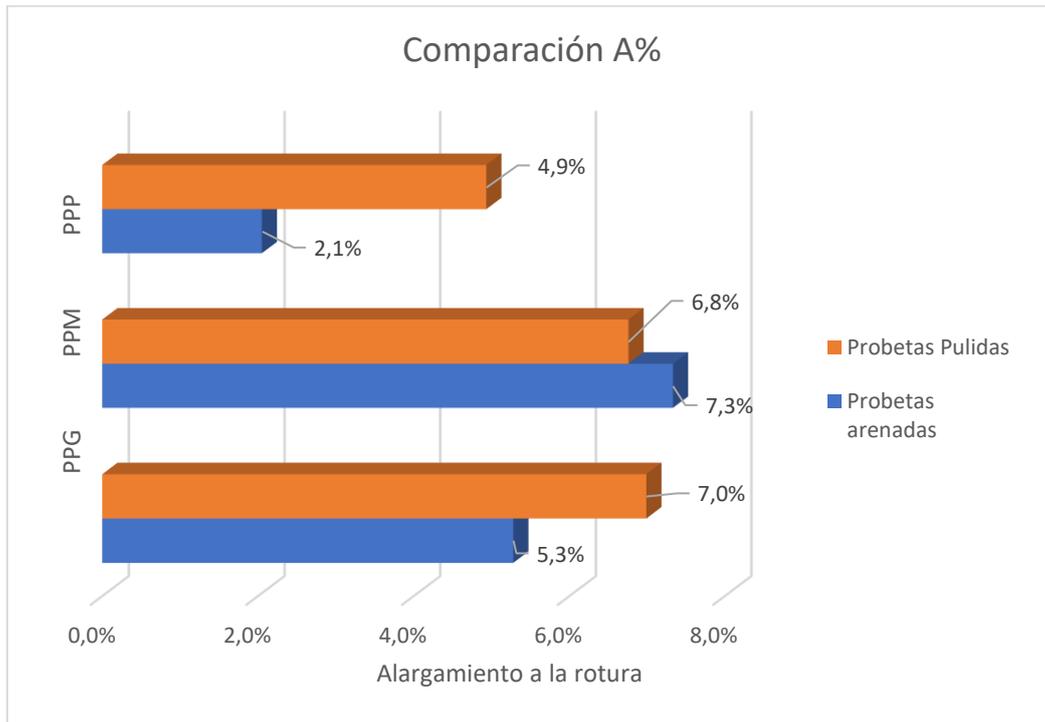


Gráfico 13: Comparación A%

Se observa mucho la dispersión de los resultados con el tipo de probeta arenada entre los distintos tamaños. Según el estudio de incertidumbre resulta una dispersión cerca de 4 puntos de porcentaje.

Además, la medición del alargamiento a la rotura del tamaño chico fue muy difícil y con poca precisión. Me parece poco sensible usar estos resultados que tienen un error grande, efecto de un método de medición poco desarrollado y preciso.

Además, se nota una diferencia muy pronunciada entre las medidas y las deducciones gráficas, así que es peligroso sacar conclusiones de este parte.

#### 4.3.4 Estricción Z

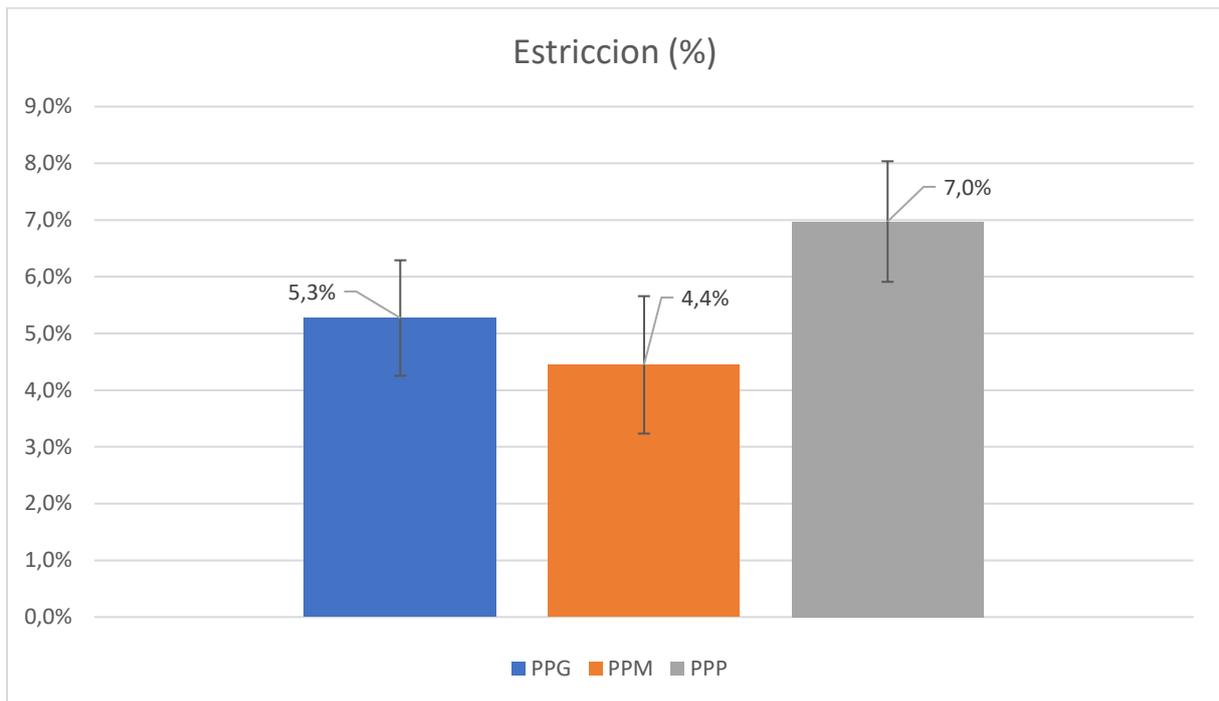


Gráfico 14: Resultados de estricción

Al nivel de la estricción podemos notar una similitud en los tres tamaños de probetas cerca del valor de 5% de reducción de área entre el inicio y el final. Los resultados experimentales son apoyados por una verificación del coeficiente de Poisson para un metal que es alrededor de 0,3.

Además, el valor de 7% de estricción de las pequeñas probetas puede ser muy afectado por el método de medición del operador (ver método en 3.5.3).

#### 4.4 Impacto de la superficie en los resultados

El otro objetivo principal era de ver si la superficie de una probeta impactaría los resultados mecánicos obtenidos. Así, el estudio incluye los ensayos de probetas con estados de superficie diferentes, como una superficie arenada o pulida. Este parte del estudio permitiría mejorar o adaptar los métodos de ensayos de tracción estándar futuros. De esta manera se compara los resultados para un mismo tamaño, pero con una superficie diferente.

#### 4.4.1 Rp0,2

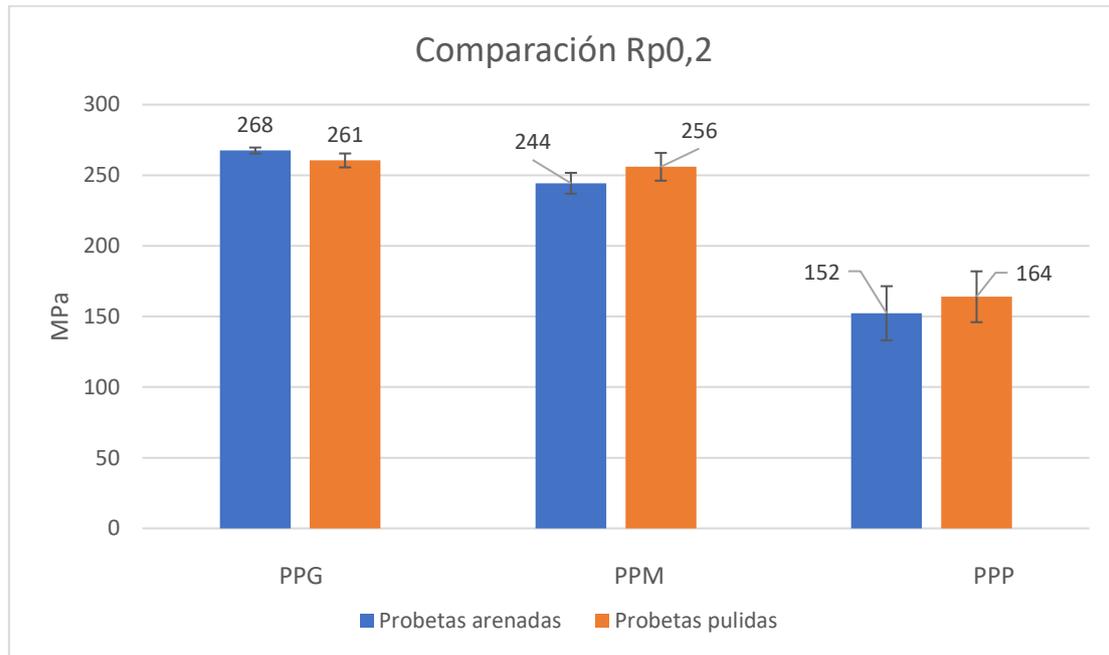


Gráfico 15: Comparación Rp0,2

Para el límite convencional a 0,2 se nota una gran similitud entre los resultados sin mostrar una tendencia clara dependiendo del estado de superficie. Se puede pensar que esta dispersión podría bajar con el número de ensayos realizados. Así, la tendencia sería que la superficie no impacta en los valores de Rp0,2.

#### 4.4.2 Rm

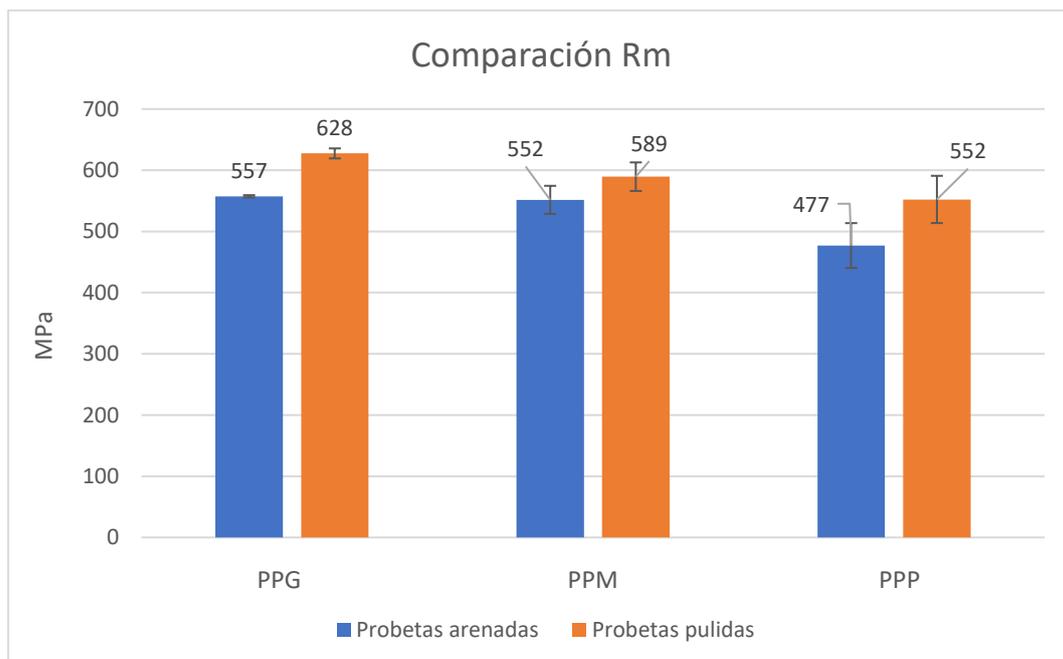


Gráfico 16: Comparación Rm

Del lado de la resistencia mecánica a la rotura se observa una tendencia muy clara entre los tipos de estados de superficie. Las probetas arenadas parecen romper sobre una carga máxima más baja que las probetas rectificadas. Habría que hacer más ensayo de los dos tipos para sacar una conclusión definitiva, pero se marca la tendencia.

Puede ser explicado en parte por la mecánica de fractura, donde intervienen las imperfecciones en la estructura de un material que son más numerosas en superficie con un estado arenado que rectificado.

#### 4.4.3 A%

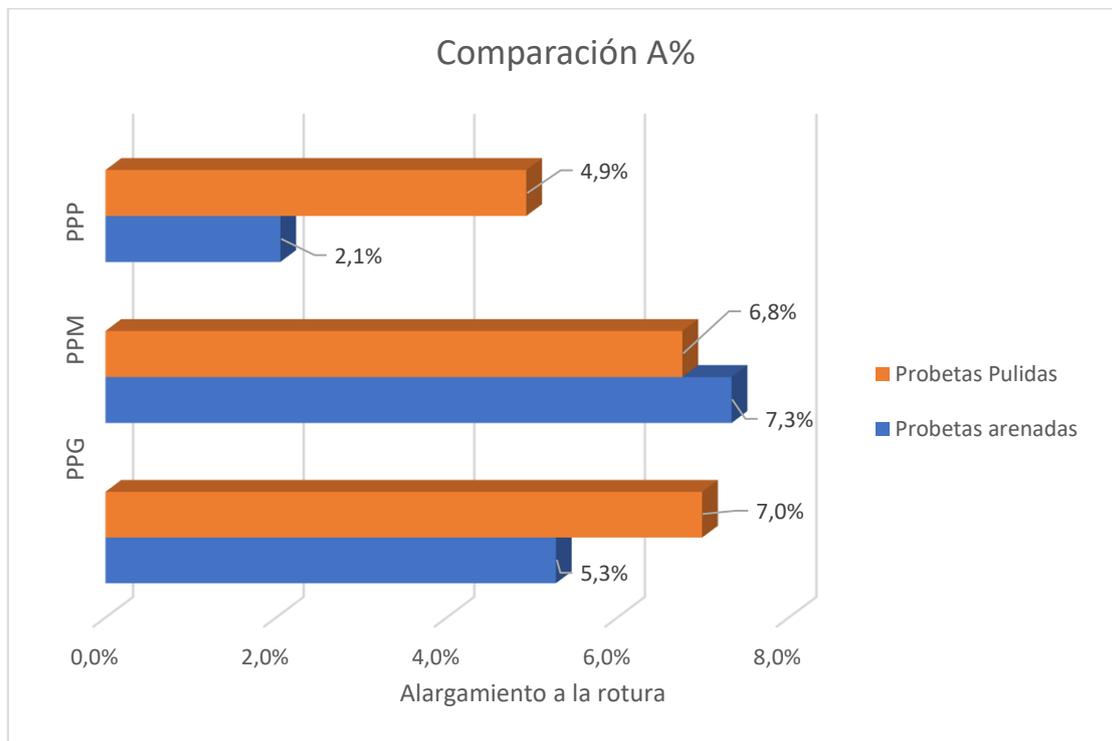


Gráfico 17: Comparación A%

Parecido a la conclusión previa en la parte anterior, es difícil sacar conclusiones del análisis por superficie sobre el alargamiento a la rotura que como se ve en el gráfico no muestra una tendencia especial.

## 5 Conclusión

Recordamos los objetivos principales del proyecto:

- Afianzar conceptos de ensayos mecánicos/propiedades de los aceros
- Aprender a utilizar equipo de corte por hilo de la institución para realización de probetas de tracción
- Puesta a punto y realización de probetas de tracción con corte por hilo
- Puesta a punto y realización de ensayos mecánicos
- Evaluar resultados y verificar capacidad de ensayos con simetrías distintas

Primero, el estudio permitió sacar un método de obtención de un tamaño de probeta no estándar con el uso de la tecnología de corte por hilo. Obviamente, el proceso sigue en desarrollo para mejorar la eficiencia y el rendimiento de la máquina. Ya están establecidas las grandes líneas del proyecto que consisten en sacar bloques de metal para después obtener un bloque con la geometría de la probeta requerida y al final cortarlo con el fin de obtener las dimensiones buscadas.

Después obtuvimos ensayos de tracción prometedores relacionados con los tamaños mediano y chico de probetas que resultaron, hasta cierto punto, similares a geometría similar. Hay que notar que las desviaciones en los datos experimentales pueden ser el resultado de varios factores como la dispersión de incertidumbres en las medidas, la acción del operador durante los ensayos o la estructura interna del acero utilizado durante el proyecto. Por otro lado, se pueden obtener tendencias del estudio relacionadas con la resistencia mecánica a la fractura, que parece no depender del tamaño, pero si depende del estado de superficie de las probetas. Al contrario, el límite elástico ingenieril ( $Rp_{0,2}$ ) dependerá del tamaño, pero no del estado de la superficie. En cualquier caso, este estudio es el principio de un trabajo mucho más grande y necesita un número consecuente de ensayos más para que las tendencias se confirmen.

En consecuencia, el objetivo final sería de estandarizar un tamaño chico de probetas de tracción simple para varios usos definidos que tienen una importancia mayor en la industria actual. Este objetivo se acompaña del estudio de varios problemas identificados en este estudio, como un aumento del número de ensayos para cada tamaño y tipo de superficie de probeta. Habría que enfocarse también más en profundidad sobre el método utilizado para ensayar las probetas chicas (cambio de método, cambio de instrumentos, uso de un extensómetro óptico, etc.) lo que impactaría obviamente en los resultados y la dispersión que tienen.

Además, se puede seguir desarrollando todo el tema de las probetas de geometría cilíndrica que abandonamos en este proyecto por un tema de tiempo.

## 6 Agradecimientos

Me gustaría dar las gracias a Aníbal RODRÍGUEZ por su asistencia y su implicación durante todo el proyecto y que me permitió realizar las numerosas tareas científicas en el laboratorio.

Gracias a Enrique CHOMIK por ser mi tutor en este proyecto y por su colaboración en la CNEA, institución que inició el tema de investigación que dio origen a este proyecto.

Gracias a Joaquín INFANTINO por toda su ayuda en el área “Materiales” del taller sobre el uso de varias máquinas.

Gracias a Luciano SANTOS por su ayuda en los procesos de corte por hilo y sus conocimientos en esta máquina.

Gracias a Víctor LIZZA y Ezequiel FLORES, los responsables del taller mecánico del ITBA por la parte de mecanización del proyecto, así como todas las pequeñas acciones necesarias para el desarrollo de la investigación.

Gracias al ITBA por guiarme en este proyecto y que me permitió pasar este año de intercambio estudiantil en Argentina.

Proyecto desarrollado por Maxime PIN.  
Alumno de intercambio en el ITBA durante el año escolar 2022-2023.

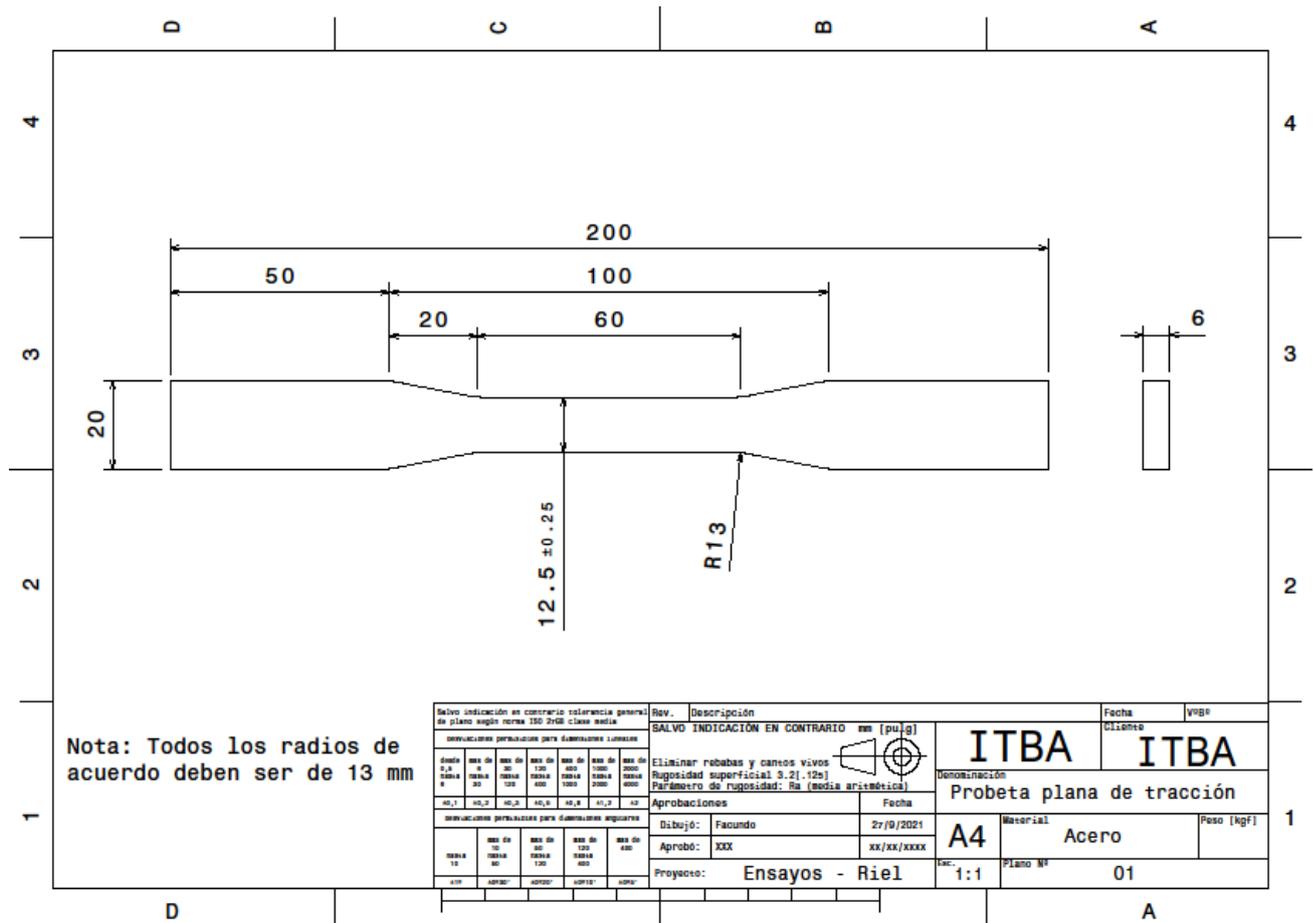
## 7 Anexos

### 7.1 Anexo 1: Símbolos y designaciones de la norma IRAM/IAS U 500-102:2016 [4]

Símbolo	Unidad	Designación
<b>Probeta</b>		
$a_0, T^{(1)}$	mm	Espesor inicial de una probeta plana o espesor de pared de un tubo
$b_0$	mm	Ancho inicial de la longitud calibrada de una probeta plana o ancho medio de tiras longitudinales tomadas de un tubo o entrecara de barras no circulares
$d_0$	mm	Diámetro inicial de la longitud calibrada de una probeta circular o del diámetro de un alambre circular o diámetro interior de un tubo
$D_0$	mm	Diámetro exterior inicial de un tubo
$L_0$	mm	Longitud de referencia inicial
$L'_0$	mm	Longitud de referencia inicial para determinar $A_{5m}$ (ver anexo F)
$L_c$	mm	Longitud calibrada
$L_e$	mm	Longitud de referencia inicial del extensómetro
$L_t$	mm	Longitud total de la probeta
$L_u$	mm	Longitud de referencia final
$L'_u$	mm	Longitud de referencia final para determinar $A_{5m}$ (ver anexo F)
$S_0$	mm <sup>2</sup>	Área de la sección transversal inicial de la zona calibrada
$S_u$	mm <sup>2</sup>	Área mínima de la sección transversal después de la rotura
$k$	-	Coefficiente de proporcionalidad (ver 6.1.1)
$Z$	%	Estricción
<b>Alargamiento</b>		
$A$	%	Alargamiento porcentual de rotura
$A_{5m}$	%	Alargamiento plástico porcentual fuera de la zona de rotura (ver anexo F)
<b>Extensión</b>		
$L_r$	%	Extensión permanente porcentual
$A_e$	%	Extensión porcentual de fluencia
$A_g$	%	Extensión plástica porcentual bajo tensión máxima ( $R_m$ )
$A_{gr}$	%	Extensión total porcentual bajo tensión máxima ( $R_m$ )
$A_t$	%	Extensión total porcentual de rotura
$\Delta L_m$	mm	Extensión total bajo tensión máxima ( $R_m$ )
$\Delta L_f$	mm	Extensión en el momento inmediato de la rotura bajo tensión

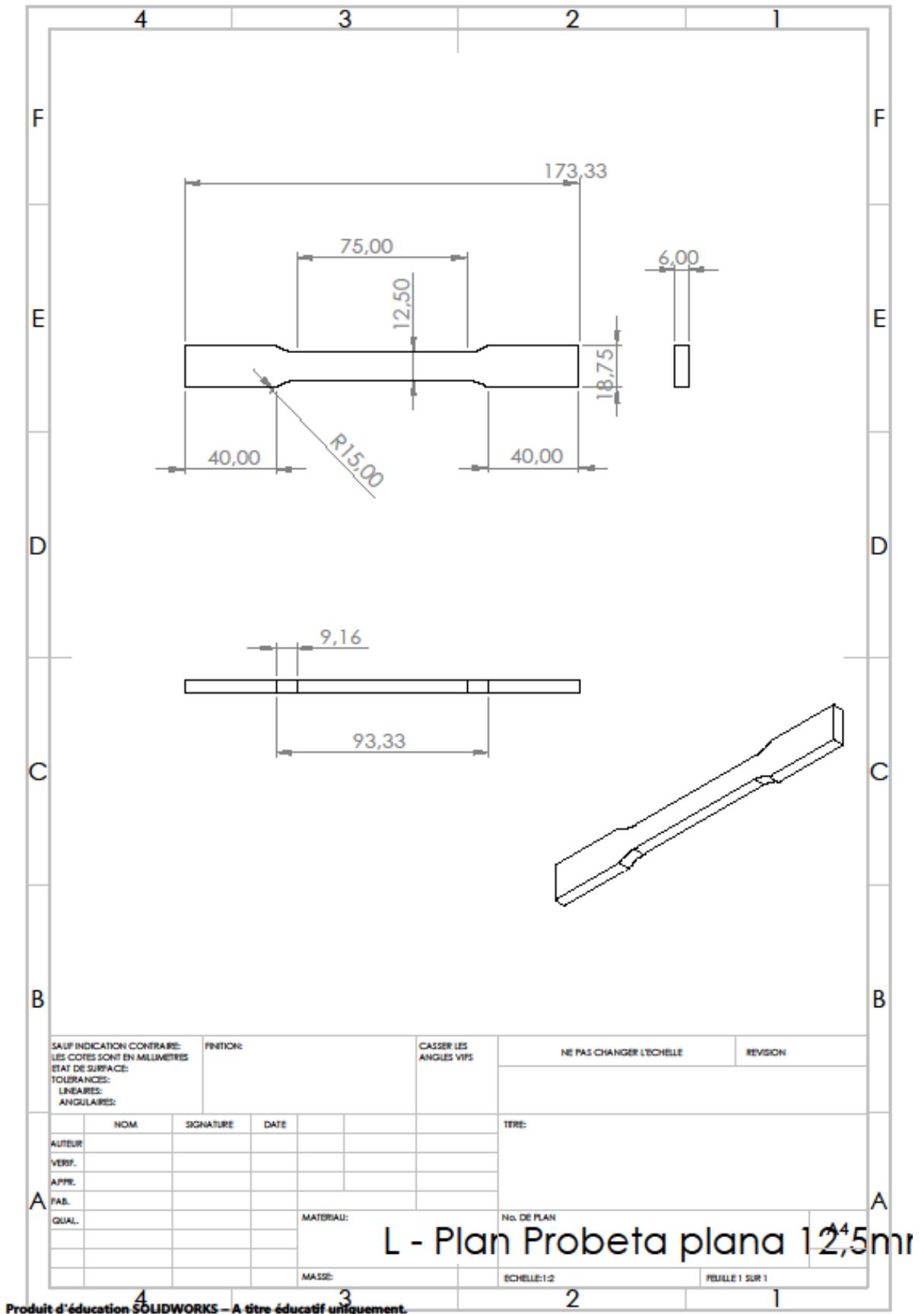
Símbolo	Unidad	Designación
<b>Velocidades de ensayo</b>		
$\dot{\epsilon}_{L_c}$	s <sup>-1</sup>	Velocidad de deformación
$\dot{\epsilon}_{L_c}$	s <sup>-1</sup>	Velocidad de deformación de la longitud calibrada
$\dot{R}$	MPa s <sup>-1</sup>	Velocidad de incremento de tensión
$v_c$	mm s <sup>-1</sup>	Velocidad de separación de las mordazas
<b>Fuerza</b>		
$F_m$	N	Fuerza máxima
Límite de fluencia, límite elástico convencional, resistencia a la tracción		
$E$	MPa	Módulo de elasticidad
$m_r$	MPa	Pendiente de la curva tensión extensión porcentual en un momento dado del ensayo
$m_E$	MPa	Pendiente de la parte elástica de la curva tensión extensión porcentual <sup>(2)</sup>
$R$	MPa	Tensión
$R_{eH}$	MPa	Límite superior de fluencia
$R_{eL}$	MPa	Límite inferior de fluencia
$R_m$	MPa	Resistencia a la tracción
$R_p$	MPa	Límite elástico convencional
$R_r$	MPa	Límite de un alargamiento permanente preestablecido
$R_t$	MPa	Límite de alargamiento <sup>(3)</sup>
<p><sup>(1)</sup> Símbolo empleado en las normas de producto para tubos de acero.</p> <p><sup>(2)</sup> En la parte elástica de la curva tensión extensión porcentual, el valor de la pendiente puede no representar necesariamente el módulo de elasticidad. Este valor puede ser bastante similar al del módulo de elasticidad si se utilizan condiciones óptimas (extensómetros calibrados con alta resolución y a doble cara, alineación perfecta de la probeta, etc.).</p> <p><sup>(3)</sup> También es conocido como <i>EUL</i> [2].</p>		

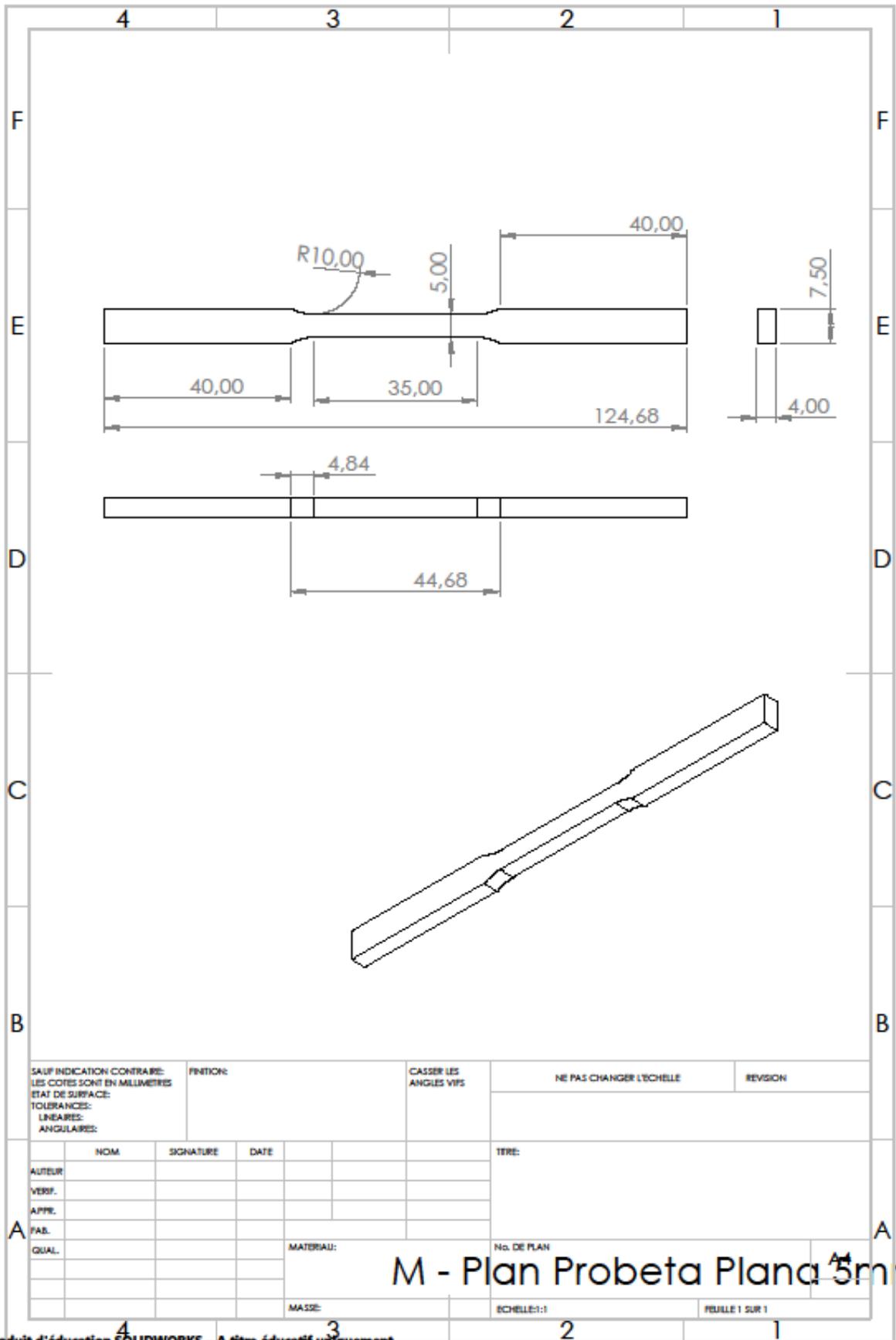
7.2 Anexo 2: Plano de una probeta plana de tracción estándar



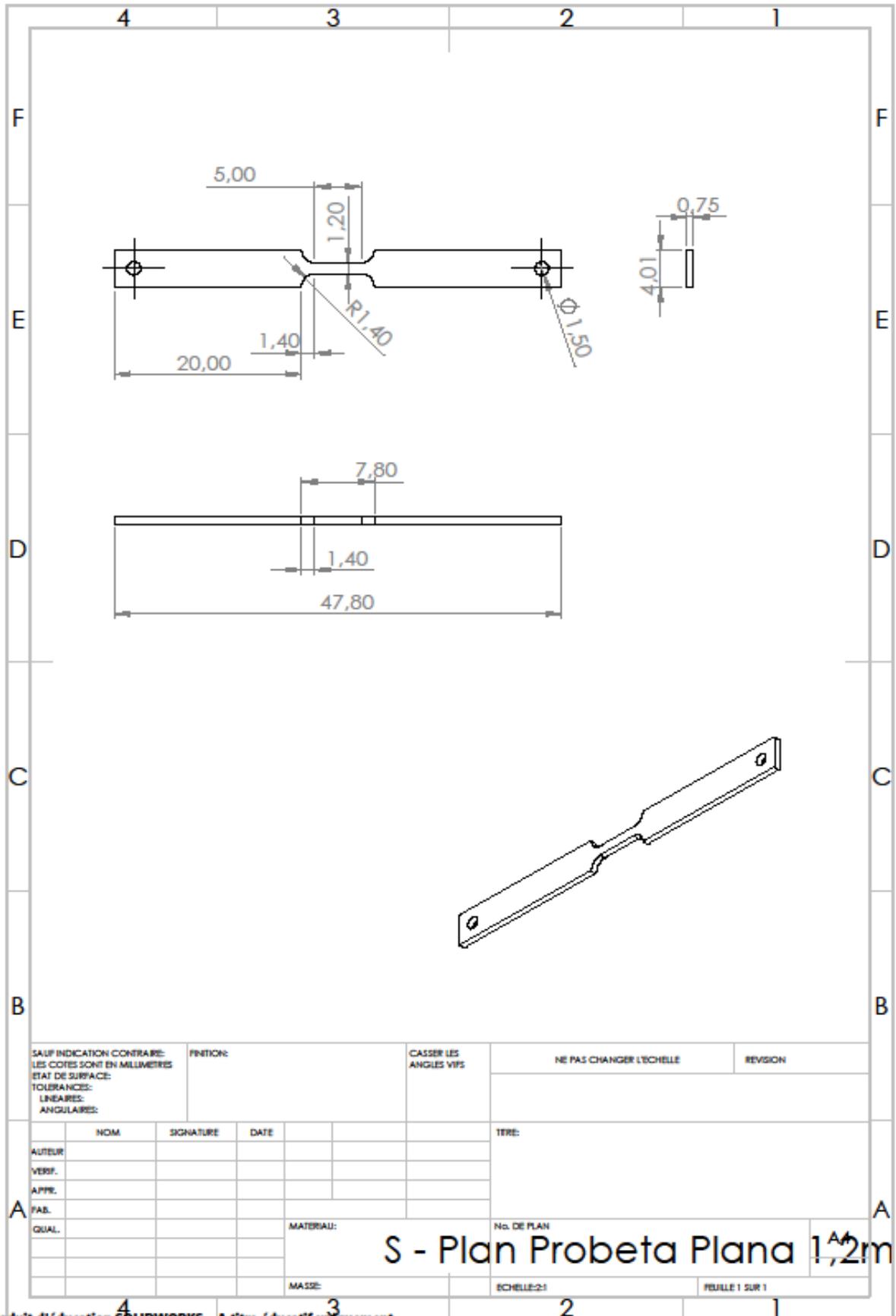
Salvo indicación en contrario tolerancia general de plano según norma ISO 2768 clase media		Rev.	Descripción		Fecha	VSBP
CONVENCIONES PERIFÉRICAS PARA DIMENSIONES LINEALES		SALVO INDICACIÓN EN CONTRARIO mm [pulg]		ITBA		ITBA
CONVENCIONES PERIFÉRICAS PARA DIMENSIONES ANGULARES		Eliminar rebabas y canchales vivos Rugosidad superficial: S.2[.125] Parámetro de rugosidad: Ra (media aritmética)		INFORMACIÓN		
		Aprobaciones		Fecha		
		Dibujó: Facundo		27/9/2021		
		Aprobó: XXX		XX/XX/XXXX		
		Proyecto: Ensayos - Riel		Escala: 1:1		Plano N° 01

7.3 Anexo 3: Planos de las probetas diseñadas para el proyecto

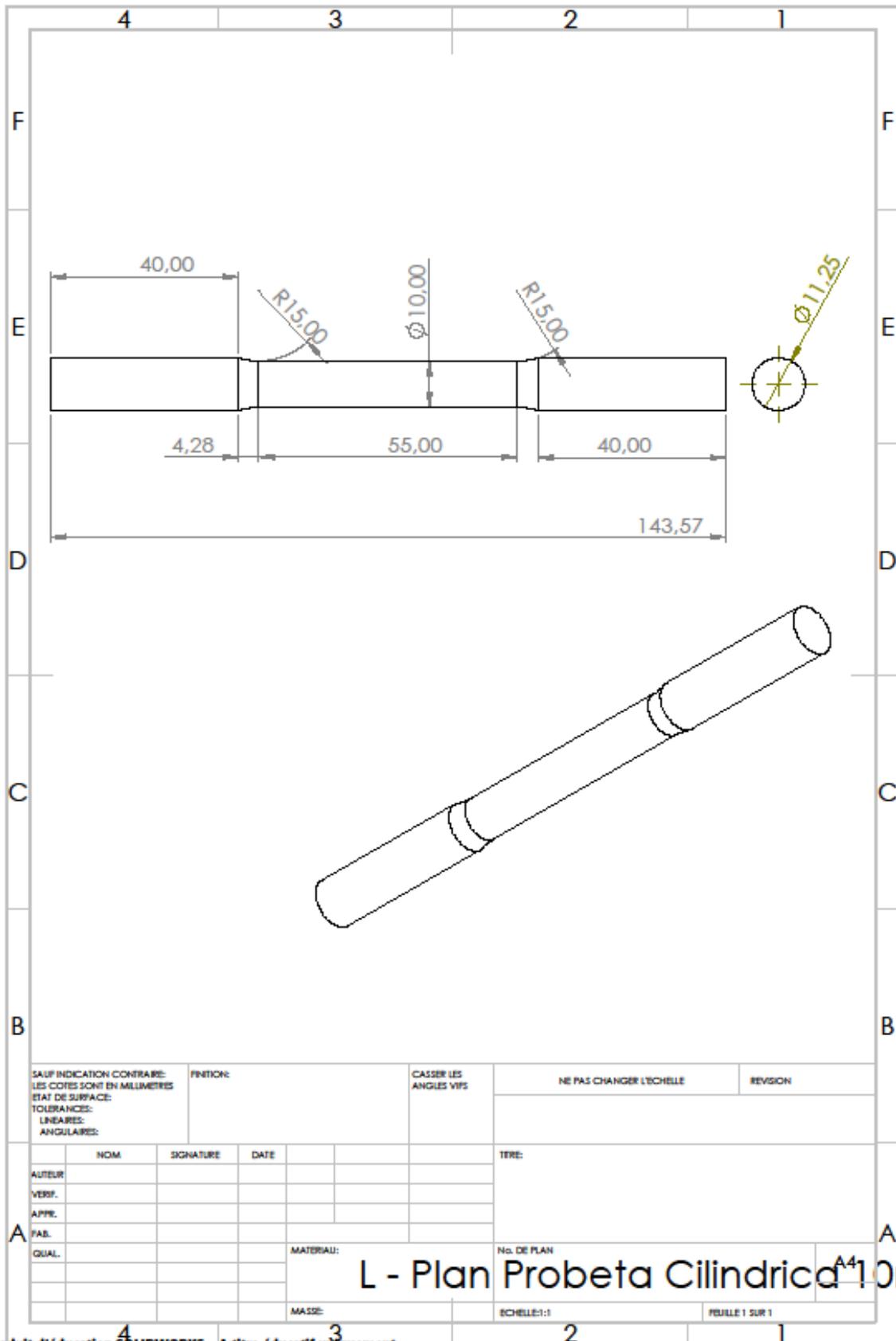




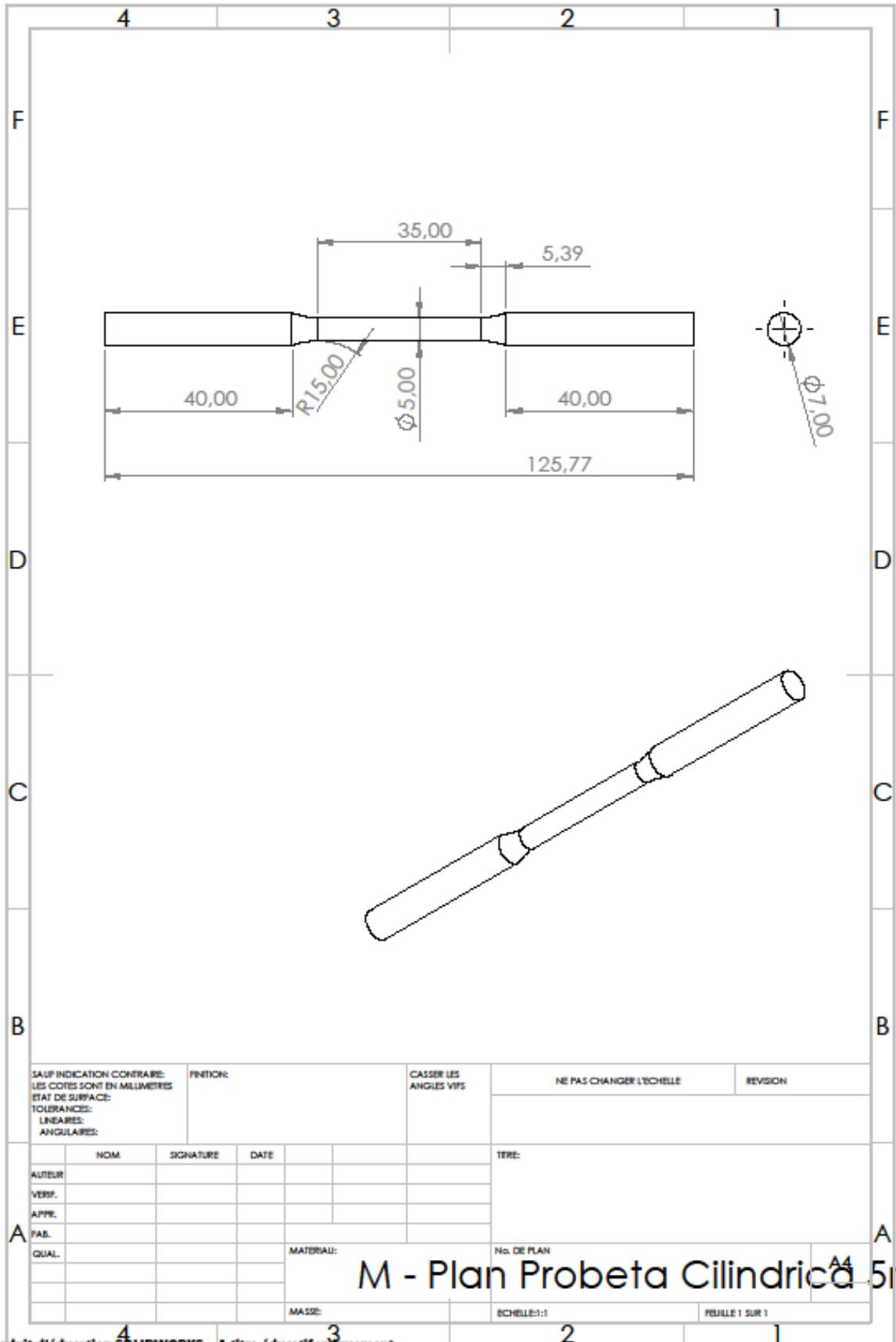
Produit d'éducation SOLIDWORKS - A titre éducatif uniquement.



Produit d'éducation **SOLIDWORKS** – A titre éducatif uniquement.

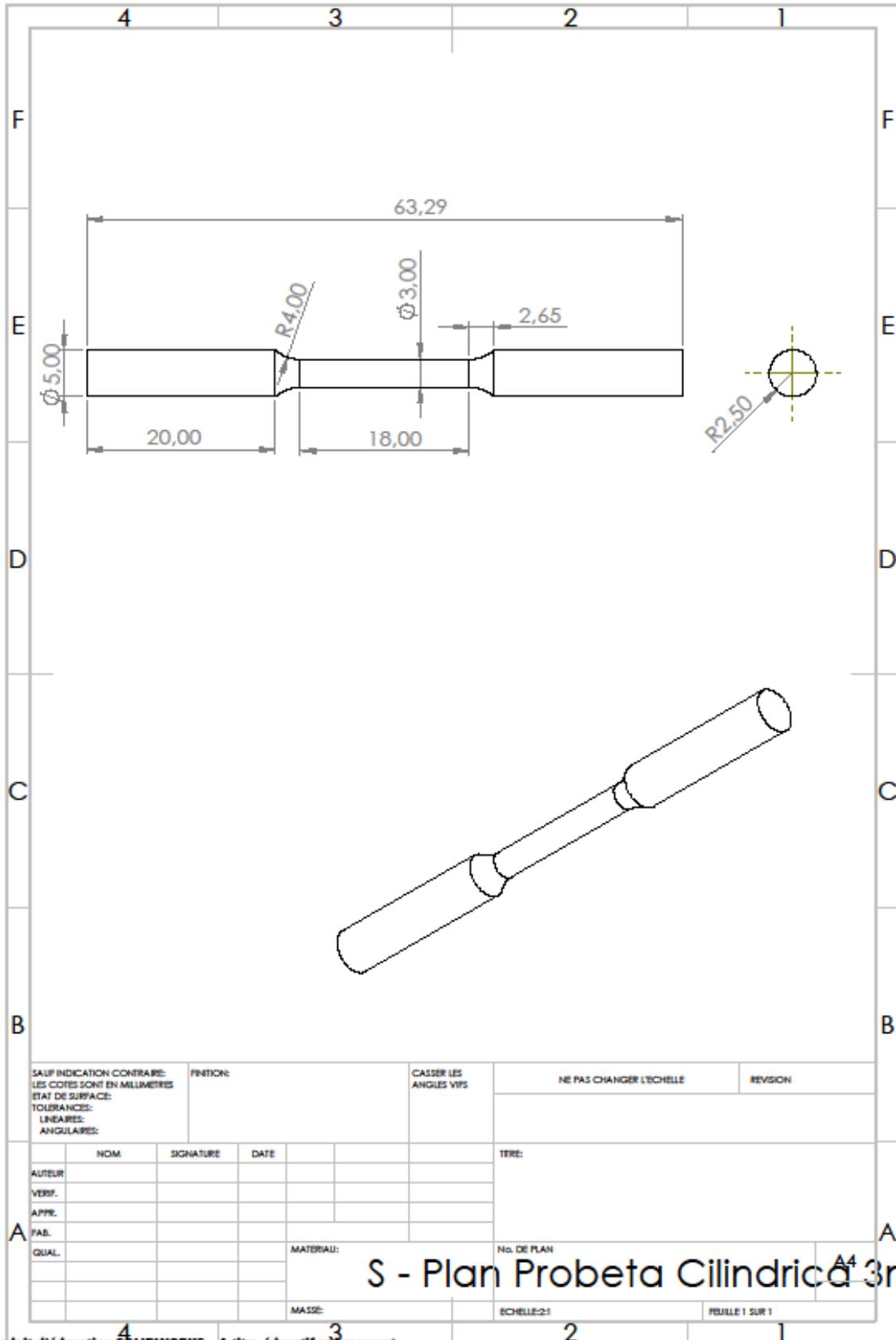


## L - Plan Probeta Cilindrica 10r



SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:		FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS		NE PAS CHANGER L'ECHELLE		REVISION	
AUTEUR		SIGNATURE		DATE		TITRE:			
VERIF.									
APPR.									
FAB.						No. DE PLAN			
QUAL.						M - Plan Probeta Cilindrica 5m			
				MATERIAU:		No. DE PLAN		A4	
				MASSE:		Echelle:1:1		FEUILLE 1 SUR 1	

Produit d'éducation SOLIDWORKS – A titre éducatif uniquement.

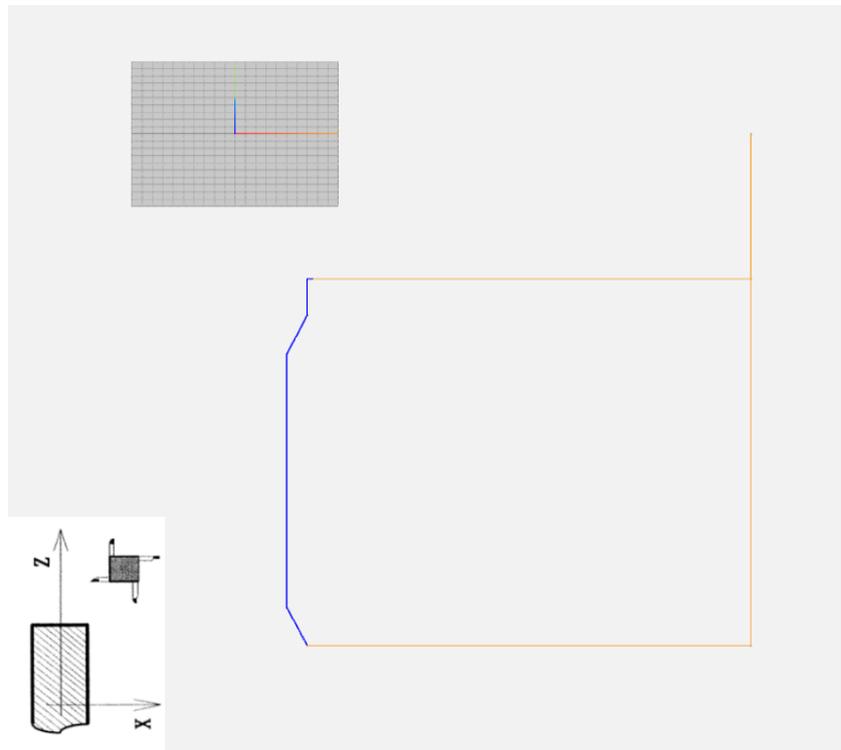


SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ETAT DE SURFACE: TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:		FINITION:		CASSER LES ANGLES VIFS		NE PAS CHANGER L'ECHELLE		REVISION	
AUTEUR		SIGNATURE		DATE		TITRE:			
VERIF.									
APPR.									
FAB.						No. DE PLAN			
QUAL.						MATERIAU:		A4	
						MASSE:		Echelle: 2:1	
								FEUILLE 1 SUR 1	

## S - Plan Probeta Cilindrica 3m

## 7.4 Anexo 4: Gcode para torneear las probetas cilíndricas medianas

```
%  
O00002 (Probeta materiales)  
(Medidas en diámetro)  
M06 T101 G54  
G00 X50.  
Z-20.  
M03 S1000  
G00 Z-20. X7.5  
M08  
G01 F0.2 X7  
Z-20.  
G71 P1 Q2 D0.5 U0.1 W0.1  
N1 G01 X7. Z-25.  
G02 R15. X5. Z-30.39  
G01 Z-65.39  
N2 G02 R15. X7. Z-70.68  
G70 P1 Q2 F0.05  
G00 X50.  
Z0.  
M30  
%
```



La figura es una simulación de la trayectoria CNC de corte en el torno en el sitio internet <https://ncviewer.com/>.

## 8 Bibliografía

### **Libros:**

- [1] Arias, A. G. (1999). Laboratorio de ensayos industriales. Buenos Aires: Ediciones Litenia.
- [2] Fleming B. (2005). The EDM How-To Book. United States of America. Fleming Publications
- [3] C. Jameson, E. (2001). Electrical Discharge Machining. United States of America. Society of Manufacturing Engineers.

### **Normas:**

- [4] Materiales metálicos - Ensayo de tracción (IRAM/IAS U 500-102). (2016).
- [5] Metallic materials — Tensile testing — (ISO 6892-1). (2009).
- [6] Standard test methods for tension testing of metallic materials (ASTM E8/E8M – 16a). (2020).

### **Páginas internet:**

- [7] Ngoc Chan, C. D. (n.d.). <http://deuns.chez.com/sciences/cristallo/cristallo4.html>
- [8] *Information - QCM SVT*. (n.d.). Information - QCM SVT. <https://www.qcm-svt.fr/QCM/public-affichage.php?niveau=1ere-Ens-Sc&id=1008>
- [9] *Traction conventionnelle plastique avec décrochement.svg* — Wikipédia. (2009, June 3). Traction Conventionnelle Plastique Avec décrochement.svg — Wikipédia. [https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Fichier:Courbe\\_traction\\_conventionnelle\\_plastique\\_avec\\_decrochement.svg](https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Fichier:Courbe_traction_conventionnelle_plastique_avec_decrochement.svg)
- [10] *Límite elástico* - Wikipedia, la enciclopedia libre. (n.d.). Límite Elástico - Wikipedia, La Enciclopedia Libre. [https://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%ADmite\\_el%C3%A1stico](https://es.wikipedia.org/wiki/L%C3%ADmite_el%C3%A1stico)
- [11] *Tipos de Mecanizado por Electroerosión*. (2013, December 3). De Máquinas Y Herramientas. <https://www.demaquinasyherramientas.com/mecanizado/tipos-de-mecanizado-por-electroerosion>
- [12] UCO, C. E. (2016, January 11). *Esquema-Reactor-Nuclear - Catedra Enresa-UCO*. Catedra Enresa-UCO. <https://www.catedraenresauco.com/wp-content/uploads/2016/01/Esquema-Reactor-Nuclear.jpg>
- [13] *Acero 4140 | Composición química | Metalium*. (n.d.). Acero 4140 | Composición Química | Metalium. <https://metalium.mx/acero-4140#:~:text=El%20acero%20tiene%20un%20m%C3%B3dulo,por%20metro%20c%C3%BAbico%207.810%20kilogramos.>
- [14] Hita, J. M. (n.d.). *GoConqr - Rugosidad superficial*. GoConqr. <https://www.goconqr.com/diapositiva/15857895/rugosidad-superficial>

### **Videos:**

- [15] Practical Machinist. (2021, June 25). *Introduction to Electrical Discharge Machining / Learn to Burn* [Video]. Youtube. Retrieved April 23, 2023, from [https://www.youtube.com/watch?v=j1wM6i-goEg&ab\\_channel=PracticalMachinist](https://www.youtube.com/watch?v=j1wM6i-goEg&ab_channel=PracticalMachinist)

[16] Practical Machinist. (2021, July 16). *Fast Hole and Wire EDM / Learn to Burn* [Video]. Youtube. Retrieved June 23, 2023, from [https://www.youtube.com/watch?v=ZKVbWv0M1Z4&ab\\_channel=PracticalMachinist](https://www.youtube.com/watch?v=ZKVbWv0M1Z4&ab_channel=PracticalMachinist)