



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Grado

Estudio del coeficiente de rozamiento en el radio  
de la matriz durante el proceso de embutición de  
chapa prepintada

Autor/es

Héctor Marín Olivares

Director/es

Emilio Julián Royo Vázquez

Escuela de Ingeniería y Arquitectura  
2015



## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D<sup>a</sup>. HÉCTOR MARÍN OLIVARES,

con nº de DNI 16630862-E en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)  
GRADO, (Título del Trabajo)

ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE ROZAMIENTO EN EL RADIO DE LA MATRIZ  
DURANTE EL PROCESO DE EMBUTICIÓN DE CHAPA PREPINTADA

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 25 SEPTIEMBRE 2015

Fdo: HÉCTOR MARÍN OLIVARES



---

# ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE ROZAMIENTO EN EL RADIO DE LA MATRIZ DURANTE EL PROCESO DE EMBUTICIÓN DE CHAPA PREPINTADA

## RESUMEN

El presente trabajo surge de la necesidad de saber cómo varía el coeficiente de rozamiento conforme aumenta la presión de contacto chapa-matriz en el radio de las matrices en el proceso de embutición profunda. Se quiere estudiar esta variación para ver si se ajusta a la caracterización que hacen de ella algunos paquetes de elementos finitos de conformado de chapa. Para ello se ha diseñado un utillaje con SolidEdge ST7 que al amarrarlo a la máquina INSTRON universal de ensayos, y esta trabaje a tracción, nos permita simular un proceso de embutición en la zona de contacto chapa-matriz. Una vez que se realizan los ensayos se pasa al tratamiento de datos capturados por la máquina y se realizan los cálculos precisos para hallar los coeficientes de rozamiento y las presiones de contacto chapa-matriz en el radio del utillaje, que en este ensayo simula el radio de la matriz. El objetivo final es presentar una serie de gráficas que muestren la evolución de este coeficiente de rozamiento a medida que se va aumentando la presión de contacto chapa-matriz, para chapa prepintada y chapa fosfatada, en diferentes condiciones de presión de pisado, material de mordazas de pisado y velocidad de máquina.

---

## ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	4
Objetivo y alcance.....	4
Trabajos previos.....	5
Abordaje del problema .....	7
Secciones del trabajo.....	9
<b>1) INTRODUCCIÓN TEÓRICA DE LAS FÓRMULAS UTILIZADAS EN EL CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES DE ROZAMIENTO Y DE LAS PRESIONES DE CONTACTO</b> .....	10
1.1) Coeficiente de rozamiento en el radio de curvatura.....	10
1.2) Presión de contacto que ejerce la chapa sobre el radio de la matriz.....	15
<b>2) DISEÑO DEL UTILLAJE</b> .....	19
<b>3) ENSAYOS</b> .....	23
3.1) Tipos de ensayos en cuanto a configuración de utillaje.....	24
3.2) Tipos de ensayos en cuanto a material de las mordazas de pisado.....	26
3.3) Tipos de ensayos en cuanto a presión de pisado del cilindro.....	26
3.4) Tipos de ensayo en cuanto a velocidad de la máquina .....	27
3.5) Tipos de ensayo en cuanto a caras de la chapa.....	27
3.6) Metodología de ensayos.....	27
3.6.1) Ensayos con configuración plana de utillaje .....	27
3.6.2) Ensayos con configuración Rd de utillaje .....	29
3.6.2.1) Problemas en la realización de ensayos con utillaje Rd.....	31
<b>4) ANÁLISIS DE RESULTADOS</b> .....	33
4.1) Tratamiento de datos .....	33
4.2) Gráficas finales .....	41
4.2.1) Gráfica final para chapa prepintada.....	41
4.2.2) Gráfica final para chapa fosfatada.....	42
4.2.3) Gráfica final para mordazas AMPCO 25.....	42
4.2.4) Gráfica final para mordazas F521.....	43
4.3) Análisis del diseño de experimentos con Minitab.....	43
4.3.1) Análisis del DOE para chapa prepintada .....	44
4.3.1.1) Gráficas de efectos para coeficiente de rozamiento.....	44

---

4.3.1.2) Gráfica de efectos para radio de plegado de la chapa .....	46
4.3.1.3) Gráfica de efectos para presión de contacto chapa-matriz .....	47
4.3.2) Análisis del DOE para chapa fosfatada .....	49
4.3.2.1) Gráfica de efectos para coeficiente de rozamiento .....	49
4.3.2.2) Gráfica de efectos para radio de plegado de la chapa .....	51
4.3.2.3) Gráfica de efectos para presión de contacto chapa-matriz .....	52
<b>5) CONCLUSIONES</b> .....	<b>54</b>
<b>6) BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>56</b>
<b>7) ANEXO I.</b> Pruebas y cálculos para determinar el diámetro del rodillo necesario en el utillaje.....	<b>59</b>
<b>8) ANEXO II.</b> Etapas en el diseño del utillaje.....	<b>63</b>
<b>9) ANEXO III.</b> Planos del utillaje.....	<b>74</b>
<b>10) ANEXO IV.</b> Tablas, gráficas y resultados de los ensayos.....	<b>80</b>
<b>11) ANEXO V.</b> Materiales.....	<b>114</b>

## INTRODUCCIÓN

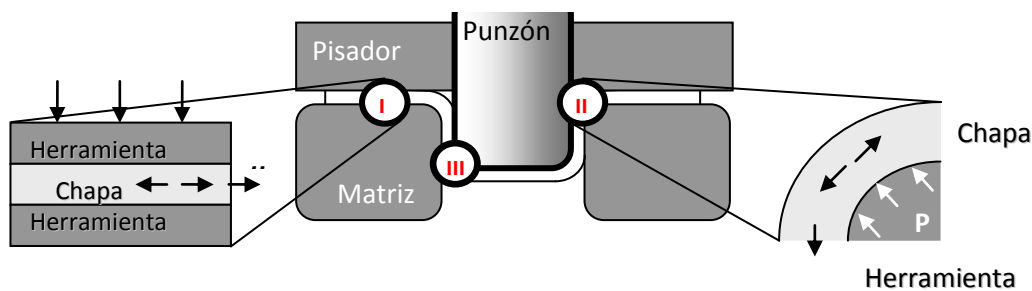
### Objetivo y alcance

El problema al que nos enfrentamos es el desconocimiento de los coeficientes de rozamiento en el radio de las matrices en el proceso de embutición profunda, tanto su valor numérico como su evolución con la presión de contacto de la chapa sobre la matriz.

En el proceso de embutición profunda hay 3 zonas diferenciadas, que son:

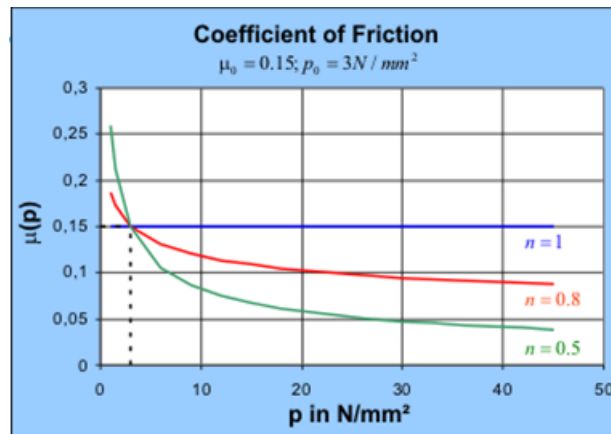
- 1) Zona de pisado
- 2) Zona del radio de la matriz
- 3) Zona del radio del punzón

A continuación se adjunta una figura explicativa:



**Figura 1.** Esquema que muestra las tres zonas significativas del proceso de embutición. Esta imagen se ha tomado de la tesis doctoral de Juan Carlos Cisneros Ortega, "Predicción y control de la variabilidad en los procesos de embutición profunda de chapa de acero inoxidable austenítico"

El estudio que se ha realizado trata de ver la variación del coeficiente de rozamiento respecto a la presión de contacto en la **zona II** (zona correspondiente al radio de la matriz de conformado) para chapa prepintada y chapa fosfatada. Algunos paquetes de elementos finitos caracterizan este coeficiente de rozamiento como constante, en cambio otros, como Autoform, permiten disponer la dependencia del coeficiente de fricción respecto a la presión de contacto según curvas exponenciales.



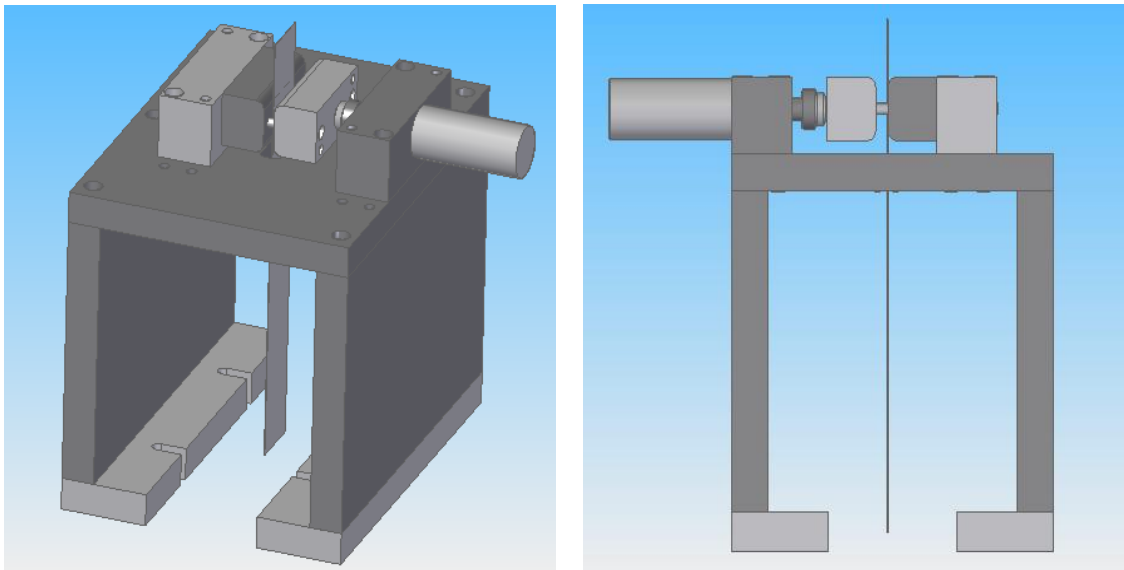
**Figura 2.** Gráficas que muestran la variación del coeficiente de rozamiento frente a la presión de contacto en Autoform para 3 valores distintos de coeficiente de endurecimiento. Apréciase que la curva es constante para coeficiente de endurecimiento igual a 1.

En los procesos de embutición profunda se llega a presiones de hasta los 100 MPa en el radio de las matrices, por lo que se ha intentado llegar a valores de presión de contacto cercanos a esa cifra. Finalmente, debido a que el radio que necesitábamos (partiendo de las condiciones impuestas de máquina y chapa) para llegar a esas condiciones de presión era demasiado pequeño (0,8 mm), las probetas de acero DC06 no se adaptaban a plegarse con ese radio, sino que se plegaban con radios mayores. Así, se ha llegado a unas presiones máximas de 28 MPa, un valor muy lejano del que se pretendía llegar inicialmente.

### Trabajos previos

En el año 2007, desde el Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación del Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación se llevó a cabo un estudio que da pie a este trabajo. Se trataba de ver la variación del coeficiente de rozamiento conforme aumenta la presión de pisado en la zona I de la figura 1. Es decir, se estudiaron los diferentes coeficientes de rozamiento para la zona I en diferentes condiciones de fuerzas de pisado, lubricación, velocidad de máquina y material del pisador (mordazas en el ensayo). Para este ensayo se diseñó y mecanizó un utillaje de aluminio para colocar en la máquina universal de ensayos INSTRON, de forma que simulara este proceso al hacer que la máquina trabajara a tracción.

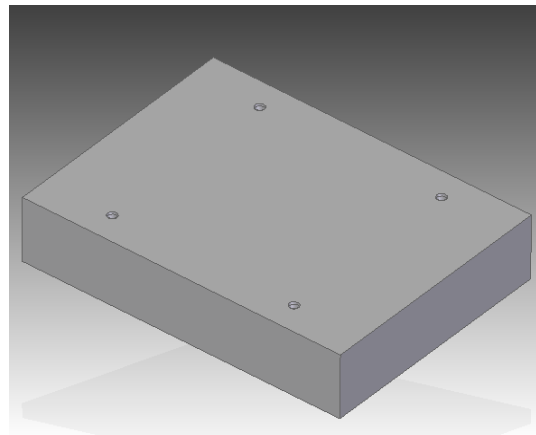
A continuación se adjunta una figura donde se muestra el utillaje que se diseñó en aquella ocasión:



**Figuras 3 y 4.** Vistas en SolidEdge, general y alzado respectivamente, del utillaje que se utilizó en los ensayos previos para la zona plana de la chapa

A partir de este estudio, se me propuso la realización del presente trabajo. Se trataba de algo similar. Era necesario el diseño y mecanizado de otro utillaje que simulara el proceso de embutición en la **zona II** al colocarlo en la máquina INSTRON cuando ésta trabaja a tracción. Se disponía ya del sistema de pisado mediante mordazas, que incluye mordazas (con sus tornillos guía, para que el apriete sea perfectamente perpendicular a la chapa), soporte para éstas, cilindro de aceite de 29 mm de diámetro, y bomba impulsora de aceite. Además, se disponía de chapa de acero DC06 con una cara prepintada y la otra fosfatada, cuyas propiedades y características detallan en el anexo V. Este material es el mismo que se utilizó en el estudio previo. En aquella ocasión, las probetas se cortaron con un espesor de 40 mm y una longitud de 400 mm. Para este trabajo, la longitud de las probetas no estaba determinada, pero la anchura era conveniente que fuese de 40 mm para poder utilizar las mismas mordazas, y además, poder comparar luego resultados en caso de que fuera necesario. También se disponía de la placa de anclaje entre máquina y utillaje. Se trata de una placa de acero con una rosca mecanizada en su parte inferior mediante la cual se rosca a la máquina, y cuatro agujeros roscados en su parte superior para atornillar ahí el conjunto del utillaje. Esta placa se muestra en la figuras 5 y 6.

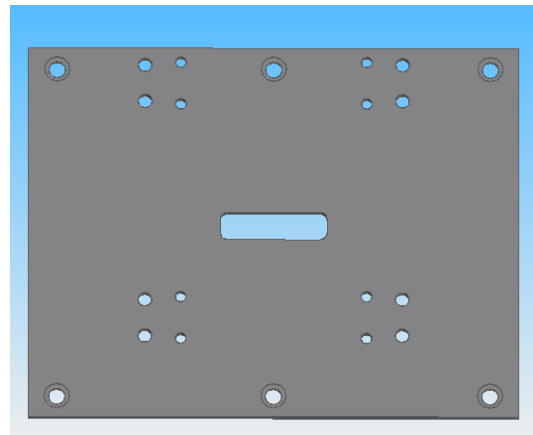
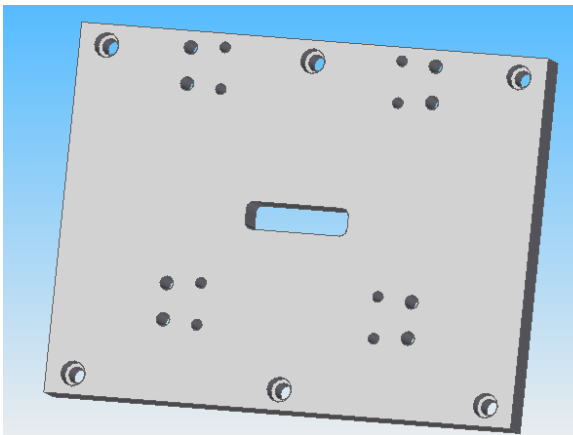




**Figuras 5 y 6.** Fotografía y vista en SolidEdge de la placa de anclaje del utillaje

También se contaba con todas las placas mecanizadas del utillaje anterior, que se intentaron aprovechar para el diseño del nuevo, aunque finalmente solo se ha aprovechado la placa ranurada que soporta las mordazas. La función de la ranura es que la chapa vaya pasando por ella durante el ensayo.

Esta placa se muestra a continuación en SolidEdge:



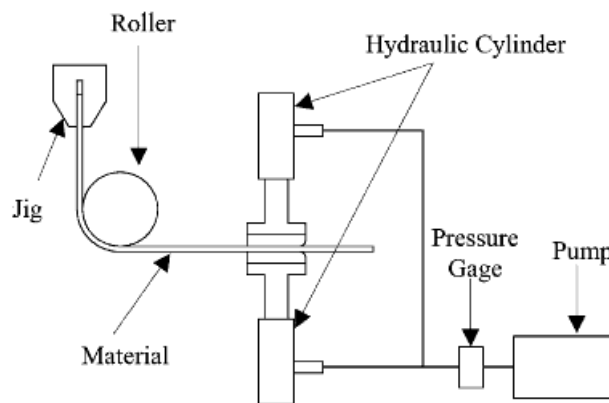
**Figuras 7 y 8.** Vistas en SolidEdge, general y alzado respectivamente, de la placa ranurada utilizada en el utillaje diseñado para los ensayos previos en la zona plana de la chapa.

### Abordaje del problema

El primer problema que tenemos que solucionar es cómo conseguir en la máquina INSTRON una configuración de ensayos que simule el proceso de embutición para la zona II de la figura 1. Para ello, se determina diseñar un utillaje con el software SolidEdge ST7, con el fin de obtener un modelo 3D del utillaje, analizar la disposición de los diferentes elementos de este, y finalmente obtener los planos que llevaremos al taller para que mecanicen las piezas necesarias.

Antes de ponernos a diseñar, se procedió a la consulta de varios artículos técnicos publicados por la editorial científica *Elsevier*, que trataban el tema de los ensayos de embutición, y de la influencia que la fricción chapa-matriz tiene en este proceso. El objetivo de esta consulta era tomar ideas de ensayos previos realizados similares al que aborda este trabajo. Finalmente se encontró un artículo acerca de un estudio realizado en 2001 por los autores H.Y.Kim, B.C.Hwang y W.B.Bae, de la *School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Jangjon-dong, Keumjong-gu, Pusan 609 735* de Korea del Sur, titulado “*An experimental study on forming characteristics of pre-coated sheet metals*” que analizaba la fricción chapa-matriz en el proceso de embutición profunda para diferentes materiales de radio de matriz, lubricantes y materiales de ensayo.

Para ello, simularon el proceso mediante un test de fricción como el esquematizado en la figura 4:



**Figura 9.** Diagrama del test de fricción presente en el artículo “*An experimental study on forming characteristics of pre-coated sheet metals*”, nombrado anteriormente.

Con esta misma configuración, hicieron 2 tests de fricción: uno con el rodillo anclado (sin giro), y otro con el rodillo libre (con giro permitido). En el proceso de embutición tienen lugar los dos efectos. Cuando empieza a bajar el punzón no hay deslizamiento relativo entre la chapa y la matriz, lo que se simula en este esquema con el giro del rodillo permitido. Pero la mayor parte del proceso tiene lugar con deslizamiento relativo, y es únicamente el tipo de ensayo que hemos realizado en nuestro trabajo. Primeramente se iba a realizar también el ensayo con rodillo giratorio, pero finalmente se descartó por la dificultad de incluir unos rodamientos en el utillaje y la poca utilidad que esto tendría en nuestros resultados finales.

## Secciones del trabajo

El trabajo se divide en cinco secciones principales que son:

### **1) Introducción teórica de las fórmulas utilizadas en el cálculo de los coeficientes de rozamiento y de la presión de contacto**

En esta sección se explican todos los cálculos numéricos realizados para llegar a los resultados finales. Es la primera parte del trabajo porque es necesaria su total comprensión antes de pasar al diseño de utillaje. Debe quedar bien claro qué es lo que queremos y cómo lo vamos a conseguir.

### **2) Diseño del utillaje**

En esta sección se explica brevemente cómo se llevó a cabo el diseño del utillaje que se amarró a la máquina INSTRON. Esta es la parte que más tiempo llevó hacer debido a que un fallo de diseño podía suponer un utillaje defectuoso y por lo tanto la imposibilidad de medir con él. Por ello se ha incluido un anexo (anexo II) con los detalles del diseño.

### **3) Ensayos**

Se detalla el diseño de experimentos que se ha llevado a cabo para chapa prepintada y para chapa fosfatada, indicando qué factores son los que vamos a variar y cuáles son sus niveles. Una vez que se expone el diseño de experimentos, se explica la metodología de los ensayos en la máquina INSTRON.

### **4) Análisis de resultados**

Es el objetivo de este trabajo. Aquí se muestra la manera de llegar a las gráficas finales, halladas mediante hojas Excel para las diferentes condiciones comentadas anteriormente. Se incluye un ejemplo de cálculo de la gráfica para condiciones de mordazas AMPCO 25, velocidad de máquina 480 mm/min, cara fosfatada de la chapa y 100 bares de presión y las gráficas finales para comportamiento del coeficiente de rozamiento en; cara pintada, cara fosfatada, mordazas AMPCO 25 y mordazas F521. El resto de gráficas para las diferentes combinaciones de parámetros, se incluyen en el anexo IV. Cuando tenemos los resultados de todas las combinaciones de ensayos, pasamos al análisis del diseño de experimentos con el software estadístico Minitab.

### **5) Conclusiones**

Aquí se presentan las conclusiones generales del proyecto, incluyendo puntos fuertes, puntos débiles, limitaciones y posibles mejoras.

# 1) INTRODUCCIÓN TEÓRICA DE LAS FÓRMULAS UTILIZADAS EN EL CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES DE ROZAMIENTO Y DE LAS PRESIONES DE CONTACTO

Primeramente, antes de pasar al diseño del utillaje, ha de quedar claro qué es lo que se quiere y a partir de qué datos se va a llegar a las gráficas finales del trabajo.

Las gráficas queremos que muestren la evolución del coeficiente de rozamiento respecto a la presión de contacto chapa-matriz en el radio de la matriz, cuando ésta va aumentando, (en nuestro caso, en el radio que acoplemos al utillaje).

Por una parte, hay que conseguir una fórmula o fórmulas con las que obtener el coeficiente de rozamiento en el radio de curvatura, y otra serie de fórmulas que nos permitan hallar la presión de contacto que está ejerciendo la chapa sobre el radio de la matriz.

## 1.1) Coeficiente de rozamiento en el radio de curvatura

El artículo citado en la introducción, “*An experimental study on forming characteristics of pre-coated sheet metals*”, de los autores H.Y.Kim, B.C.Hwang y W.B.Bae, nos proporciona la siguiente fórmula para hallar el coeficiente de rozamiento en el radio de la matriz en el estudio que ellos realizaron en el 2001:

$$\mu_2 = \frac{2}{\pi} \ln \frac{P - B}{2F_c \mu_1}$$

Donde:

$\mu_2$  es el coeficiente de rozamiento en el radio de la matriz,

$\mu_1$  es el coeficiente de rozamiento plano en el pisador o mordazas,

$F_c$  es la fuerza que ejercen las mordazas en el pisado,

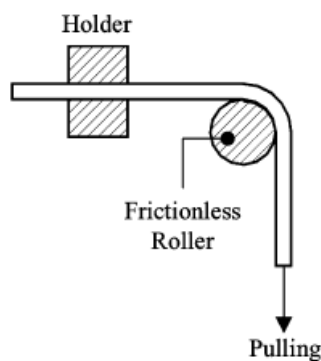
$P$  es la fuerza con la que “tira el punzón”, mostrada en la figura 10 como “*Pulling*”,

$B$  aparece en la ecuación como una posible fuerza en el sentido contrario a  $P$ , aparte de la fuerza de rozamiento que tiene que vencer  $P$  para que la chapa comience a fluir. En el artículo aclara que; para que  $\mu_2$  sea el coeficiente de rozamiento en el radio de la matriz, es necesario que  $B=0$ .

Con la condición de que  $B=0$ , nos queda la siguiente fórmula:

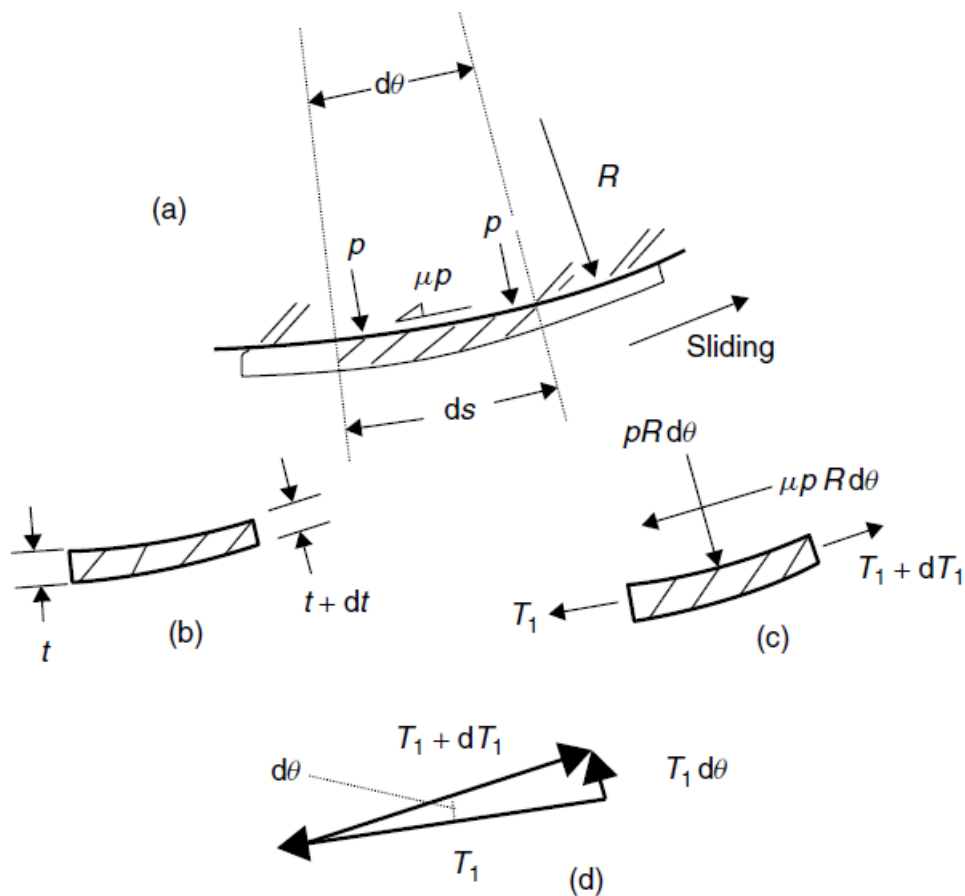
$$\mu_2 = \frac{2}{\pi} \ln \frac{P}{2F_c \mu_1}$$

En la fórmula anterior, el término que aparece en el denominador del logaritmo neperiano;  $2F_c \mu_1$ , vemos que es la fuerza de rozamiento que tiene que vencer  $P$  para que la chapa comience a deslizar por el rodillo. Donde  $\mu_1$  es el coeficiente de rozamiento entre chapa y mordazas,  $F_c$  es la fuerza normal con la que actúan las mordazas, y el 2 aparece debido a que la superficie de contacto es doble (por encima y por debajo de la chapa).



**Figura 10.** Esquema reducido del test de fricción presente en el artículo “An experimental study on forming characteristics of pre-coated sheet metals”

En un principio se desconoce la procedencia de los demás términos de la ecuación, ya que en el artículo aparece la fórmula directamente. Antes de utilizarla necesitamos entenderla para asegurarnos de que nos va a servir en nuestro trabajo. Con afán de entender y demostrar la fórmula, seguimos con la consulta de textos relacionados con los procesos de embutición. En este caso, fuimos a consultar el libro *Marcianak – Mechanics of Sheet Metal Forming*, donde se expone una serie de esquemas que muestran las fuerzas que tienen lugar en este proceso.



**Figura 11.** Esquemas (a,b,c y d) de las fuerzas que tienen lugar en las curvaturas en el proceso de embutición. Figura sacada del libro Marcianak – *Mechanics of Sheet Metal Forming*.

En el esquema (a) de la figura 11, se pueden observar las fuerzas que actúan en cualquier porción diferencial de curvatura en el proceso de embutición. Por un lado tenemos la presión de contacto “p” de la matriz o punzón sobre la chapa en dirección radial. Por otra parte, en dirección tangencial tenemos la fuerza tangencial, que tira de la chapa y la fuerza de rozamiento que tiene que vencer (fuerza generada por la presión  $\mu p$ ) para que la chapa fluya. De este esquema concluimos que la fuerza tangencial es mayor que la fuerza de rozamiento que genera la presión  $\mu p$ .

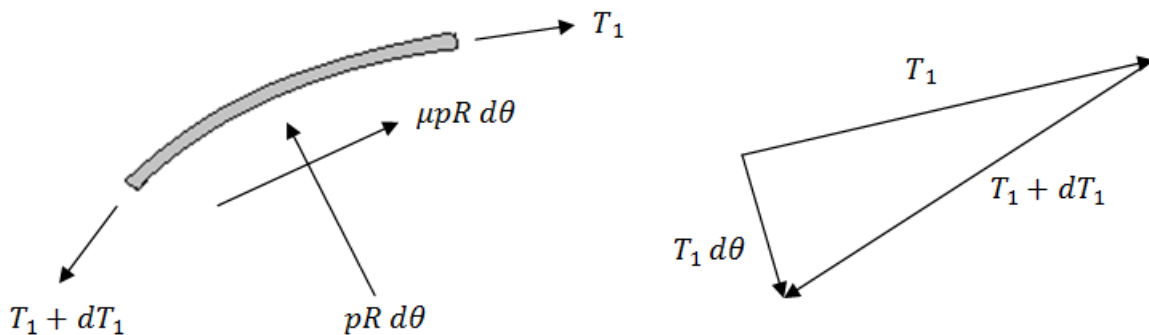
En el esquema (c), lo que se muestran son las acciones en la chapa como fuerzas propiamente dichas. Para ello, se simplifica el modelo como una chapa de anchura unitaria (en dirección perpendicular al papel). Para pasar de presión de contacto a términos de fuerza, se ha multiplicado a  $p$  por  $R$ , por  $d\theta$  y por 1, quedando una fuerza radial igual a  $pRd\theta$ . Igualmente, para pasar de  $\mu p$  a unidades de fuerza, y poder mostrar la fuerza de rozamiento, se ha multiplicado a  $\mu p$  por  $R$ , por  $d\theta$  y por 1. Finalmente, para representar la fuerza que ejerce el

punzón, se le da como nombre  $T_1 + d\theta$ , y a la fuerza generada en el extremo opuesto por la tensión que aparece mientras actúa el punzón, se le llama  $T_1$ .

$T_1$  en un extremo se compensa con  $T_1$  en el otro extremo, ya que es la misma fuerza generada por la misma tensión. Al actuar el punzón en el proceso de embutición, se genera una primera tensión fruto de la acción del punzón y de la presión del pisador. Esta tensión aparece en ambos extremos de la rebanada de chapa que tomemos, es exactamente del mismo valor en un extremo y en otro, pero va en sentido opuesto.

En el momento que empieza a fluir la chapa, la fuerza que hace el punzón sobre la chapa está superando la fuerza de retención que es capaz de hacer el pisador. En este momento siguen estando las dos fuerzas  $T_1$ , pero además, en el extremo de la rebanada de chapa hacia el cual está fluyendo, se produce un término extra de fuerza, que es lo que en el esquema se ha nombrado como  $+dT_1$ .

Para terminar con la explicación de las fuerzas que tienen lugar en el radio de la matriz en un proceso de embutición, a continuación se adjuntan dos figuras iguales a los esquemas de la figura 11, solo que ahora se muestran en sentido opuesto, de forma que se ve claramente la curvatura en el radio de la matriz de embutición:



**Figura 12 (Izquierda).** Esquema que muestra una porción diferencial de chapa en el radio de la matriz, así como las fuerzas que tienen lugar en ella durante el proceso de embutición.

**Figura 13 (Derecha).** Triángulo de la descomposición de fuerzas en el proceso.

Analizando el equilibrio de fuerzas de la figura 12, nos queda:

$$(1) \quad -(T_1 + dT_1) + T_1 + \mu p R d\theta = 0$$

$$(2) \quad -dT_1 + \mu p R d\theta = 0$$

$$(3) \quad \mu p R d\theta = dT_1$$

Igualando los términos de fuerza en dirección radial de las figuras 12 y 13, queda:

$$(4) T_1 d\theta = pR d\theta$$

$$(5) T_1 = pR$$

Así, sustituyendo la ecuación 5 en la ecuación 3, queda:

$$(6) \mu T_1 d\theta = dT_1$$

$$(7) \frac{dT_1}{T_1} = \mu d\theta$$

Resolviendo la ecuación diferencial:

$$(8) T_{1k} = T_{1j} e^{\mu d\theta}$$

Siendo el ángulo  $d\theta = \frac{\pi}{2}$ ;

$$(9) T_{1k} = T_{1j} e^{\mu \frac{\pi}{2}}$$

$$(10) \frac{T_{1k}}{T_{1j}} = e^{\mu \frac{\pi}{2}}$$

$$(11) \ln \frac{T_{1k}}{T_{1j}} = \mu \frac{\pi}{2}$$

$$(12) \mu = \frac{2}{\pi} \ln \frac{T_{1k}}{T_{1j}}$$

Así llegamos a la fórmula que aparece en el artículo, donde:

$$(13) T_{1k} = P, \text{ y}$$

$$(14) T_{1j} = 2F_c \mu_1$$

En nuestro caso particular, P es la fuerza con la que “tira” la máquina de ensayos, y  $2F_c \mu_1$  es la fuerza de rozamiento que generan las mordazas al pisar la chapa. Así, el coeficiente de rozamiento  $\mu_2$  es precisamente el que está presente entre la chapa y el radio de la matriz.

$$(15) \boxed{\mu_2 = \frac{2}{\pi} \ln \frac{P}{2F_c \mu_1}}$$



## 1.2) Presión de contacto que ejerce la chapa sobre el radio de la matriz

A la otra fórmula utilizada en este trabajo se llega también a partir del equilibrio de las fuerzas radiales que aparecen en las figuras 12 y 13:

$$(16) T_1 d\theta = pR d\theta$$

$$(17) p = \frac{T_1 d\theta}{R d\theta}$$

Expresando  $T_1$  como la tensión generada en la chapa multiplicado por su área, y teniendo en cuenta que estamos en una simplificación de profundidad unitaria de chapa, queda:

$$(18) T_1 = \sigma_1 t \cdot 1$$

siendo  $t$  el espesor de la chapa.

Sustituyendo la expresión 18 en la 17, lo que tenemos es:

$$(19) p = \frac{\sigma_1 t}{R}$$

La escribimos de esta forma:

$$(20) \boxed{p = \frac{\sigma_1}{\frac{R}{t}}}$$

Así nos queda  $R/t$  de denominador. El cociente  $R/t$  es lo que se denomina ratio de doblado de la chapa.

La tensión  $\sigma_1$  es la tensión a la que está sometida la chapa en dirección axial, y se puede calcular fácilmente a través de la fuerza de rozamiento generada por las mordazas y la sección de la probeta que tengamos en nuestro ensayo.

Ahora que ya tenemos las fórmulas expuestas, podemos pasar a realizar una serie de cálculos de prueba donde podamos ver qué necesidades tenemos que cubrir con el diseño del utillaje si queremos llegar a presiones de contacto de unos  $100 \text{ MPa}$

Escogiendo una presión máxima de  $100 \text{ MPa}$ , un espesor de chapa fijo (es el material que hay disponible) de  $0,8 \text{ mm}$ , y un valor de  $\sigma_1 = \frac{F_{roz}}{\text{Área chapa}}$ , podemos determinar el radio necesario en el utillaje para conseguir una presión de contacto de  $100 \text{ MPa}$

La  $F_{roz}$  a su vez, como ya se ha visto anteriormente, se calcula como  $2F_c\mu_1$ , siendo  $F_c$  la fuerza normal que ejercen las mordazas sobre la chapa. Esta fuerza normal también está limitada para los ensayos que queremos realizar. No por el cilindro de aceite que las acciona, sino porque una fuerza normal excesiva daña la capa de pintura de la chapa cuando esta comienza a fluir. En el estudio previo que se realizó para determinar los coeficientes de rozamiento en plano, se concluyó que la fuerza normal no debía sobrepasar los  $10000 N$ , ya que a partir de ese valor se comenzaba a dañar la capa de pintura de la chapa en los ensayos.

Para el cálculo de la  $F_{roz}$ , y ayudándonos del estudio previo de cálculo de coeficientes de rozamiento en plano, escogimos un  $\mu_1=0,1$ . Este valor no es demasiado preciso porque depende de la presión de pisado que ejerzamos, pero si es orientativo para un primer cálculo del radio de la matriz de nuestro utillaje. Con este valor de  $\mu_1$ , la fuerza de rozamiento queda:

$$(21) F_{roz} = 2 \cdot 0,1 \cdot 10000 = 2000N$$

El cálculo se hace con los  $10000 N$  de fuerza normal, ya que es la condición límite y por tanto la fuerza normal que va a inducir a la mayor presión de contacto en el radio del rodillo.

Con esta fuerza de rozamiento calculada, pasamos a calcular la tensión  $\sigma_1$  teórica que va a soportar la chapa.

$$(22) \sigma_1 = \frac{2000}{40 \cdot 0,8} = 62,5 N/mm^2$$

Una vez que hemos calculado la tensión a la que está sometida la chapa, calculamos el radio del rodillo:

$$(23) p = \frac{62,5}{\frac{R}{0,8}} = 100 MPa$$

$R$  para una presión de contacto de  $100 MPa$ ,  $= 0,5 mm$

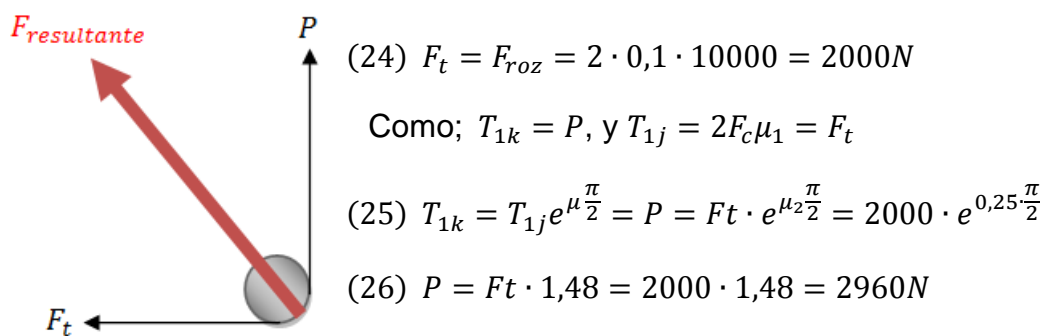
Esto implica poner un rodillo de  $1 mm$  de diámetro, pero vemos que no tendría ninguna funcionalidad ya que se doblaría a la mínima fuerza que soporte. Al realizar estos cálculos empezamos a sospechar que va a ser muy difícil llegar a  $100 MPa$  de presión de contacto.

Llegados a este punto, empezamos a realizar una serie de pruebas con diferentes combinaciones de fuerzas, radios de rodillo, presiones de contacto, e incluso secciones de chapa diferentes (cortar a menos anchura que  $40 mm$ , para que soporte tensiones mayores con la misma fuerza). Anteriormente se

explicó que nos gustaría contar con chapas de 40 mm de anchura, por eso, esta última modificación comentada es la más indeseable. A lo que se quiere llegar con esto es a conseguir unos parámetros de diseño de utillaje realizables y funcionales.

Para realizar estas pruebas, se ha implementado una hoja Excel donde se puede probar a cambiar parámetros de forma sencilla, y obtener el radio necesario para cumplirlos. Además, se ha incluido un cálculo para hallar el desplazamiento que sufrirá el rodillo con la fuerza aplicada, y así ver si estamos moviéndonos en unos diámetros de rodillo adecuados.

Para realizar la estimación de fuerza resultante que va a soportar el rodillo, vamos a tomar un coeficiente de rozamiento de  $\mu=0,25$  entre la chapa y el radio de la matriz. A continuación se muestra una imagen explicativa para el cálculo de la fuerza que ha de soportar el rodillo:



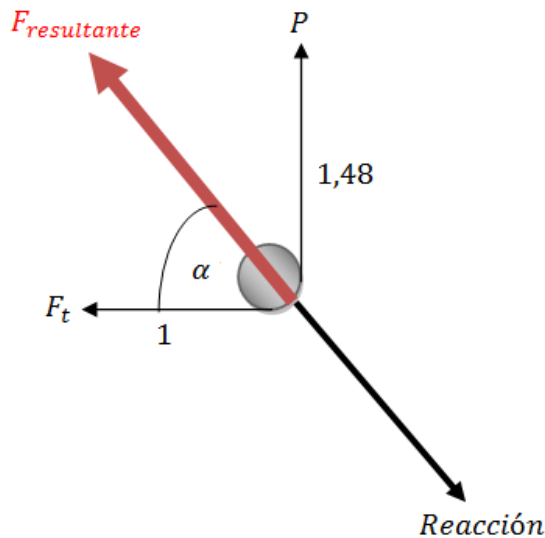
**Figura 14.** Esquema de las fuerzas que tienen lugar en el radio de la matriz, inducidas por la tensión a la que está sometida la chapa ( $P$  y  $F_t$ ).

Ahora pasamos a calcular la fuerza resultante:

$$(27) F_{resultante} = F_t \cdot \sqrt{1^2 + 1,48^2} = 1,786 \cdot F_t \sim 1,8F_t$$

$$(28) F_{resultante} = 1,8 \cdot 2000 = 3600N$$

Se ha calculado también el ángulo de incidencia de la fuerza, para saber en qué dirección se deformará el rodillo:



$$(29) \tan \alpha = \frac{1,48}{1} = 1,48$$

$$(30) \alpha = 55,95^\circ$$

**Figura 15.** Esquema de las fuerzas que tienen lugar en el radio de la matriz, junto con la fuerza resultante, la reacción en el utillaje, y el ángulo de dirección de éstas.

Una vez que hemos calculado la fuerza que ha de soportar el rodillo y su dirección, metemos los datos en la hoja Excel para ver cuánto se deforma el rodillo y a qué presión se puede llegar. Todas estas pruebas y cálculos se detallan en el anexo I.

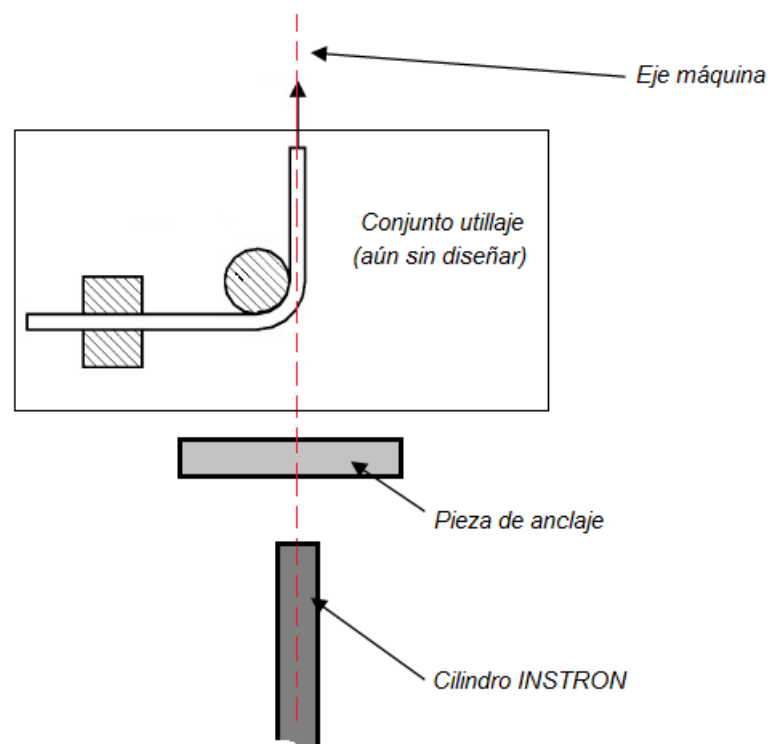
Finalmente, se concluye que esta no es una propuesta válida de diseño de utillaje, y se propone sustituir el rodillo por un bloque macizo de gran sección con un redondeo mecanizado en la arista que contacta con la chapa. De esta forma, su función será la misma que el rodillo, pero no nos tenemos que preocupar de la flecha experimentada porque apenas se deformará.

Este bloque, se va a aprovechar de una matriz de plegado que ya existe y que dispone de un soporte con agujeros roscados para atornillar en él varios bloques postizos con una arista mecanizada a diferentes radios de redondeo. Estos postizos son de material F521, un acero muy típico en las matrices. El menor de los postizos es de  $R=0,8$  mm, y será con el que primero probemos los ensayos, ya que es el que teóricamente permite llegar a mayor presión de contacto. Con un radio de 0,8 mm se podría llegar a una presión aproximadamente de unos 60 MPa.

## 2) DISEÑO DEL UTILLAJE

Una vez que se ha comprendido el objetivo del trabajo y los pasos a seguir para llegar a las gráficas finales, podemos comenzar con el diseño del utillaje.

Para iniciar el diseño, debemos partir de la placa de anclaje del utillaje (figura 5) a la máquina de ensayos, ya que la parte de la chapa que se queda plegada hacia arriba en el ensayo debe quedar alineada con el cilindro de la máquina, y por tanto con el centro de la placa de anclaje que está ya fabricada, como se observa en la figura 16.

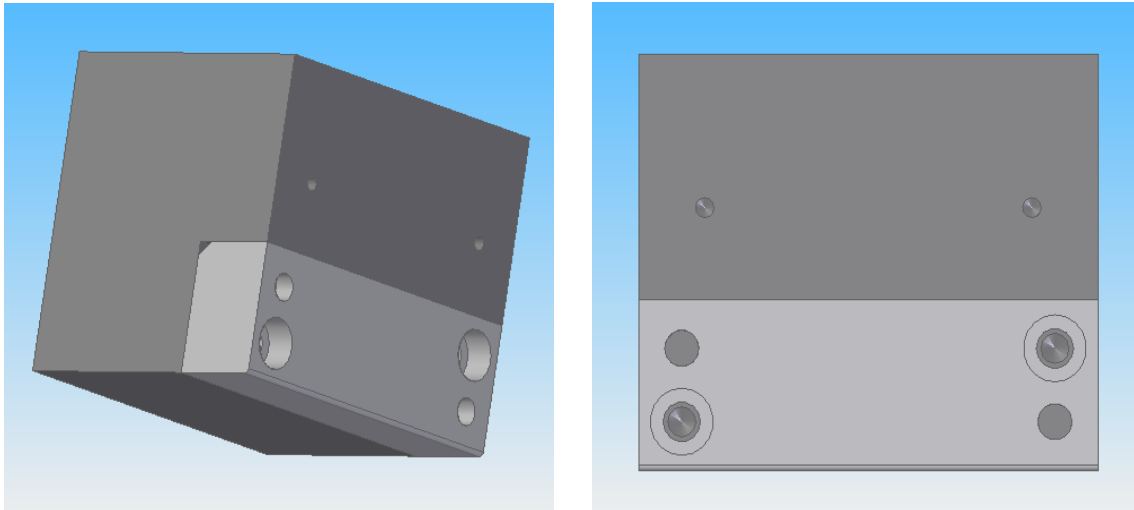


**Figura 16.** Esquema que muestra el montaje del utillaje que vamos a diseñar sobre la máquina.

El principal condicionante del diseño del utillaje es el aprovechamiento de la placa ranurada del utillaje ya fabricada. Esta placa deberá quedar en posición vertical para que las mordazas hagan el pisado como se muestra en la figura 16. Al posicionar esta placa de forma vertical, debemos atornillarla por su parte de inferior a una placa que colocaremos como base de todo el conjunto del utillaje.

Otro punto importante a tener en cuenta, es la decisión determinada anteriormente de sustituir el rodillo por un bloque con redondeo que vamos a aprovechar de una matriz de plegado que está ya fabricada. El bloque consiste

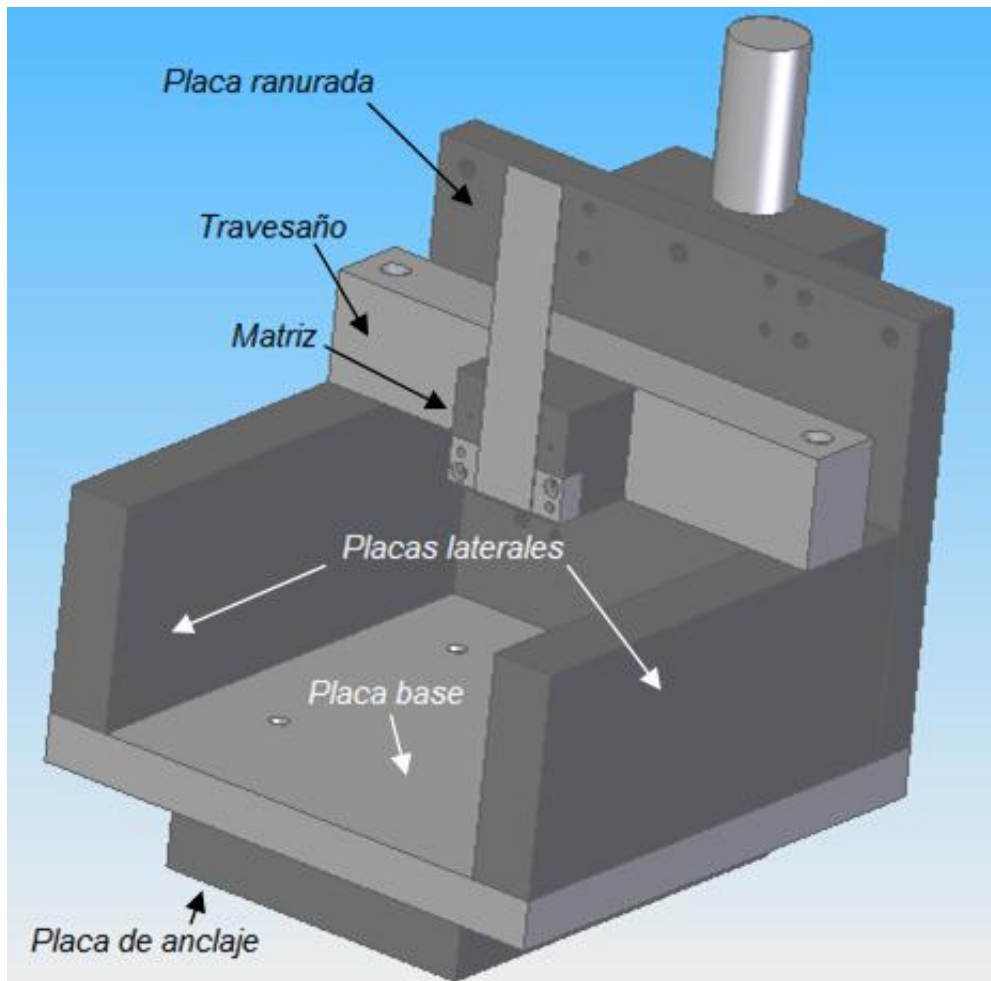
en un soporte y un postizo que se atornilla a él. El postizo es la pieza que tiene el redondeo, y en su día se mecanizó aparte para poder disponer de varios radios de plegado intercambiables fácilmente sin tener que cambiar el soporte, por lo que si fuese necesario podríamos también hacer los ensayos para varios radios (no es el caso).



**Figuras 17 y 18.** Vistas en SolidEdge, general y alzado respectivamente, del bloque que se pretende utilizar en el utillaje a diseñar. En las imágenes se ve perfectamente como el bloque consta de dos piezas; el soporte y el postizo. El postizo es la parte que tiene el redondeo.

Para colocar este bloque a la altura de la ranura que tiene la placa, se decidió amarrar a un travesaño que va de lado a lado del utillaje, atornillado sobre unas placas laterales que se colocan para reforzar el conjunto, ya que este tiene que soportar la fuerza de la máquina y sin ellas se podría dañar la unión atornillada de la placa ranurada a la placa base.

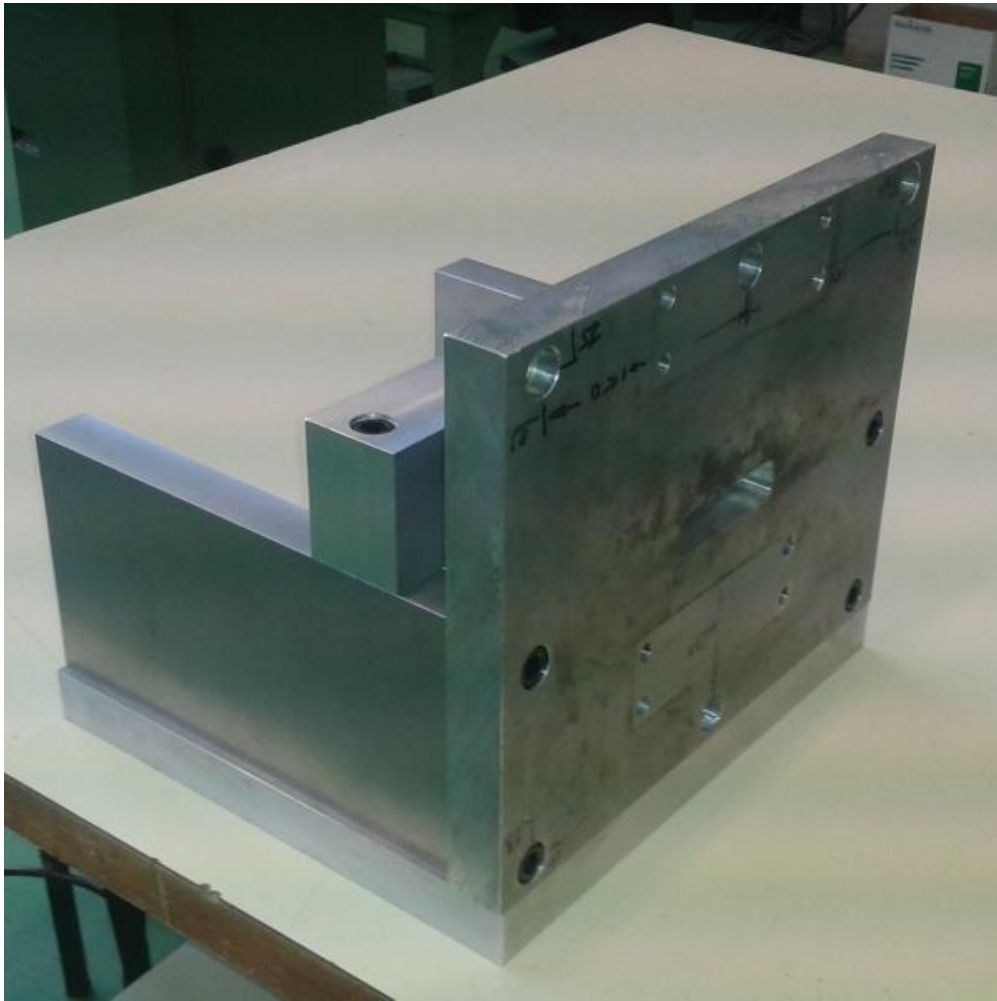
Al colocar la placa base del utillaje y las dos placas laterales, es necesario realizar alguna modificación en la placa ranurada que aprovechamos del utillaje anterior, como se explica en el anexo II.



**Figura 19.** Conjunto del utillaje con sus partes indicadas. En esta imagen también se incluye el cilindro y las mordazas del utillaje.

Ahora ya tenemos el utillaje completamente diseñado. Después de realizar una comprobación de todas las piezas, se imprimen los planos desde SolidEdge para llevarlos al taller de mecanizado y hacer las cuatro piezas que necesitamos; placa base, dos placas laterales y travesaño, además de las modificaciones precisas en la placa ranurada. Los planos se incluyen en el anexo III.

Una vez mecanizadas todas las piezas, se montó el utillaje en el taller y se llevó a la nave donde se encuentra la máquina INSTRON para comenzar con los ensayos.



**Figuras 20.** Fotografía del utillaje fabricado y montado (sin mordazas ni cilindro).



### 3) ENSAYOS

Esta sección es la que corresponde a las horas de taller midiendo en la máquina INSTRON. Esta es una máquina de ensayos universal, pero en este caso nos interesa que trabaje solo a tracción, tomando datos de la fuerza que detecta su célula de carga en cada momento.

Antes de comenzar con los ensayos, se elabora un diseño de experimentos (DOE) en una hoja Excel donde establecemos la alternancia de todos los ensayos y combinación de todos los factores. Este DOE es doble, en cuanto a que recoge por un lado los ensayos para la cara prepintada de la chapa y por otro lado los realizados para la cara fosfatada.

Los factores que se ha decidido variar en el diseño de experimentos son; material de las mordazas, velocidad del cilindro de la máquina y presión de pisado de las mordazas. Los niveles para cada uno de estos factores son:

MAT.MORDAZAS	NUMERACIÓN
AMPCO 25	1
F521	2

VELOCIDAD	NUMERACIÓN
80 mm/min	1
480 mm/min	2

PRESIÓN	NUMERACIÓN
60 bar	1
80 bar	2
100 bar	3
120 bar	4
140 bar	5
160 bar	6

Se realizaron ensayos combinando los 6 niveles de presión, los 2 niveles de material de mordazas y los 2 niveles de velocidad, y se repitió cada uno dos veces para tener más datos al hallar las gráficas, pero una tanda de ensayos para mordazas F521 no quedó registrada en la máquina y se perdió, por lo que solo tenemos una sola repetición de todos los ensayos que se realizaron con mordazas F521. Así, tenemos 36 ensayos para chapa prepintada y otros 36 para chapa fosfatada, y dentro de cada uno de estos grupos de 36, tenemos 24 con mordazas AMPCO 25 y 12 con mordazas F521.

Se han tomado 500 datos por segundo en todos los ensayos, excepto los 24 primeros que se hicieron con mordazas AMPCO 25, en los que se tomaron 250 datos por segundo. Estos se hicieron el primer día que medimos, y para el resto de ensayos decidimos tomar 500 por hacer una medición más precisa.

Llegados a este punto, se llevaron las chapas a cortar a un taller externo al centro. Se cortaron en probetas con una anchura de 40 mm y una longitud de 860 milímetros. Primeramente, antes de meterlas en la máquina, fue necesario un redondeo de sus aristas mediante un desbarbador. Así, nos aseguramos de que no haya problemas de rozamientos o daños en las mordazas por las aristas que sobresalen de las chapas.

### **3.1) Tipos de ensayos en cuanto a configuración de utillaje**

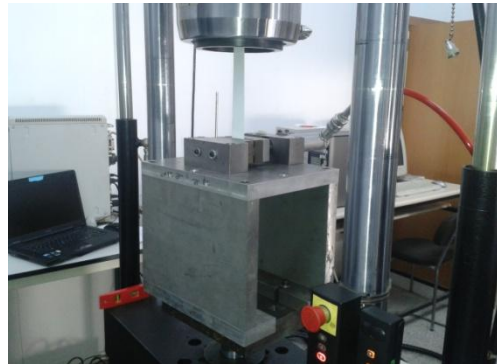
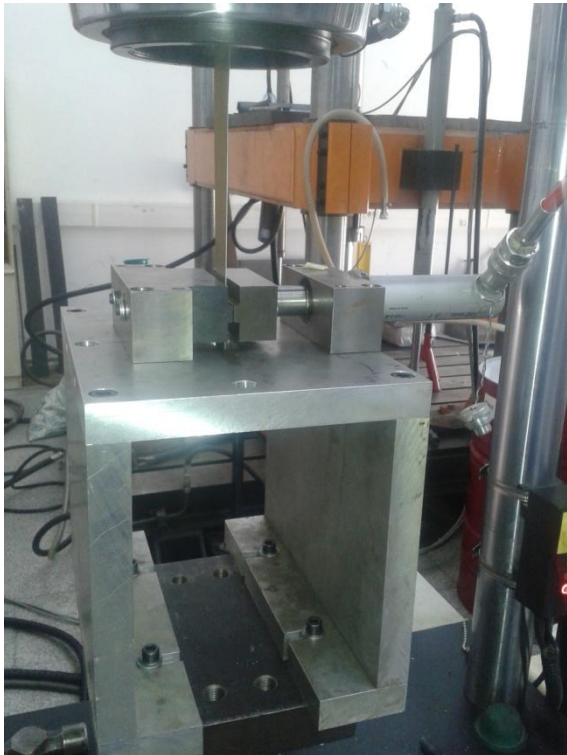
Una vez en el taller, teníamos la duda de si utilizar los coeficientes de rozamiento calculados en los ensayos que se realizaron previamente con la configuración plana de utillaje, y que habíamos estimado como  $\mu_1 = 0,1$  (basándonos en el estudio previo) para el cálculo teórico de las presiones de contacto en la hoja Excel mostrada en el anexo I. El problema es que los ensayos previos se habían realizado colocando “chapa contra chapa”, para hallar el coeficiente de rozamiento en la cara pintada o en la fosfatada, pero a nosotros eso no nos interesaba para la zona plana, como se explica en el apartado 3.7.1. Entonces se concluyó en volver a realizar ensayos con la configuración plana de utillaje (el que ya estaba diseñado con la placa ranurada para el estudio previo), y así obtendríamos datos de coeficientes de rozamiento en plano mucho más precisos y fiables, que luego utilizaríamos para calcular los coeficientes de rozamiento en el radio del postizo con redondeo.

Se realizaron 48 ensayos con configuración plana de utillaje; variando los parámetros presión de pisado, velocidad de la máquina y material de las mordazas (mismos niveles que en los ensayos con configuración Rd), por lo que tenemos dos repeticiones de cada ensayo, ya que aquí no influye la cara de la chapa, como se explica al final del apartado 3.7.1.

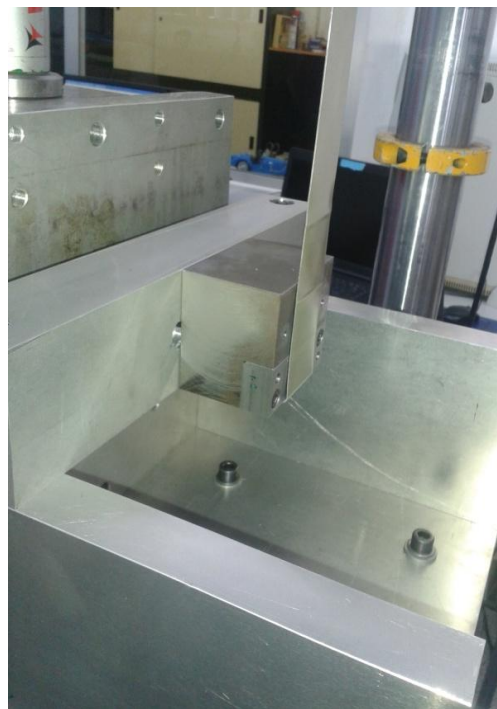
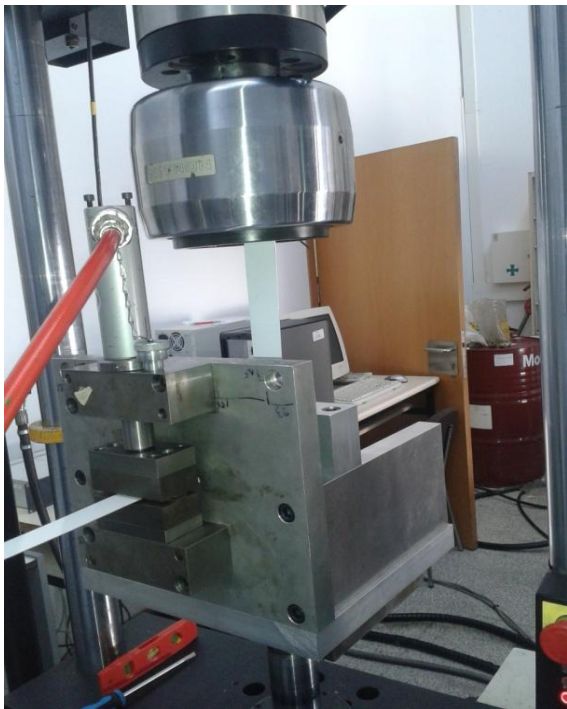
Así, se realizaron los dos tipos de ensayos en el taller: con la configuración plana de utillaje, y con la configuración de utillaje diseñada en este trabajo. Para la configuración plana, hubo que cortar las chapas por la mitad, ya que las que teníamos disponibles para los ensayos no cabían en la máquina en posición vertical debido a su longitud.

A partir de ahora, vamos a diferenciar los dos utillajes como:

- Configuración plana (el que ya estaba diseñado)
- Configuración Rd (el que hemos diseñado para este trabajo)



**Figuras 21, 22 y 23.** Imágenes del utillaje en su configuración plana colocado en la máquina.



**Figuras 24 y 25.** Imágenes del utillaje en la configuración Rd colocado en la máquina.

### 3.2) Tipos de ensayos en cuanto a material de las mordazas de pisado

En cuanto al material de las mordazas, cabe decir que los ensayos se han realizado con dos parejas de mordazas diferentes. Unas eran de AMPCO 25 y las otras de acero F521. El objetivo de cambiar de mordazas es observar cómo influye el material de los pisadores en los procesos de embutición.



**Figuras 26 y 27.** Mordazas de pisado de materiales F521 (izquierda) y AMPCO 25 (derecha).

### 3.3) Tipos de ensayos en cuanto a presión de pisado del cilindro

Se han realizado todos los ensayos para seis valores diferentes de presión de pisado del cilindro. Para ello, la bomba impulsora de aceite dispone de un manómetro donde podemos ver como aumenta la presión a medida que accionamos la palanca. Las presiones de pisado a las que se han realizado los ensayos son; 60, 80, 100, 120, 140, 160 bares



**Figura 28.** Imagen de la bomba manual de aceite con la que se acciona el cilindro de pisado.

El objetivo de variar la presión de pisado, es poder interpretar en las gráficas finales la influencia que tiene esta presión en el proceso.

### **3.4) Tipos de ensayo en cuanto a velocidad de la máquina**

Hemos probado también a realizar cada ensayo a dos velocidades de máquina diferentes, es decir, se ha variado la velocidad a la que el cilindro baja linealmente y “tira” de todo el utillaje. Se ha ensayado a velocidades de:

$v=80$  mm/min

$v=480$  mm/min

Como para cada variación de parámetros que hemos hecho, nuestro objetivo es ver la influencia que tiene la velocidad de punzón en los procesos de embutición, y particularmente en la presión de contacto en el radio de la matriz.

### **3.5) Tipos de ensayo en cuanto a caras de la chapa**

Las chapas de acero DC06 que utilizamos en los ensayos, cuentan con una cara pintada y otra fosfatada. Por eso, se han probado los ensayos por ambas caras de las chapas. No les dimos la vuelta a las mismas chapas para ensayar por ambas caras, pero en chapas distintas, unas veces probábamos por la cara pintada, y las otras por la cara fosfatada.

### **3.6) Metodología de ensayos**

A continuación se pretende explicar los pasos a seguir para una rápida y óptima realización de los ensayos. Los diferenciaremos nuevamente en ensayos con configuración plana de utillaje, y en ensayos con configuración Rd de utillaje.

#### **3.6.1) Ensayos con configuración plana de utillaje**

Como se ha comentado en el apartado 3.1, las chapas que se introducen en este utillaje es necesario cortarlas por la mitad para que quepan de forma vertical. Una vez que la chapa está metida dentro, se sujeta con la mano dejando sobresalir por la parte superior del utillaje un trozo de chapa (el mínimo posible pero suficiente como para que la mordaza superior de la máquina pueda atraparla correctamente). Antes de cerrar la mordaza superior de la máquina, accionamos el cilindro que acciona las mordazas de pisado mediante la bomba manual de aceite (con la justa presión para que quede sujeta la chapa sin necesidad de sostenerla con la mano). Así, la chapa queda totalmente sujeta al utillaje. Ahora, se sube el cilindro de la máquina completamente, para que quede en su posición más elevada, y se sube también la mordaza superior si molesta (o pega con el utillaje) al subir el cilindro. Una vez que está subido el cilindro, ya se puede atrapar el saliente de chapa que hemos dejado antes con la mordaza superior de la máquina.

Ahora ya está todo completamente posicionado y preparado para empezar el ensayo. Es hora de subir la presión del cilindro que acciona las mordazas de pisado hasta 60 bar e introducir los parámetros de datos por segundo, velocidad de máquina y recorrido en el software de la INSTRON. Ya se dijo que tomamos 500 datos por segundo y la velocidad de máquina, elegimos 80 ó 480 mm/minuto, según el ensayo que toque realizar.

El recorrido del cilindro depende de si es el primer ensayo después de posicionar todo o no. Es decir, siguiendo con la explicación, después de subir la presión a 60 bar, hay que introducir en el software un valor de recorrido de cilindro de 40 mm, porque acabamos de posicionar la chapa, no está suficientemente tensa y la máquina registrará valores de fuerza muy bajos que no son significativos en el ensayo y habrá que despreciar. Tomando un registro en 40 mm de recorrido, tendremos más valores “buenos” de fuerza.

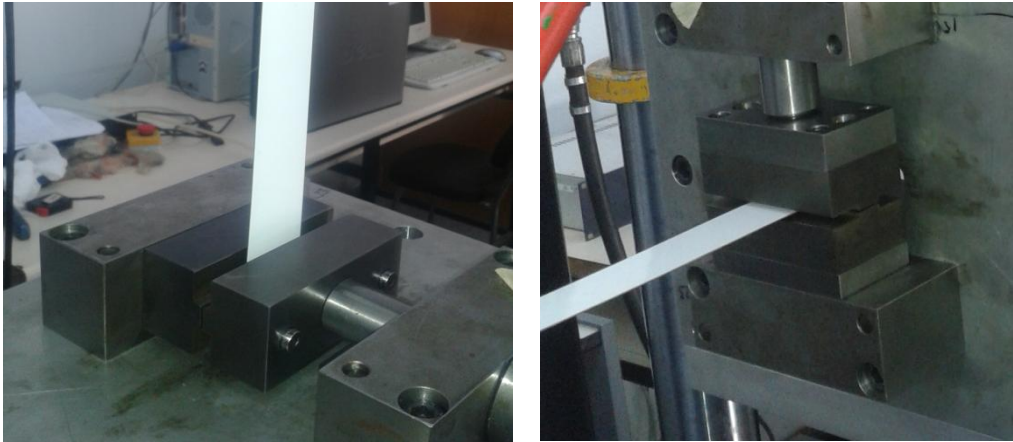
Una vez se ha hecho el ensayo para una presión de pisado de 60 bar durante 40 mm de recorrido, la chapa ya está lo suficientemente tensa como para poder realizar los siguientes 2 ensayos (que corresponden a una presión de pisado de 80 y 100 bar) con un recorrido de cilindro de 30 mm. Solo se pueden realizar con un recorrido de 30 mm los dos siguientes ensayos porque después del de 100 bares, el cilindro llega casi a su tope inferior (40 + 30 + 30 mm), y ya le quedan menos de 30 mm de recorrido para llegar al final, por lo que no se puede realizar el siguiente ensayo consecutivo.

Ahora es necesario abrir la mordaza superior de la máquina, pero sin soltar las mordazas de pisado, que seguirán a 100 bar de presión. Nuevamente, se sube el cilindro junto con el cabezal superior de la máquina (que incluye la mordaza superior) hasta que el cilindro llega a su tope superior. Ahora se realiza la misma secuencia: se atrapa la chapa con la mordaza, y se realizan otros tres ensayos más sin soltar la chapa (A 120, 140 y 160 bar de presión de cilindro de pisado). Otra vez estamos ante la misma situación. El ensayo para 120 bar hay que realizarlo durante un recorrido de 40 mm, debido a que acabamos de posicionar la chapa de nuevo y no está tensa. Los ensayos para 140 y 160 bar se realizarán durante 30 mm de recorrido.

Una vez que se han completado los 6 ensayos, se cambia de chapa y se vuelve a ensayar en otra diferente para las 6 presiones de pisado pero en otras condiciones de velocidad de máquina o mordazas. Así, con cada chapa se realizan 6 ensayos diferentes.

En este tipo de ensayos basta con anotar en el fichero que guarda los registros de fuerza las condiciones de presión de pisado, velocidad del cilindro y material de mordazas en las que se ha realizado el ensayo, y no influye si la chapa está colocada por una cara o por la otra, ya que nos interesa calcular el coeficiente

de rozamiento en plano “global” de la chapa. Queremos que esto sea así porque en los ensayos con configuración Rd de utillaje, la chapa contacta de igual forma con las mordazas de pisado, es decir, por un lado contacta con la cara pintada, y por el otro con la cara fosfatada.



**Figura 29 (Izquierda).** Vista de la chapa fluyendo por las mordazas en un ensayo con configuración plana de utillaje. Se introduce una chapa solamente, ya que en los ensayos con configuración Rd de utillaje también se introduce una chapa, y no chapa contra chapa como se hizo en los ensayos previos.

**Figura 30 (Derecha).** Vista de la chapa fluyendo por las mordazas en un ensayo con configuración Rd de utillaje. Como se observa, el paso de la chapa por las mordazas es exactamente igual que en los ensayos con configuración plana, por lo que el coeficiente de rozamiento hallado con el ensayo de la figura 29, lo utilizamos en el cálculo del coeficiente de rozamiento en el radio de la matriz calculado a partir del ensayo de la figura 30, bien sea para chapa prepintada o fosfatada.

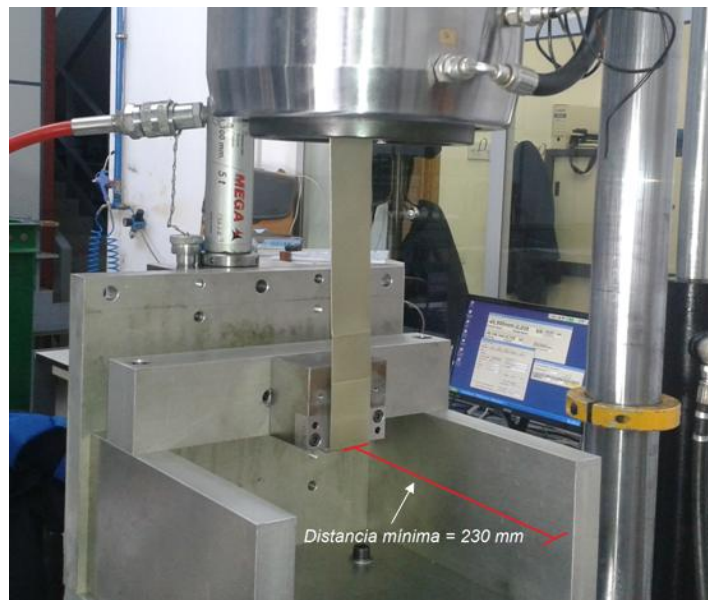
Cuando se invierte la posición de la chapa en los ensayos con configuración Rd de utillaje, es para hacer ensayos contactando el radio de la matriz con una u otra cara de la chapa, la que nos interese ensayar, pero esto no tiene ningún efecto en el coeficiente de rozamiento en plano, ya que la chapa seguirá contactando igual con las mordazas, aunque sea en el sentido opuesto.

Por tanto no tiene sentido hablar de coeficiente de rozamiento en plano para la cara pintada o fosfatada, ya que lo que se calcula es el coeficiente de rozamiento en plano “global” de la chapa.

### 3.6.2) Ensayos con configuración Rd de utillaje

La metodología para realizar este tipo de ensayos es la misma que para los de configuración plana de utillaje en lo que se refiere a recorridos de cilindro, presiones de pisado, material de mordazas y velocidad de máquina pero cambia en la forma en la que se coloca la chapa.

Se introduce la chapa desde la parte delantera del utillaje (delante de la placa ranurada vertical) por la ranura de la placa. Se empuja a la chapa hasta que sobresalga 230 mm o un poco más a partir del postizo redondeado del utillaje. Esta distancia se midió con un metro porque no hace falta que sea demasiado exacta, ya que sobra chapa por el otro lado en caso de pasarnos un poco. Una vez que habíamos medido los 230 mm, se posicionaba la chapa manualmente de forma perpendicular a la placa ranurada y a las mordazas. Para ello, nos ayudamos de una escuadra. Cuando está la chapa bien posicionada, introducimos presión en el cilindro que acciona las mordazas de pisado mediante la bomba manual de aceite y sujetamos la chapa en esa posición. De igual forma que en ensayo con configuración plana de utillaje, ahora no se introduce más que la presión justa para sujetar la chapa.



**Figura 31.** Imagen que muestra la distancia mínima que tiene que sobresalir la chapa a partir del bloque redondeado (foto sacada desde atrás) para que se pueda plegar manualmente y agarrarla con la mordaza superior de la máquina correctamente.

Una vez que tenemos la chapa sujeta con las mordazas, nos situamos en la parte de atrás de la máquina para plegar la chapa manualmente. Conviene ajustarse lo más posible al radio de plegado, porque así quedará más tensa desde el principio. Después de plegarla, se sigue sosteniendo con la mano en esa posición para poder amarrarla adecuadamente con la mordaza superior de la máquina.

La secuencia de pasos ahora es exactamente igual que la explicada para los ensayos de configuración plana de utillaje. Se sube el cilindro hasta su tope superior, se amarra con la mordaza de la máquina, se introducen los



parámetros en el software de la INSTRON y se realiza la secuencia de ensayos. De igual forma se tomarán datos en un recorrido de cilindro de 40 mm para las presiones de 60 y 120 bares, por los mismos motivos que se comentaron antes, y en un recorrido de 30 mm para el resto de presiones.

Así, con cada una de estas chapas se podrán realizar 6 ensayos diferentes. En este tipo de ensayos, además de variar la presión de pisado, la velocidad del cilindro de la máquina y las mordazas, también se varía la posición en la que metemos la chapa, ya que nos interesa ver la variación de los ensayos para ambas caras de la chapa.



**Figura 32.** Fotografía sacada en el taller a las chapas que ya han sido ensayadas. Se observan las chapas ensayadas con la configuración plana de utillaje (chapas cortas y rectas) y las ensayadas con la configuración Rd de utillaje (chapas en forma de “L”). Las chapas ensayadas se marcan con los valores de los parámetros con los que se realizó el ensayo.

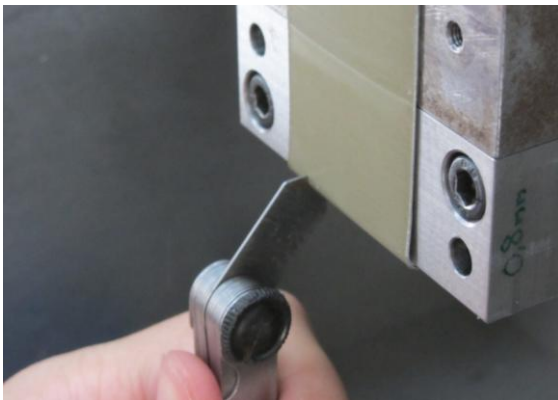
En este tipo de ensayos, no es suficiente con anotar en el nombre del fichero las condiciones de presión de pisado, velocidad del cilindro y tipo de mordazas, sino que también hay que apuntar sobre qué cara de la chapa se ha realizado el ensayo.

### **3.6.2.1) Problemas en la realización de ensayos con utillaje Rd**

Al comenzar con este tipo de ensayos y mirar la chapa por detrás del utillaje, nos dimos cuenta de que durante el ensayo la chapa no se adaptaba completamente al radio de 0,8 del postizo. Es decir, no se podía plegar con un radio tan pequeño.

Al suceder esto, no tienen sentido todos los cálculos previos realizados para calcular la presión de contacto que tiene lugar en el radio del postizo. Una nueva forma de hallar esta presión es midiendo el radio con el cual se ha plegado la chapa en el ensayo, y tomar ese radio como dato para calcular la presión. Así, al saber que el radio con el que se pliega la chapa es mayor que 0,8 mm, nos damos cuenta inmediatamente de que no se va a llegar a las presiones de contacto que estimamos anteriormente, sino a presiones mucho menores.

Para medir el radio de la chapa, utilizamos unas galgas de radio exterior. Decidimos medirlo por el exterior, ya que así se puede medir justo después de terminar cada ensayo y sin soltar la chapa (lo que permitiría a la chapa cierta recuperación elástica). Las medidas del radio se anotan en una hoja Excel junto con las demás condiciones del ensayo para luego tener claro qué radio corresponde a cada ensayo y poder sacar las gráficas correctamente. Finalmente, en la sección de análisis de resultados, para sacar las presiones de contacto lo que se hace es restar al radio medido el espesor de la chapa y se halla el radio interior, que es el radio que supuestamente tendría la matriz que fuerza ese plegado.



**Figura 33 (Izquierda).** Fotografía sacada en el taller de una medición con las galgas del radio exterior de plegado de la chapa después del ensayo.

**Figura 34 (Derecha).** Imagen de las galgas de radio exterior.

## 4) ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección se pretende explicar cómo se ha llevado a cabo el tratamiento de datos para hallar los coeficientes de rozamiento y la presión de contacto chapa-matriz a partir de los datos capturados por la máquina INSTRON, así como mostrar las gráficas finales, que es uno de los objetivos de este trabajo.

### 4.1) Tratamiento de datos

Cada ensayo se guarda en el software de la máquina indicando el nombre de sus parámetros de velocidad de máquina, cara de la chapa, y presión de pisado en el nombre del fichero. Estos ficheros tienen extensión .dat. Los ensayos a su vez se guardan ordenados en carpetas nombradas según la configuración de utillaje y el tipo de mordazas utilizadas. De esta forma tendremos perfectamente localizados todos los ficheros con todas sus variaciones de parámetros.

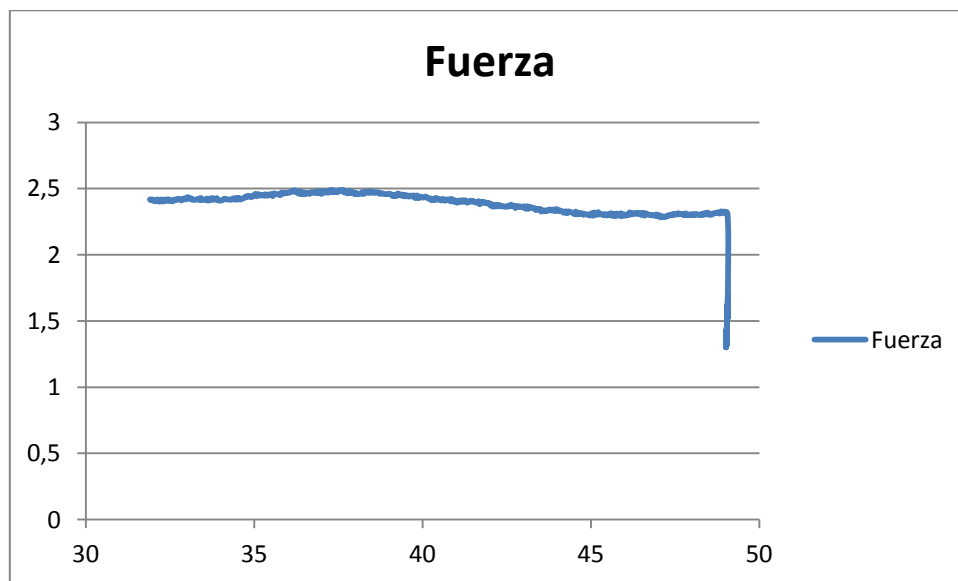
Por ejemplo, elegimos el nu\_fos3\_100.dat, que es el ensayo que se ha hecho con configuración de utillaje Rd, mordazas AMPCO 25, cara fosfatada de la chapa, a una velocidad de 480 mm/min de la máquina (eso lo indica el número 3, ya que primero hicimos ensayos con velocidad 480 y luego con velocidad 80 mm/min. El archivo nu\_fos9\_100.dat sería este mismo ensayo pero con velocidad 80 mm/min ).

Hora Seg.	Posición mm	Cargar kN	Ciclo
0	21,8997	2,15415	1
0,004	21,9314	2,15253	1
0,008	21,9635	2,16539	1
0,012	21,9951	2,14881	1
0,016	22,027	2,16292	1
0,02	22,061	2,1548	1
0,024	22,0938	2,15371	1
0,028	22,1245	2,1613	1
0,032	22,1565	2,16455	1
0,036	22,1875	2,15954	1
0,04	22,2207	2,17119	1
0,044	22,2534	2,1698	1
0,048	22,2855	2,16845	1
0,052	22,3186	2,16432	1
0,056	22,3499	2,17187	1
0,06	22,3803	2,16478	1
0,064	22,4125	2,1687	1
0,068	22,4458	2,17533	1
0,072	22,477	2,15473	1
0,076	22,5095	2,16588	1

**Figura 35.** Captura de pantalla que muestra la hoja Excel con los datos capturados por la máquina.

En este ensayo hemos tomado 250 datos por segundo (porque corresponde a la primera repetición), y la velocidad de máquina fue de 480 mm/min durante 30 mm. (porque se hizo con presión de pisado 100 bar). Por lo tanto el ensayo duró 3,75 segundos y tendremos aproximadamente 938 datos de fuerza, lo que se traduce en 938 filas rellenas con datos.

Ahora tenemos que hacer la media de todos los valores de fuerza que tenemos, pero hemos considerado necesario despreciar los 10 primeros milímetros del ensayo. Como la máquina también registra posición, nos fijamos en qué posición estaba cuando tomó el primer dato, y le sumamos 10 milímetros a esa posición. A partir de ese valor que nos salga ya podemos tomar todos los datos y calcular la fuerza media que realizó la máquina durante el ensayo. Teóricamente, a lo largo del ensayo la fuerza debería ser constante o prácticamente constante, exceptuando al principio (debido a que la chapa no está del todo tensa, pero esto no nos afecta porque ya nos aseguramos de ello eliminando los 10 primeros milímetros) y a veces al final. Para asegurarnos de que el ensayo salió correctamente y la fuerza se mantiene constante, representamos todos los valores de fuerza en una gráfica.



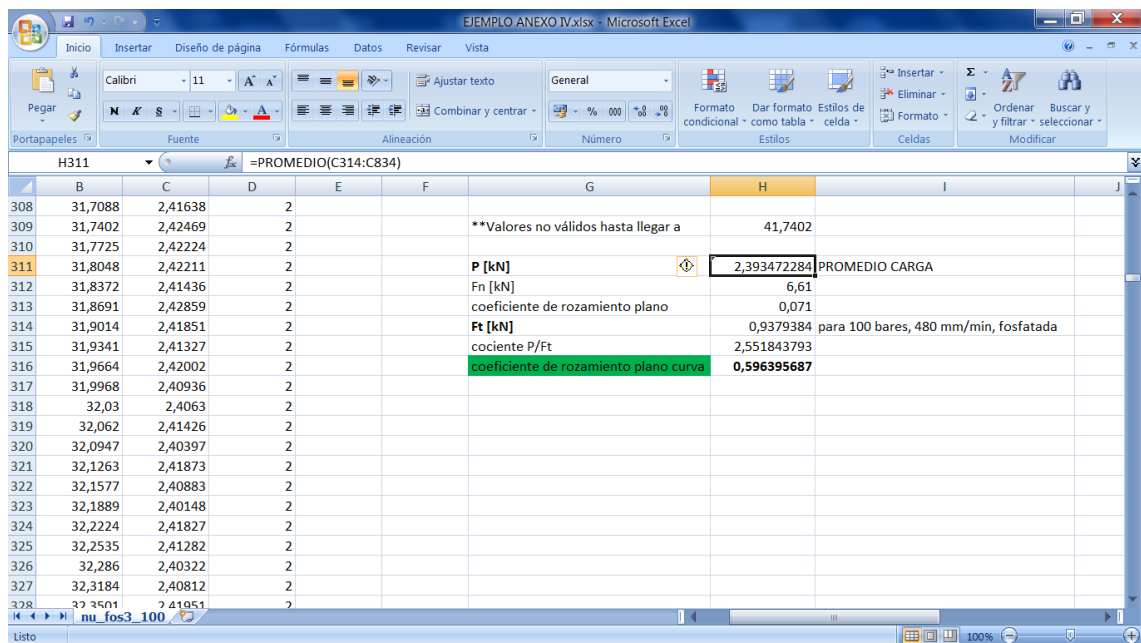
**Figura 36.** Gráfica de todos los valores de fuerza que captura la máquina, a excepción de los que corresponden a los 10 primeros milímetros de recorrido.

Siguiendo con el ejemplo, representamos la gráfica del archivo nu\_fos3\_100.dat. Como se observa, se muestra al final una caída muy brusca de la fuerza, que, aunque es durante muy poco tiempo, podría repercutirnos en el cálculo de la fuerza media. Para que esto no sea así, lo que hacemos es fijarnos en la tabla Excel en la evolución de las casillas de

la columna “cargar”, y detectar donde comienza esta bajada brusca. Cuando lo hayamos detectado, eliminamos también todos los valores a partir de ahí para realizar la media aritmética.

Por otro lado, vemos en la gráfica que la fuerza oscila entre los 2,3 y 2,5 kN aproximadamente. No es el mejor ejemplo de fuerza constante pero es válido para seguir con los cálculos de coeficientes de rozamiento, ya que no tiene ningún pico ni ninguna forma extraña que no sepamos a que se debe.

Calculamos el promedio de la fuerza y hacemos una tabla para ir sacando valores hasta llegar al coeficiente de rozamiento en el radio de la matriz. Para ello se utilizan las fórmulas que se exponen en la sección 1 de esta memoria.



**Figura 37.** Captura de pantalla en la que se muestra el tratamiento de datos y cálculo del coeficiente de rozamiento en el radio postizo para este caso.

En la captura de pantalla mostrada, vemos que

P [kN] es el promedio de la fuerza que ejerce la máquina,

Fn [kN] es la fuerza normal que ejercen las mordazas de pisado sobre la chapa. Se calcula a partir de la presión que nos marca el manómetro y del diámetro del cilindro, que son 29 mm, tal que:

$$(31) F_n [N] = S_{cil} \cdot P_{manómetro}$$

En este caso, como estamos trabajando a una presión de 100 bar, el cálculo queda:

$$(32) 100 \text{ bar} = 10 \text{ MPa}$$

$$(33) S_{cil} = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 29^2}{4} = 660,519 \text{ mm}^2$$

$$(34) F_n = 660,519 [\text{mm}^2] \cdot 10 \text{ MPa} = 6605,198 \text{ N}$$

$$(35) F_n = 6,6052 \text{ kN} \approx 6,61 \text{ kN},$$

como se muestra en la captura de pantalla de la figura 37.

En la siguiente casilla, introducimos el coeficiente de rozamiento en plano, que se halla con los ensayos con la configuración plana de utillaje para estas mismas condiciones. Para llegar a este coeficiente de rozamiento en plano, se llevan a cabo los siguientes pasos.

Primeramente se abre en una hoja Excel el archivo del ensayo correspondiente de igual forma que hemos hecho al principio de este ejemplo para nu\_fos3\_100.dat., solo que este archivo contiene los datos de fuerza de un ensayo con configuración plana de utillaje. Una vez abierto se crea una tabla similar a la del cálculo del coeficiente de rozamiento en el radio (figura 37), pero algo más simple ya que este cálculo es sencillo.

De igual forma que se hizo anteriormente, se eliminan los valores correspondientes a los 10 primeros milímetros de recorrido de la máquina, y se grafica la evolución de la fuerza para ver si hay algún pico extraño que nos haga descartar los últimos valores o descartar el ensayo completo.

Se calcula la media de la fuerza que ejerce la máquina (que es igual a la fuerza de rozamiento a vencer), y se calcula la fuerza normal de las mordazas, que, evidentemente, será la misma que en el ensayo correspondiente con configuración Rd de utillaje, ya que estamos trabajando con la misma presión, que en este ejemplo son 100 bar. Por tanto:

$$(36) F_n = 6,6052 \text{ kN} \approx 6,61 \text{ kN},$$

y con esta fuerza y la de rozamiento calculamos el coeficiente de rozamiento en plano:

$$(37) F_{roz} = 2F_n\mu_1$$

$$(38) \mu_1 = \frac{F_{roz}[\text{kN}]}{2F_n[\text{kN}]} = \frac{0,9897635}{2 \cdot 6,61} = 0,075$$

Para el otro ensayo con configuración plana en las mismas condiciones, el coeficiente de rozamiento es  $\mu_1 = 0,067$ .

Con estos dos valores se halla la media, que es igual a 0,071. Se repite este procedimiento para todos los ensayos con configuración plana de utillaje. El objetivo al hallar la media de los dos ensayos con las mismas condiciones, es conseguir un valor más preciso que llevar al cálculo de los coeficientes de rozamiento en el radio de la matriz, que son los que realmente nos interesan.

A continuación se muestra una tabla con todas las medias calculadas para las condiciones de mordazas AMPCO 25 y velocidad 480 mm/min. Esta tabla aparece también en el anexo IV.

P	$\mu$
60	0,105
80	0,079
100	0,071
120	0,075
140	0,073
160	0,080

Como se puede ver en la tabla, el coeficiente de rozamiento para presión de 100 bar es igual a 0,071.

Una vez explicado cómo se calcula este valor, volvemos a la hoja Excel del ensayo con configuración Rd de utillaje. Ahora, hacemos el proceso inverso al que acabamos de hacer para sacar el coeficiente de rozamiento. Es decir, partiendo del valor promedio de los dos coeficientes de rozamiento en plano, se calcula  $F_t$ .

$$(39) F_t = F_{roz} = 2 \cdot 0,071 \cdot 6610 = 938,62 N,$$

En la captura de pantalla donde se ha realizado este cálculo, el valor que aparece es 0,9379384 kN, debido al redondeo que se ha realizado en este ejemplo.

Ahora que ya sabemos el valor de  $F_t$ , tenemos todos los datos necesarios para calcular el coeficiente de rozamiento en el radio de la matriz, utilizando la fórmula 15, mostrada en la primera sección de esta memoria.

$$(40) \mu_2 = \frac{2}{\pi} \ln \frac{P}{2F_c \mu_1}$$

P ya lo hemos calculado antes haciendo la media de todos los datos coherentes.

$$(41) P = 2393,47 N$$

$$(42) 2F_c \mu_1 = F_t = 938,62 N$$

$$(43) \mu_2 = \frac{2}{\pi} \ln \frac{2393,47228}{938,62} = 0,5959,$$

como se puede observar en la figura 37.

En la otra parte de esta sección lo que haremos será explicar el procedimiento de cálculo de la presión de contacto que ejerce la chapa sobre el radio postizo o matriz.

Se parte de la fórmula 20 que hemos hallado anteriormente en la sección 1:

$$(44) p = \frac{\sigma_1}{R} = \frac{\frac{F_t}{A_{chapa}}}{\frac{R}{t}} = \frac{\frac{F_t}{W \cdot t}}{\frac{R}{t}} = \frac{F_t}{W \cdot R}$$

En la explicación de esta sección, para hacer las pruebas y hallar el diámetro necesario de rodillo se partía de una presión de 100 MPa. Como ya se explica en la sección 3, la chapa no se adaptaba al radio de 0,8 mm sino que se pliega con unos radios mayores. Así, ahora debemos hacer el proceso inverso al cálculo con el cual hallábamos el radio.

Los datos de los que disponemos son  $F_t$ , calculado anteriormente para hallar el coeficiente de rozamiento,  $W$ , que es la anchura de la probeta (están cortadas a 40 mm de anchura pero las medimos con un calibre antes de introducirlas en la máquina para una mayor precisión en los cálculos), y  $R$ , que es el radio que toma la chapa al plegarse para cada condición de presión de pisado, cara de chapa, mordazas y velocidad de máquina.

Para la toma de todos estos datos, se adaptó el diseño de experimentos que llevamos al taller antes de ensayar (figura 38). Cada hoja de este tipo acogerá 24 ensayos, que corresponden a todas las combinaciones posibles de; cara de chapa (pintada o fosfatada), velocidad de máquina (80 mm/min o 480 mm/min) y 6 valores de presión. El material de las mordazas no cambia en una misma hoja Excel.

A continuación se muestra la hoja Excel que se diseñó para la primera repetición de los ensayos con mordazas AMPCO 25. Es importante aclarar que la presión se ha pasado ya a fuerza normal, mediante la expresión 31:

$$(45) F_n [N] = S_{cil} \cdot P_{manómetro}$$

Así que en la hoja Excel aparece directamente  $F_n$  en vez de  $P$ , lo que agiliza cálculos y quita columnas a la tabla.



Rd_AMPKO_01									
NU_pintura	Velocidad	coef plano	Fn planas (kN)	Ft [kN]	R ext [mm]	R int [mm]	Anchura probeta	Presión de contacto en el radio [Mpa]	Coef Roz Radio
1	480		3,96		6,5		40		
2	480		5,28		6		40		
3	480		6,61		5		40		
4	480		8,26		4,5		40		
5	480		9,58		4		40		
6	480		10,57		3,75		40		
7	80		3,96		8,5		40,3		
8	80		5,28		6		40,3		
9	80		6,61		5,75		40,3		
10	80		7,27		4,4		40,3		
11	80		9,25		4		40,3		
12	80		10,57		3,75		40,3		
NU_fosfatada	Velocidad	coef plano	Fn planas (kN)	Ft [kN]	R ext [mm]	R int [mm]	Anchura probeta	Presión de contacto en el radio [Mpa]	Coef Roz Radio
1	480		3,96		7		40,3		
2	480		5,28		6,5		40,3		
3	480		6,61		5,5		40,3		
4	480		8,26		4,5		40,3		
5	480		9,58		4		40,3		
6	480		10,57		3,75		40,3		
7	80		3,96		7		40,35		
8	80		5,28		5		40,35		
9	80		6,61		4,5		40,35		
10	80		7,27		4		40,35		
11	80		9,25		3,5		40,35		
12	80		10,57		3,5		40,35		

**Figura 38.** Tabla Excel en la que se muestra el diseño de experimentos que se elaboró para llevar al taller con los datos ya recogidos de R ext y Anchura probeta para mordazas AMPKO 25, primera repetición.

En la hoja ya están rellenas las columnas de R ext y Anchura probeta, es decir, ya hemos realizado los ensayos para las condiciones de velocidad, cara de chapa y Fn que se indican en la hoja. “R ext” se mide con unas galgas de radio exterior cuando finaliza el ensayo, y “Anchura probeta” con un calibre digital antes de introducir la chapa en la máquina. Para rellenar la columna de Ft basta con tener los ensayos en estas mismas condiciones para configuración plana de utillaje, ya que el cálculo para hallar Ft es independiente de lo demás. R int se calcula restando 0,8 (espesor de la chapa) a R ext. Una vez que se tienen todas las columnas a excepción de las dos últimas (presión de contacto y coeficiente de rozamiento), se procede a rellenarlas con los pasos y cálculos explicados anteriormente en esta sección.

Siguiendo con el ejemplo, vamos a realizar el cálculo de la presión de contacto para condiciones de cara fosfatada, velocidad de máquina 480 mm/min, y presión de 100 bar (lo que equivale a Fn = 6,61 kN).

$$(45) p = \frac{F_t}{W \cdot R} = \frac{938,62}{40,3 \cdot 4,7} = 4,955 \text{ MPa}$$

$$**4,7 = 5,5 - 0,8$$

Mostramos la tabla rellena al completo:

NU_pintura	Velocidad	coef plano	Fn planas (kN)	Ft [kN]	R ext [mm]	R int [mm]	Anchura probeta	Presión de contacto en el radio [Mpa]	Coef Roz Radio
1	480	0,105	3,96	0,835	6,5	5,7	40	3,66	0,448
2	480	0,079	5,28	0,836	6	5,2	40	4,02	0,504
3	480	0,071	6,61	0,938	5	4,2	40	5,58	0,596
4	480	0,075	8,26	1,230	4,5	3,7	40	8,31	0,493
5	480	0,073	9,58	1,400	4	3,2	40	10,94	0,482
6	480	0,080	10,57	1,688	3,75	2,95	40	14,30	0,314
7	80	0,088	3,96	0,697	8,5	7,7	40,3	2,25	0,372
8	80	0,069	5,28	0,733	6	5,2	40,3	3,50	0,558
9	80	0,087	6,61	1,147	5,75	4,95	40,3	5,75	0,425
10	80	0,093	7,27	1,356	4,4	3,6	40,3	9,35	0,341
11	80	0,100	9,25	1,841	4	3,2	40,3	14,28	0,174
12	80	0,094	10,57	1,983	3,75	2,95	40,3	16,68	0,262

NU_fosfatada	Velocidad	coef plano	Fn planas (kN)	Ft [kN]	R ext [mm]	R int [mm]	Anchura probeta	Presión de contacto en el radio [Mpa]	Coef Roz Radio
1	480	0,105	3,96	0,835	7	6,2	40,3	3,34	0,315
2	480	0,079	5,28	0,836	6,5	5,7	40,3	3,64	0,502
3	480	0,071	6,61	0,938	5,5	4,7	40,3	4,95	0,596
4	480	0,075	8,26	1,230	4,5	3,7	40,3	8,25	0,462
5	480	0,073	9,58	1,400	4	3,2	40,3	10,86	0,473
6	480	0,080	10,57	1,688	3,75	2,95	40,3	14,20	0,468
7	80	0,088	3,96	0,697	7	6,2	40,35	2,78	0,436
8	80	0,069	5,28	0,733	5	4,2	40,35	4,33	0,732
9	80	0,087	6,61	1,147	4,5	3,7	40,35	7,68	0,509
10	80	0,093	7,27	1,356	4	3,2	40,35	10,50	0,374
11	80	0,100	9,25	1,841	3,5	2,7	40,35	16,90	0,286
12	80	0,094	10,57	1,983	3,5	2,7	40,35	18,20	0,386

Figura 39. Tabla Excel en la que se muestra el diseño de experimentos con todos los datos recogidos y todos los resultados calculados para mordazas AMPCO 25, primera repetición.

Con todos estos valores de presión de contacto y coeficiente de rozamiento, se sacan 4 gráficas (6 puntos por cada una), que son las que se muestran en el anexo IV, junto con todas las demás para otras condiciones. A continuación se adjunta la gráfica para los 6 valores de presión de pisado en condiciones de mordazas AMPCO 25, cara fosfatada y velocidad de máquina 480 mm/min, en la que podemos apreciar el tercer punto (correspondiente a presión de pisado de 100 bar), con presión de contacto 4,95 MPa y coeficiente de rozamiento 0,596, que es el que hemos trabajado durante este ejemplo.

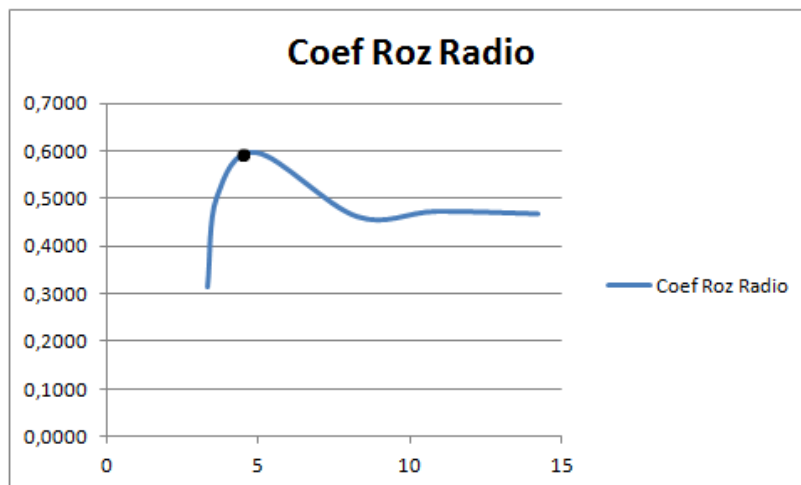


Figura 40. Gráfica final de todo este ejemplo.

## 4.2) Gráficas finales

Finalmente, nos interesa sacar dos gráficas finales de todo el trabajo, que muestren la variación del coeficiente de rozamiento en el radio de la matriz conforme aumenta la presión de contacto en:

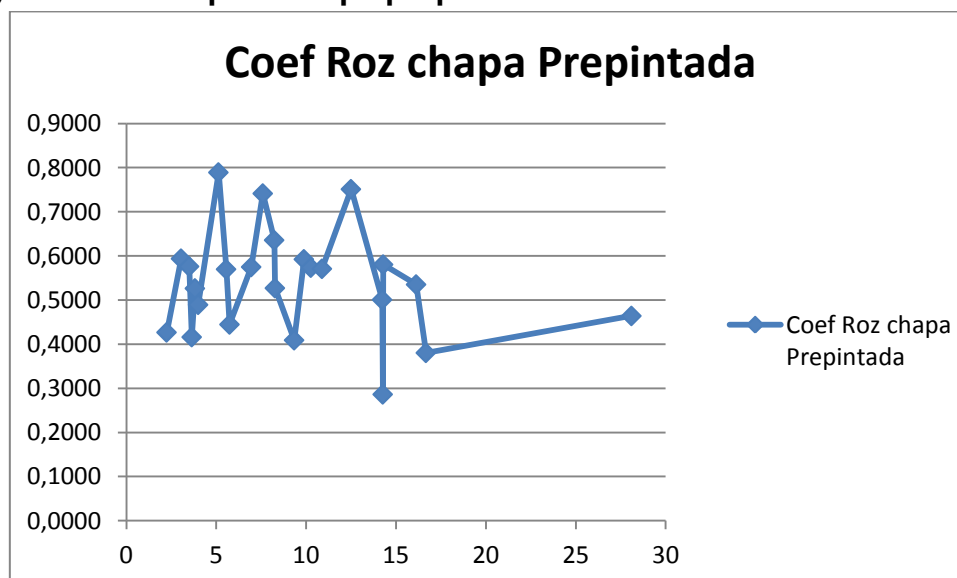
- Chapa prepintada
- Chapa fosfatada

Para cada una de estas dos gráficas, se utilizan otras cuatro, así que tenemos 24 puntos para cada una. Los 24 puntos tienen en común la característica del título de la gráfica. Para la gráfica de chapa prepintada se cogen todos los puntos de todas las gráficas anteriores que se hicieron para chapa prepintada, combinando todos los demás parámetros (mordazas AMPCO 25 y F521, velocidades de 480 y 80 mm/min). Lo mismo para chapa fosfatada.

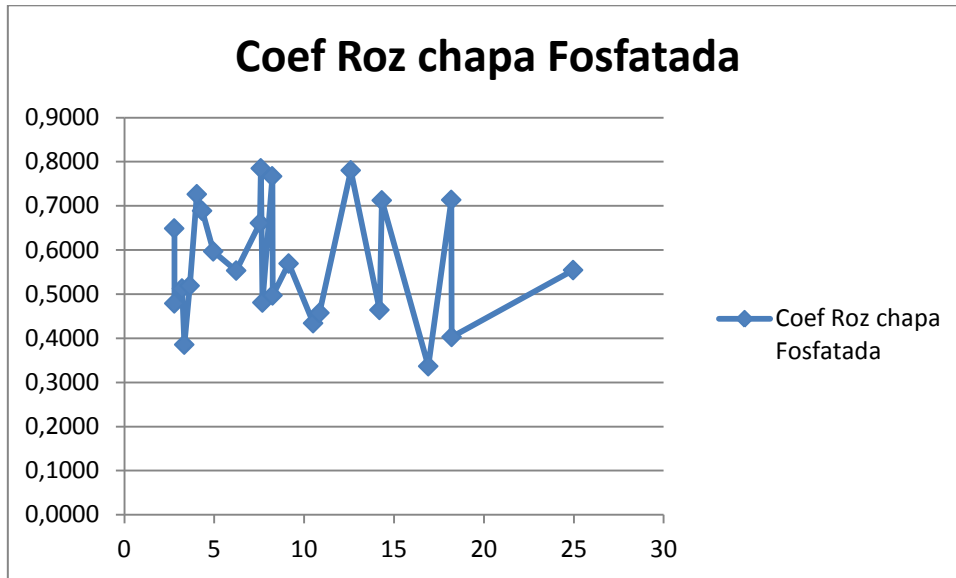
Como la tabla de la sección 3 indica que tenemos 72 ensayos para configuración Rd de utillaje, antes de sacar las gráficas finales debemos hacer la media de las dos repeticiones de mordazas AMPCO 25 para dejar el número de valores en 48, y así cuadrar las combinaciones de estos para las 2 gráficas finales. Finalmente tenemos 2 clasificaciones de 24 valores cada una, de las cuales se sacarán las gráficas.

A continuación se muestran las gráficas con los valores de coeficiente de rozamiento frente a la presión de contacto para cada una de las condiciones. En el anexo IV se incluyen además las tablas con los valores de presión de contacto ordenados de menor a mayor, acompañados de su correspondiente coeficiente de rozamiento. De estas tablas es de donde se han sacado las gráficas.

### 4.2.1) Gráfica final para chapa prepintada



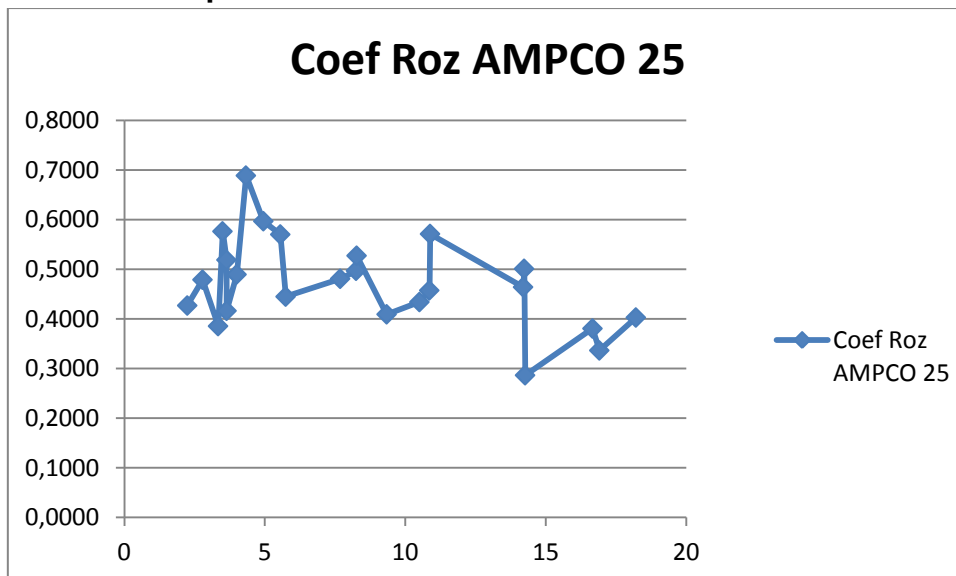
#### 4.2.2) Gráfica final para chapa fosfatada



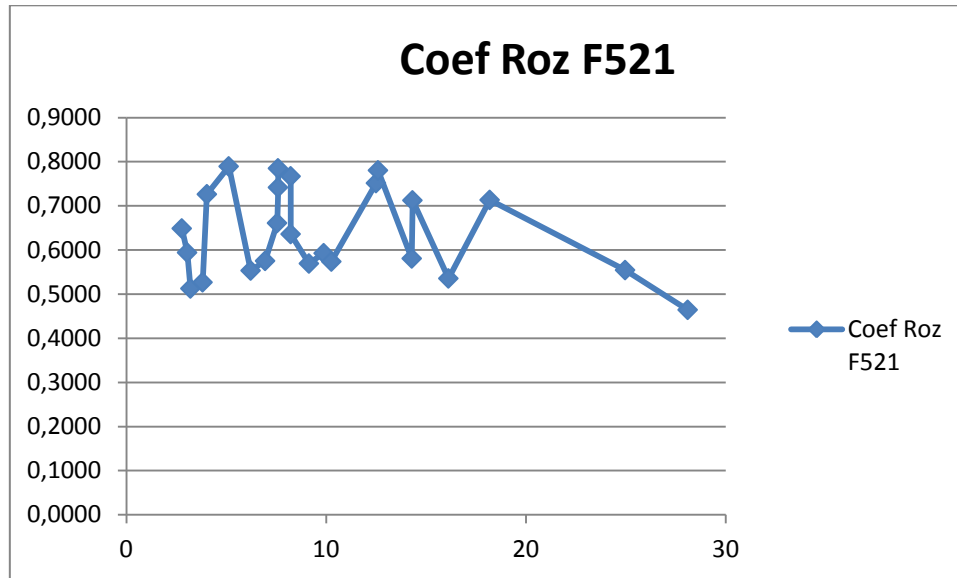
Además, se ha considerado oportuno comparar resultados de mordazas AMPCO 25 y F521, porque se ha visto en los ensayos que con F521 se llegaba a radios menores de plegado, y por tanto a presiones de contacto mayores. Para ello se toman los valores de ensayos con mordazas AMPCO 25 por un lado, y por otro lado los de ensayos con mordazas F521.

Obviamente, los valores de estas gráficas son los mismos que los de las gráficas de chapa prepintada y chapa fosfatada pero ordenados según el tipo de mordazas con las que se realizó el ensayo.

#### 4.2.3) Gráfica final para mordazas AMPCO 25



#### 4.2.4) Gráfica final para mordazas F521



#### 4.3) Análisis del diseño de experimentos con Minitab

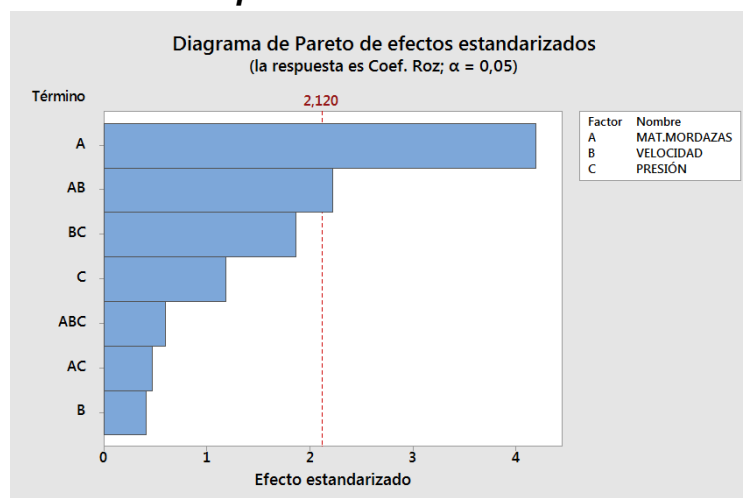
Para poder sacar unas conclusiones más fundamentadas que simplemente observar las gráficas, se ha procedido a realizar un análisis factorial del diseño de experimentos en el software de estadística Minitab. Para ello, hemos creado primero el diseño de experimentos en una hoja Excel con las combinaciones que hemos ensayado, para luego abrirlo en con Minitab y realizar el análisis. El DOE es doble. Uno para chapa prepintada y otro para chapa fosfatada. En el análisis hemos incluido como factores el **material de las mordazas**, la **velocidad de máquina** y la **presión de pisado**, y como salidas el coeficiente de rozamiento, el radio con el que queda plegada la chapa, y la presión de contacto chapa-matriz.

Los valores medios de presión de contacto y coeficiente de rozamiento que hemos calculado para las gráficas finales con mordazas AMPCO 25 los aprovechamos también ahora, y además realizamos el cálculo medio del radio de plegado. Para los ensayos con mordazas F521 no es necesario hacer ninguna media porque solamente se tiene una repetición.

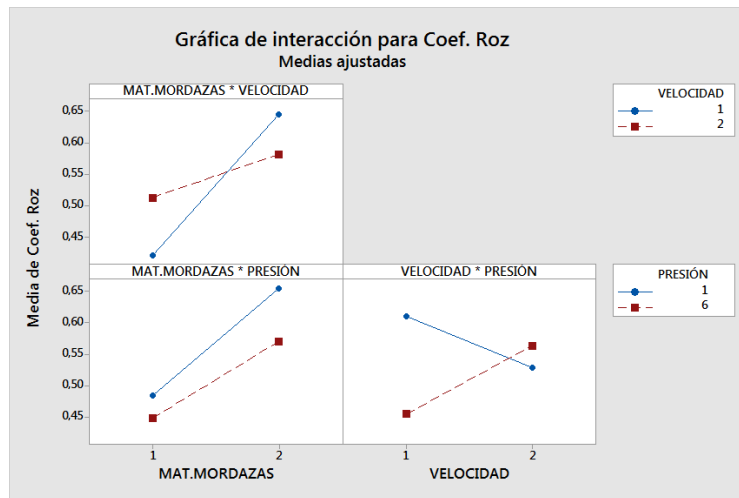
### 4.3.1) Análisis del DOE para chapa prepintada

MAT.MORDAZAS	VELOCIDAD	PRESIÓN	Coef. Roz	Rd	P. de Contacto
1	2	1	0,416	6,2	3,64
1	2	2	0,490	5,45	4,00
1	2	3	0,570	4,45	5,56
1	2	4	0,527	3,45	8,27
1	2	5	0,571	3,2	10,89
1	2	6	0,501	2,825	14,23
1	1	1	0,427	6,95	2,24
1	1	2	0,576	5,2	3,50
1	1	3	0,445	4,575	5,74
1	1	4	0,409	3,65	9,34
1	1	5	0,287	3,2	14,27
1	1	6	0,381	2,825	16,67
2	2	1	0,527	5,2	3,82
2	2	2	0,575	4,2	6,95
2	2	3	0,593	3,2	9,88
2	2	4	0,752	2,7	12,50
2	2	5	0,581	2,7	14,29
2	2	6	0,464	1,95	28,10
2	1	1	0,594	5,2	3,05
2	1	2	0,789	3,7	5,13
2	1	3	0,742	3,2	7,60
2	1	4	0,636	2,7	8,23
2	1	5	0,574	2,7	10,27
2	1	6	0,536	2,2	16,12

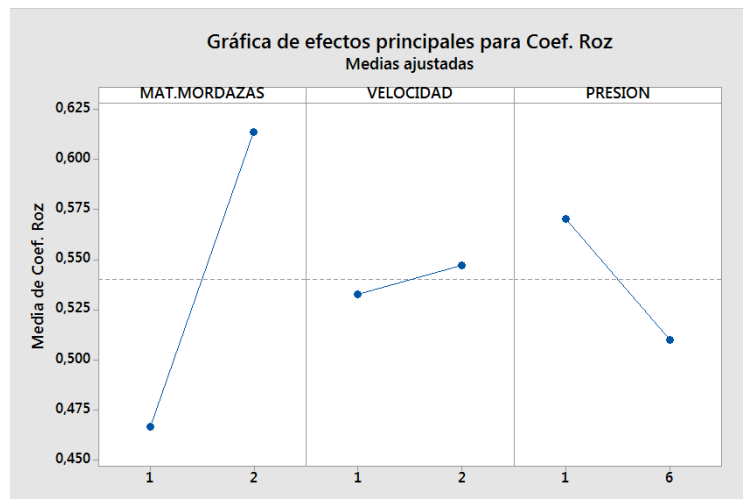
#### 4.3.1.1) Gráficas de efectos para coeficiente de rozamiento



El principal efecto para la respuesta del coeficiente de rozamiento es el material de las mordazas, seguido de la interacción material de las mordazas-velocidad.

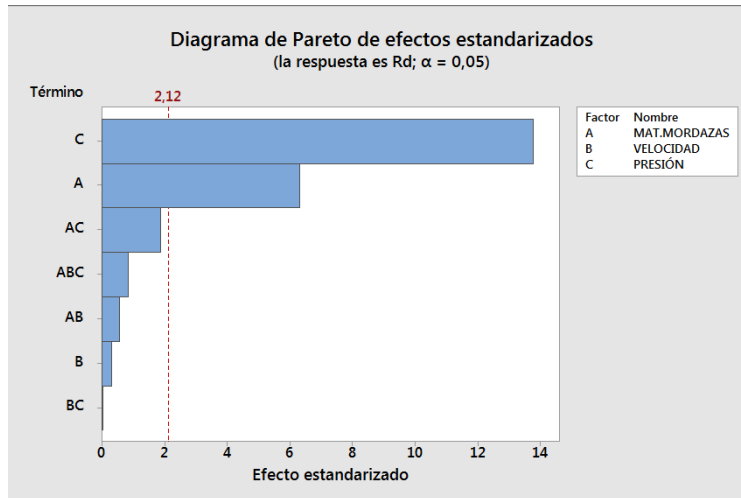


Para la interacción material mordazas-velocidad, observamos que tiene más influencia en el coeficiente de rozamiento la velocidad cuando se utilizan mordazas AMPCO 25 que cuando se utilizan mordazas F521, aunque no es muy grande la diferencia.

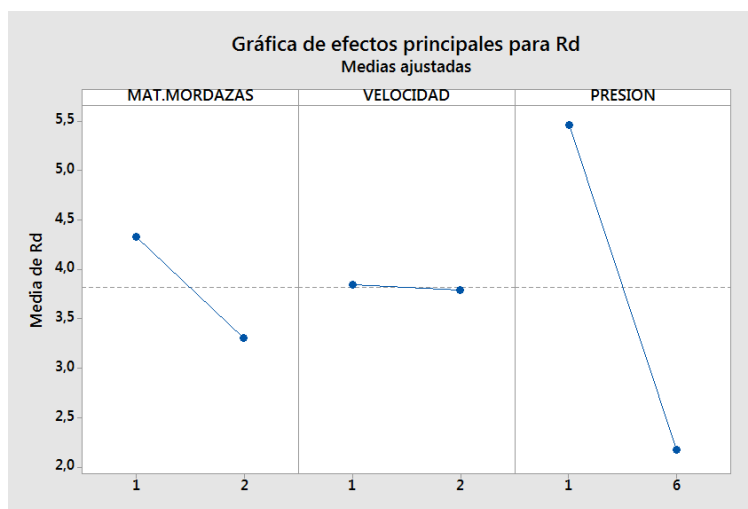


Se obtienen mayores coeficientes de rozamiento con mordazas F521. También, el coeficiente de rozamiento aumenta al disminuir la presión de pisado, y al aumentar la velocidad de la máquina.

#### 4.3.1.2) Gráfica de efectos para radio de plegado de la chapa



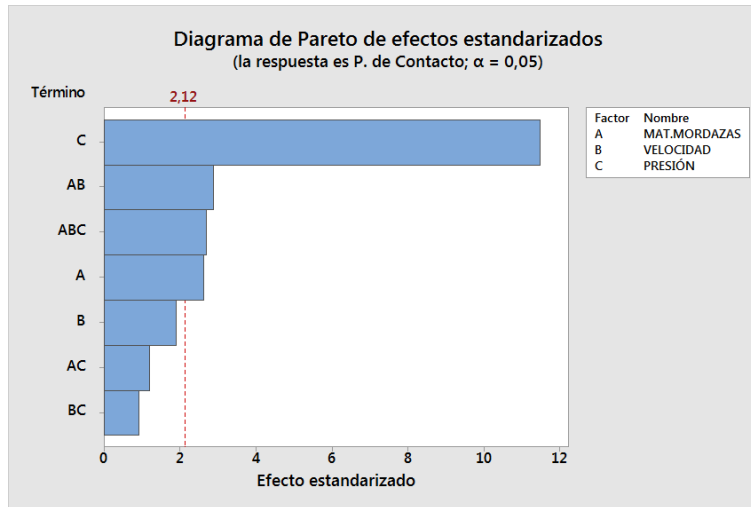
El principal efecto para la respuesta del radio de plegado de la chapa es la presión de pisado. Luego le sigue el material de las mordazas.



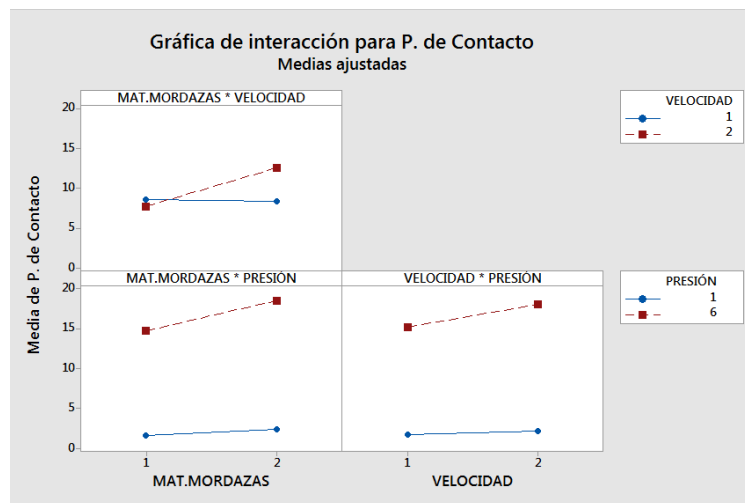
Se obtienen menores radios de plegado sobretodo con mayores presiones de pisado (es lógico y se puede observar directamente en los ensayos). También influye aunque en menor medida el material de las mordazas, de forma que se consiguen menores radios de plegado con mordazas F521. Además, se aprecia una leve tendencia a disminuir el radio conforme se aumenta la velocidad de máquina (aunque es poco influyente).



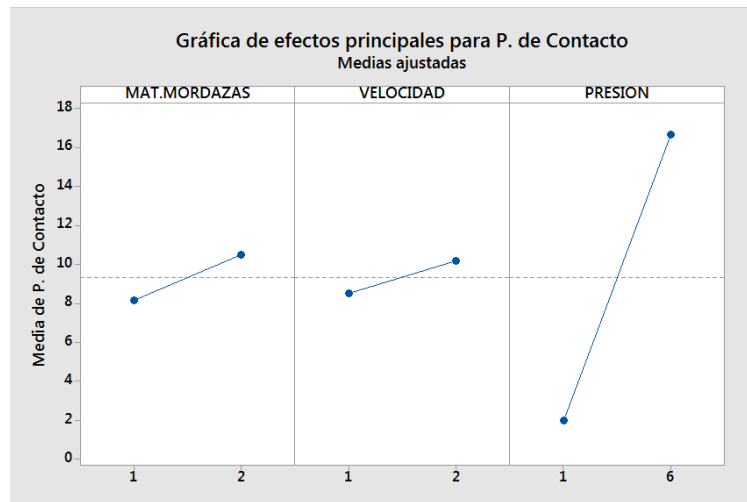
### 4.3.1.3) Gráfica de efectos para presión de contacto chapa-matriz



El principal efecto para la respuesta de la presión de contacto chapa-matriz es la presión de pisado, con mucha diferencia sobre el resto de factores. Luego sigue la interacción material de las mordazas-velocidad, seguido de la interacción material de las mordazas-velocidad-presión, y seguido finalmente del factor material de las mordazas.



En la interacción material mordazas-velocidad, se observa que la velocidad no es influyente en la presión de contacto si se utilizan mordazas AMPCO 25, pero lo es bastante cuando se ensaya con mordazas F521.

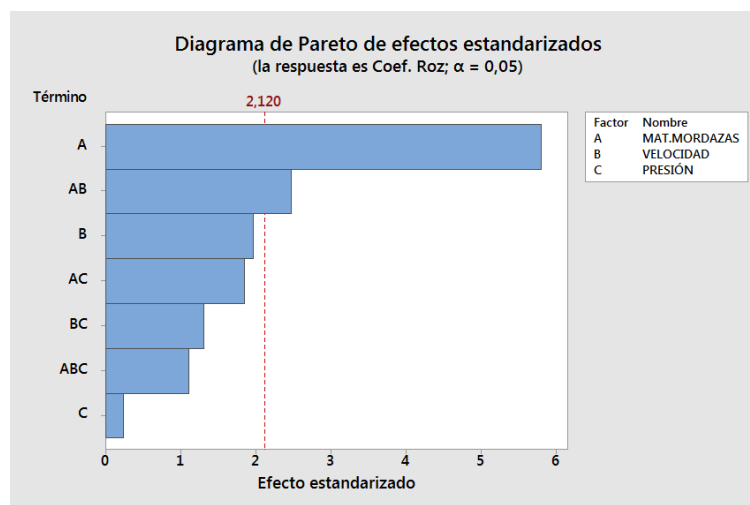


Se obtienen mayores presiones de contacto chapa-matriz sobretodo con mayores presiones de pisado (presión de contacto inversamente proporcional al radio de plegado). También influye aunque en menor medida el material de las mordazas, de forma que se consiguen mayores presiones de contacto con mordazas F521. Se aprecia además una tendencia a aumentar la presión de contacto conforme se aumenta la velocidad de máquina.

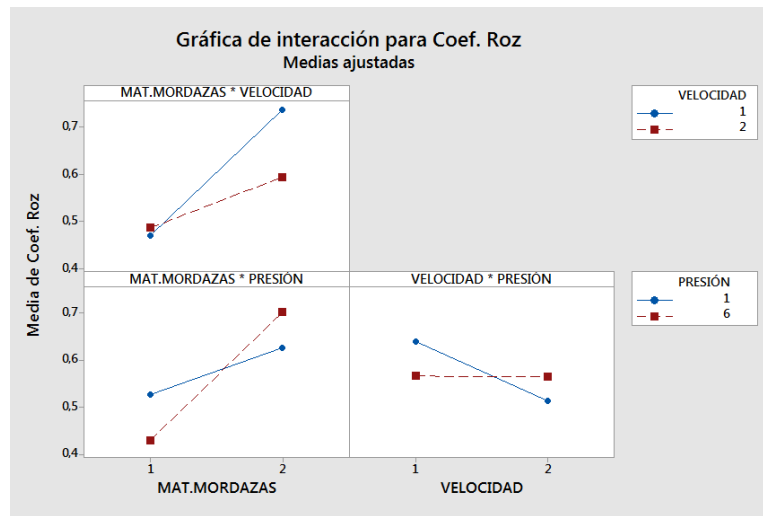
### 4.3.2) Análisis del DOE para chapa fosfatada

MAT.MORDAZAS	VELOCIDAD	PRESIÓN	Coef. Roz	Rd	P. de Contacto
1	2	1	0,386	5,95	3,34
1	2	2	0,519	5,2	3,64
1	2	3	0,597	4,45	4,95
1	2	4	0,497	3,7	8,25
1	2	5	0,457	3,2	10,86
1	2	6	0,464	2,825	14,20
1	1	1	0,479	6,2	2,79
1	1	2	0,689	4,7	4,33
1	1	3	0,481	3,95	7,69
1	1	4	0,434	3,45	10,51
1	1	5	0,337	2,95	16,91
1	1	6	0,403	2,7	18,21
2	2	1	0,513	6,2	3,21
2	2	2	0,553	4,7	6,23
2	2	3	0,661	4,2	7,55
2	2	4	0,569	3,7	9,14
2	2	5	0,712	2,7	14,33
2	2	6	0,554	2,2	24,97
2	1	1	0,649	5,7	2,78
2	1	2	0,726	4,7	4,04
2	1	3	0,785	3,2	7,60
2	1	4	0,767	2,7	8,23
2	1	5	0,780	2,2	12,60
2	1	6	0,713	1,95	18,19

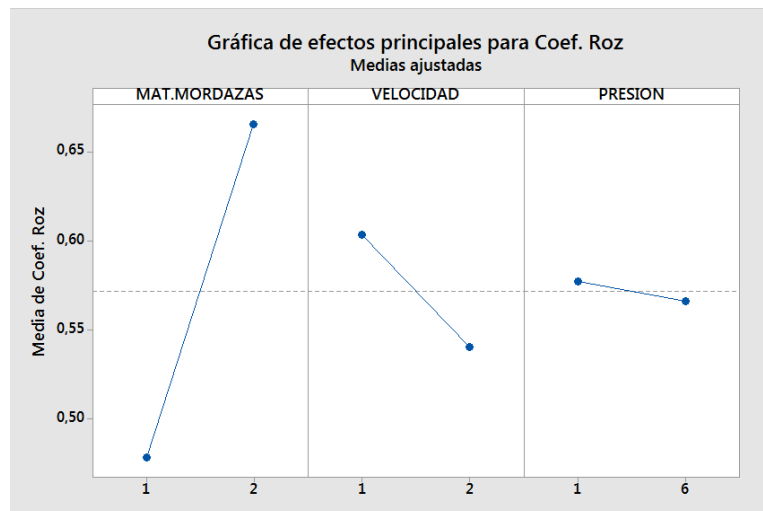
#### 4.3.2.1) Gráfica de efectos para coeficiente de rozamiento



El principal efecto para la respuesta del coeficiente de rozamiento es el material de las mordazas, seguido de la interacción material de las mordazas-velocidad.

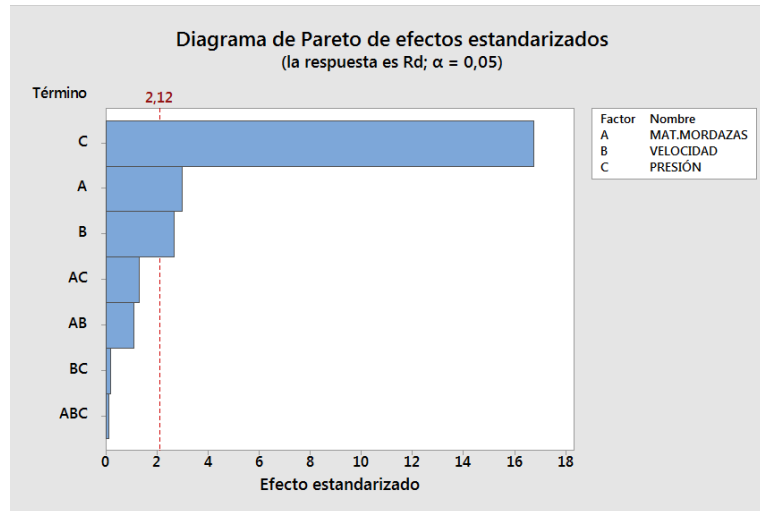


En la interacción material mordazas-velocidad sobre la respuesta coeficiente de rozamiento, se observa que la velocidad no es influyente sobre el coeficiente de rozamiento cuando se ensaya con mordazas AMPCO 25, pero es muy influyente si se utilizan mordazas F521, obteniéndose en este caso mayores coeficientes de rozamiento con velocidad de 80 mm/min.

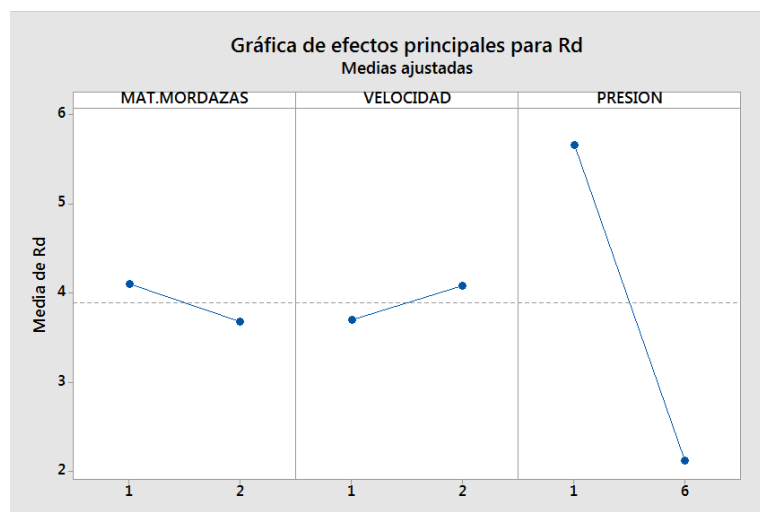


Se obtienen mayores coeficientes de rozamiento con mordazas F521. También, el coeficiente de rozamiento aumenta al disminuir la velocidad de la máquina, y, en menor medida, al disminuir la presión de pisado.

#### 4.3.2.2) Gráfica de efectos para radio de plegado de la chapa

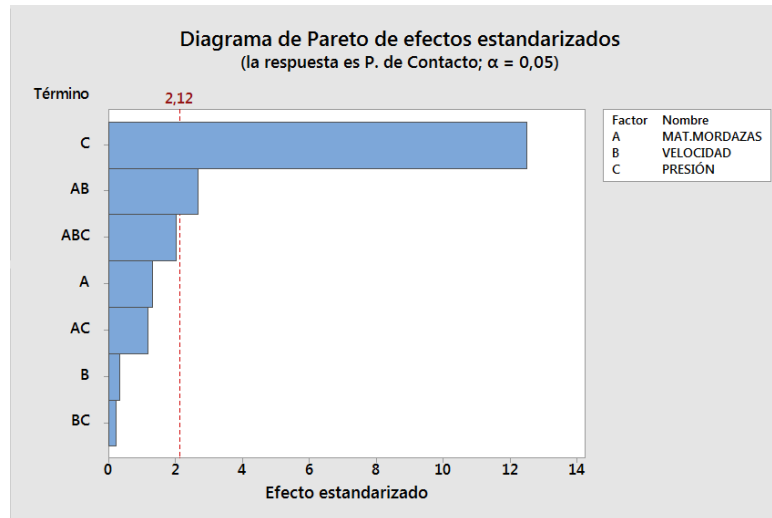


El principal efecto para la respuesta del radio de plegado de la chapa es la presión de pisado. Luego le sigue el material de las mordazas y después la velocidad de máquina.

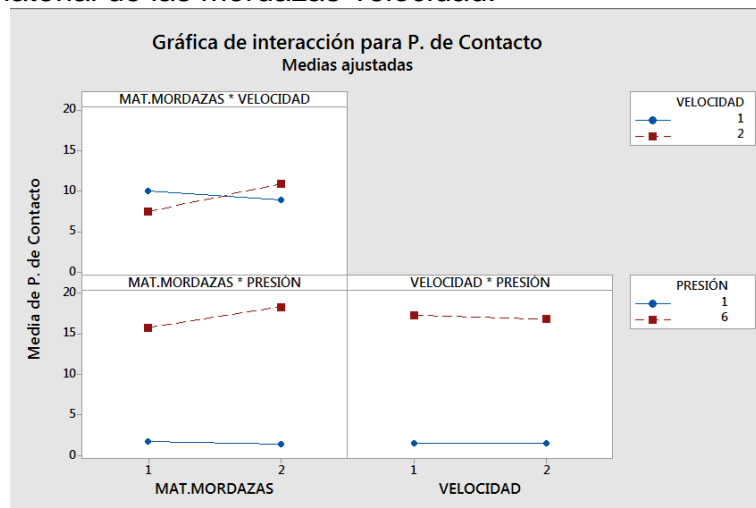


Se obtienen menores radios de plegado con mayores presiones de pisado. También influye aunque en menor medida el material de las mordazas, de forma que se consiguen menores radios de plegado con mordazas F521. Además, se observa una tendencia a disminuir el radio conforme se disminuye la velocidad de máquina.

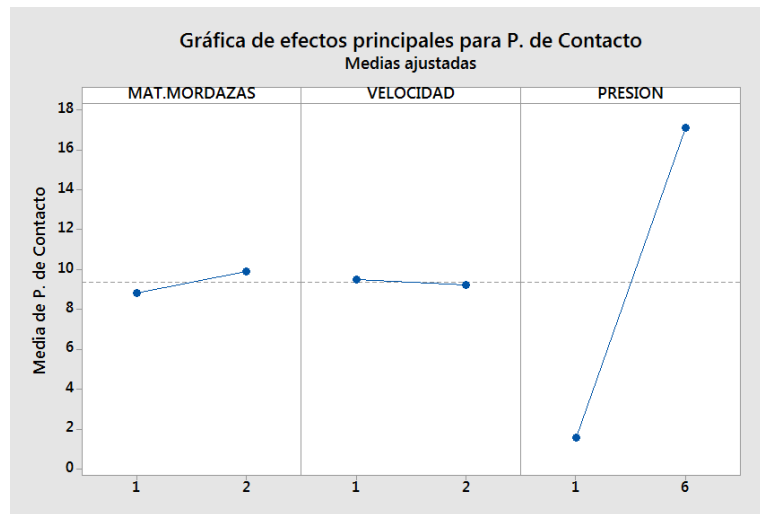
### 4.3.2.3) Gráfica de efectos para presión de contacto chapa-matriz



El principal efecto para la respuesta de la presión de contacto chapa-matriz es la presión de pisado, con mucha diferencia sobre el otro factor, que es la interacción material de las mordazas-velocidad.



Se observa como la interacción material mordazas-velocidad es influyente sobre la presión de contacto de forma que cuando se ha ensayado con mordazas AMPCO 25 se han obtenido mayores presiones de contacto a velocidad de 80 mm/min, mientras que en los ensayos con mordazas F521, se han obtenido mayores presiones de contacto con velocidad de 480 mm/min. Se podría interpretar que con mordazas AMPCO 25, la tendencia de la presión de contacto es a aumentar conforme se disminuye la velocidad de la máquina. Por el contrario, con mordazas F521, la presión de contacto tiende a aumentar conforme se aumenta la velocidad de máquina.



Se obtienen mayores presiones de contacto chapa-matriz sobretodo con mayores presiones de pisado. También influye aunque en menor medida el material de las mordazas, de forma que se consiguen mayores presiones de contacto con mordazas F521. Se aprecia además una leve tendencia a aumentar la presión de contacto conforme se disminuye la velocidad de máquina, aunque apenas es relevante.

## **5) CONCLUSIONES**

Se ha diseñado un utillaje para realizar ensayos simulativos en la máquina universal de ensayos, que puede servir para posteriores pruebas y análisis de coeficientes de rozamiento chapa-matriz en el radio de las matrices para diferentes materiales de chapa, matriz y pisador. La limitación que tiene este utillaje es que no se puede llegar a presiones de contacto en el radio de la matriz superiores a los 28 MPa, fundamentalmente porque la chapa no se adapta a plegarse con radios tan pequeños como el que colocamos de 0,8 mm.

Se propone como mejora la colocación de un bloque detrás de la matriz que deje el espacio justo para que fluya la chapa, forzando así el radio de 0,8 aunque el inconveniente de esto sería saber cómo influye el contacto de este bloque al rozamiento chapa-matriz.

De los ensayos realizados podemos concluir que:

Las gráficas finales se ajustan a curvas donde el coeficiente de rozamiento disminuye conforme aumenta la presión de contacto chapa-matriz en el radio de la matriz. Aún así, resultaría conveniente realizar más ensayos para caracterizar mejor estas curvas, ya que los valores tienen cierta dispersión.

Tanto para chapa prepintada como para chapa fosfatada, el factor más influyente en el coeficiente de rozamiento en el radio de la matriz es el material de las mordazas de pisado, obteniéndose mayores coeficientes de rozamiento con mordazas F521. También influye de igual manera para ambas caras de la chapa la presión de pisado en lo que a presión de contacto se refiere, obteniéndose mayores presiones de contacto al aumentar la presión de pisado. Igualmente ocurre con el radio de plegado de la chapa pero a la inversa, disminuyendo el radio al elevar las presiones.

En chapa prepintada, el coeficiente de rozamiento aumenta al aumentar la velocidad de la máquina. No ocurre así en chapa fosfatada, donde el coeficiente de rozamiento disminuye al aumentar la velocidad.

Para ambas caras de la chapa, se llega a niveles superiores de presión de contacto con mordazas F521, aunque la diferencia apenas es de 4 MPa. Esto se debe a que las mordazas F521 generan una mayor fuerza de retención porque existe un mayor coeficiente de rozamiento entre este material y la chapa.

Cabe decir que se puede mejorar la precisión en las mediciones, ya que la presión de pisado la ajustábamos con una bomba manual mirando el valor en un manómetro. Sería recomendable utilizar una célula de carga de compresión para fijar correctamente este valor de fuerza normal. También existe



imprecisión en la forma de tomar las medidas del radio exterior de la chapa debido a que se han medido manualmente con unas galgas que miden por intervalos de radio, pero no son capaces de tomar la medida exacta. Un resultado de estas imprecisiones podrían ser los valores tan elevados de coeficientes de rozamiento chapa-matriz a los que se ha llegado.

## 6) BIBLIOGRAFÍA

- Artículo “*Lubricant test Methods for sheet metal forming*” de los autores N.Bay, D.D. Olsson y J.L. Andreasen.
- Artículo “*Evaluation of stamping lubricants using the deep drawing test*” de los autores Hyunok Kim, Ji Hyun Sung, Rajesh Sivakumar y Taylan Altan.
- Artículo “*An experimental study on forming characteristics of pre-coated sheet metals*” de los autores H.Y.Kim, B.C.Hwang y W.B.Bae.
- Artículo “*Determination of the frictional properties of coated steel sheets*” del autor Andrzej Matuszak.
- Artículo “*Effects of lubrication and die radii on the friction behavior of Pb-coated sheet steels*” de los autores Zhi Deng y M.R.Lovell.
- Artículo “*Friction measurement apparatus for sheet metal forming*” de los autores S.Hao, B.E. Klamecki y S. Ramalingam.
- Artículo “*The Influence of Tool Geometry on Friction Behavior in Sheet Metal Forming*” del autor S.S.Han.
- Artículo “*A technical note on an experimental device to measure friction coefficient in sheet metal forming*”, de los autores L.Fratini, S.Lo Casto y E. Lo Valvo.
- Libro “*Marcianak – Mechanics of Sheet Metal Forming*”.
- Libro “*Timoshenko*” (cálculo de la flexión en el rodillo).
- Norma UNE-EN 10130 de mayo de 2008; “*Productos planos laminados en frío de acero bajo en carbono para embutición o conformación en frío*”.
- Diseño de experimentos de ensayos con configuración plana de utillaje.
- Resultados de experimentos de ensayos con configuración plana de utillaje.

**ANEXOS**



# ANEXO I

Pruebas y cálculos para determinar el diámetro del  
rodillo necesario en el utillaje

En este anexo se pretende explicar el porqué del descarte del rodillo en el utillaje a diseñar, así como la decisión de colocar un bloque de gran sección con un redondeo. Para ello, se explican los cálculos realizados en la hoja Excel siguiendo las formulas mostradas en la sección 1 de la memoria.

SELECCIÓN DIÁMETRO RODILLO		
Nu_1	0,1	[ad]
Nu_2	0,25	[ad]
Fn	10000	[N]
Ft	2000	[N]
W	40	[mm]
t	0,8	[mm]
$\sigma$	62,50	[N/mm <sup>2</sup> ]
P_máx	100	[N/mm <sup>2</sup> ]
R	0,50	[mm]
<b>D = 1,00 [mm]</b>		
FLECHA QUE EXPERIMENTA EL RODILLO		
P	3600	[N]
E	210000	[N/mm <sup>2</sup> ]
I	0,05	[mm <sup>4</sup> ]
L	200	[mm]
<b><math>\Delta = 58205,24</math> [mm]</b>		
DATOS INICIALES		
W	40	[mm]
P_máx	80	[N/mm <sup>2</sup> ]
L	343	[mm]

**Figura 1, anexo I.** Captura de pantalla de la hoja Excel que se diseñó para hallar el diámetro de rodillo necesario para llegar a la presión que queremos. Así como la flecha que experimentaría el rodillo en esas condiciones. En esta captura, se muestra el diámetro necesario para  $P=100$  MPa y  $W=40$  mm.

En la figura 1 de este anexo se ha calculado el diámetro del rodillo para las mismas condiciones que el ejemplo de la memoria ( $P=100$ MPa). Sale un diámetro de rodillo de 1 mm, por lo que es imposible que aguante ningún tipo de fuerza. En la segunda parte de la hoja Excel, lo que se calcula es la flecha que experimenta el rodillo para la fuerza  $P$  calculada (cálculo en la memoria). Para este caso concreto, la flecha que experimentaría el rodillo es de 58 metros. Esto nos va dando una idea de que con un rodillo no se va a poder llegar a presiones altas.

Para el cálculo que se ha realizado en la hoja Excel para hallar la flecha que experimenta el rodillo cuando es sometido a la fuerza de la chapa, se consultó el libro “Timoshenko” de resistencia de materiales, donde aparecen varias fórmulas ya disponibles (no hace falta hallarlas con un método general como podría ser el de los trabajos virtuales) para diferentes casos de flexión de barras biapoyadas.

Para este caso interesaba tomar la fórmula del caso de una barra biapoyada en ambos extremos, que es la simplificación de nuestro rodillo amarrado a las paredes laterales del utillaje.

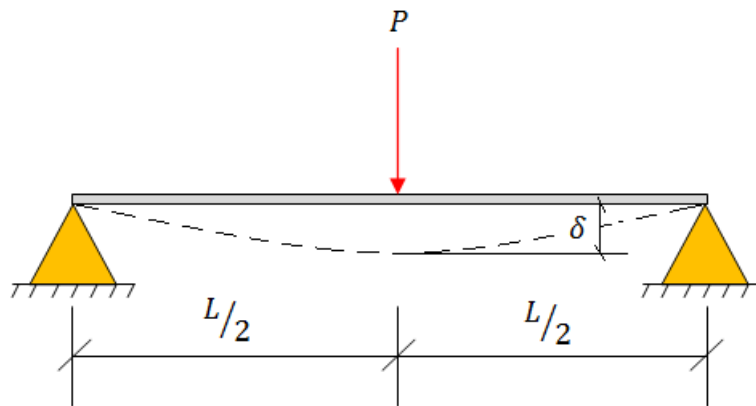


Figura 2, anexo I. Esquema de la flexión del rodillo.

Caso para el que:

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{PL^3}{48EI}$$

Donde nuestros datos para el rodillo son:

$$E \approx 210 \text{ GPa}$$

$$I = \frac{\pi D^4}{64}$$

$L = 343 \text{ mm}$  (anchura de la placa ranurada, como se explica en el anexo 2)

Estos datos se introducen en la hoja Excel y se halla el valor de  $\delta$  para los diferentes valores de  $D$  que nos vayan saliendo.

Volviendo a la hoja Excel, probamos ahora con una presión de  $60 \text{ MPa}$  como máxima a la que se quisiera llegar y esto es lo que nos sale:

SELECCIÓN DIÁMETRO RODILLO								
Nu 1	0,1	[ad]	W	40	[mm]	P máx	60	[N/mm <sup>2</sup> ]
Nu 2	0,25	[ad]	t	0,8	[mm]			
Fn	10000	[N]						
Ft	2000	[N]						
			$\sigma$	62,50	[N/mm <sup>2</sup> ]	R	0,83	[mm]
			<b>D = 1,67 [mm]</b>					
FLECHA QUE EXPERIMENTA EL RODILLO						DATOS INICIALES		
P	3600	[N]				W	40	[mm]
E	210000	[N/mm <sup>2</sup> ]				P máx	80	[N/mm <sup>2</sup> ]
I	0,38	[mm <sup>4</sup> ]				L	343	[mm]
L	200	[mm]	<b><math>\Delta = 7543,40</math> [mm]</b>					

Figura 3, anexo I. Idéntica a la figura 1, solo que esta vez se calcula el diámetro para  $P=60 \text{ MPa}$  y  $W=40 \text{ mm}$ .

Para conseguir una presión de 60 MPa, el diámetro mínimo del rodillo que habría que poner es de 1,67 mm, y experimentaría una flecha máxima de más de 7 metros.

Casi descartamos completamente la idea de colocar un rodillo en el utillaje para conseguir este rango de presiones, porque sufrirían deformaciones muy elevadas que no nos permitirían medir nada al colocar el utillaje en la máquina. Pero para descartarlo por completo, probamos con cambiar el parámetro de anchura de chapa, y pasamos de 40 a 20 mm. Recordamos que una reducción de la sección transversal de la chapa también consigue aumentos en la presión de contacto.

SELECCIÓN DIÁMETRO RODILLO								
Nu_1	0,1	[ad]	W	20	[mm]	P_máx	60	[N/mm <sup>2</sup> ]
Nu_2	0,25	[ad]	t	0,8	[mm]			
Fn	10000	[N]						
Ft	2000	[N]						
			σ	125,00	[N/mm <sup>2</sup> ]	R	1,67	[mm]
			<b>D = 3,33 [mm]</b>					
FLECHA QUE EXPERIMENTA EL RODILLO						DATOS INICIALES		
P	3600	[N]				W	40	[mm]
E	210000	[N/mm <sup>2</sup> ]				P_máx	80	[N/mm <sup>2</sup> ]
I	6,06	[mm <sup>4</sup> ]				L	343	[mm]
L	200	[mm]						
			<b>Δ = 471,46 [mm]</b>					

Figura 4, anexo I. Idéntica a las figuras 1 y 3, solo que esta vez se calcula el diámetro del rodillo para P=60 MPa y W=20 mm

Aun suponiendo que cortáramos las chapas de una anchura W=20 mm, y se quisiera llegar solamente a 60 MPa de presión de contacto, el diámetro necesario de rodillo sería D=3,33 mm, y experimentaría una deformación de casi medio metro, por lo que resulta inútil colocar un rodillo para estos ensayos.



# ANEXO II

## Etapas en el diseño del utillaje



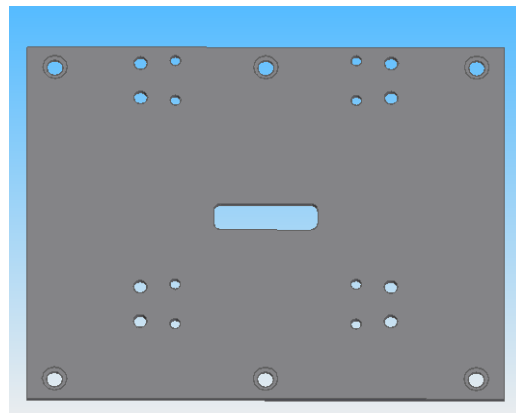
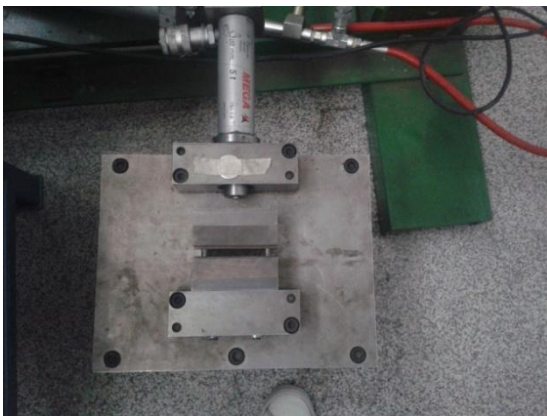
## 1) Introducción

Como ya se explica en la memoria, el primer paso es medir la placa de anclaje para diseñar el utillaje centrado con esta placa.



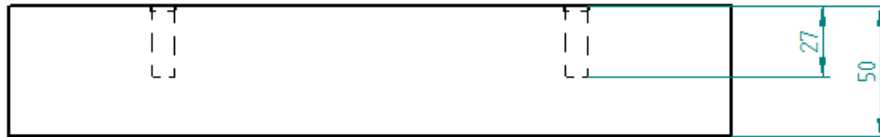
**Figura 1, anexo II.** Fotografía y vista en SolidEdge de la placa de anclaje del utillaje. Esta imagen ya se muestra en la introducción de este trabajo.

La otra pieza que se va a aprovechar es la placa ranurada en la cual se atornillan las mordazas y el cilindro. Esta placa es la que se utilizó para el cálculo de los coeficientes de rozamiento en las zonas planas (pisado), con la configuración de utillaje que se diseñó en aquel momento. Las mordazas, el cilindro y la bomba impulsora de aceite también son las utilizadas en los ensayos anteriores.

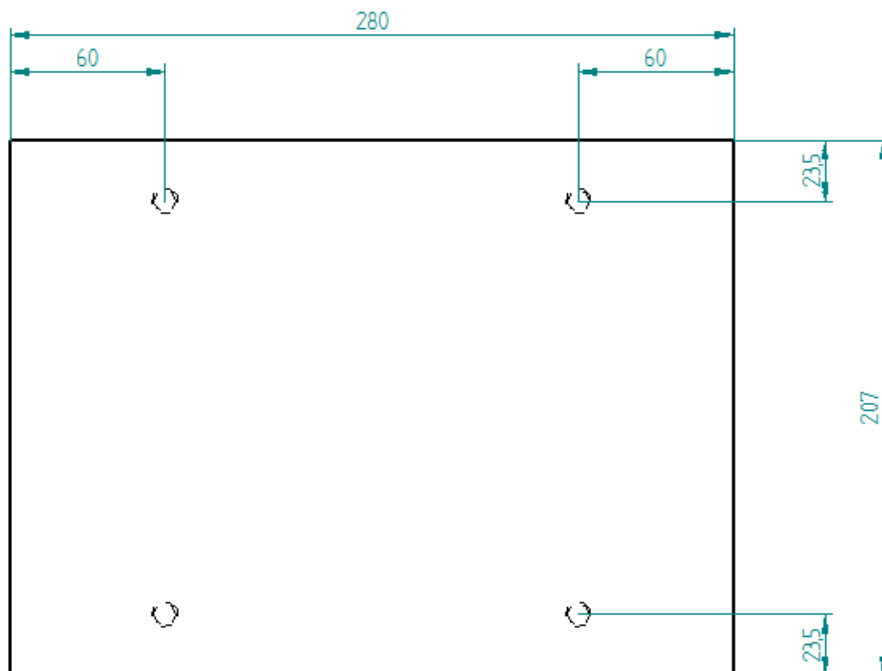


**Figuras 2 y 3, anexo II.** Fotografía de la placa ranurada con las mordazas y cilindro, y vista en SolidEdge de la placa ranurada sola, respectivamente.

Para comenzar, partimos midiendo la placa de anclaje con un calibre. A continuación se muestran las medidas tomadas de la placa de anclaje:



**Figura 4, anexo II.** Vista de alzado de la placa de anclaje del utillaje a la máquina.



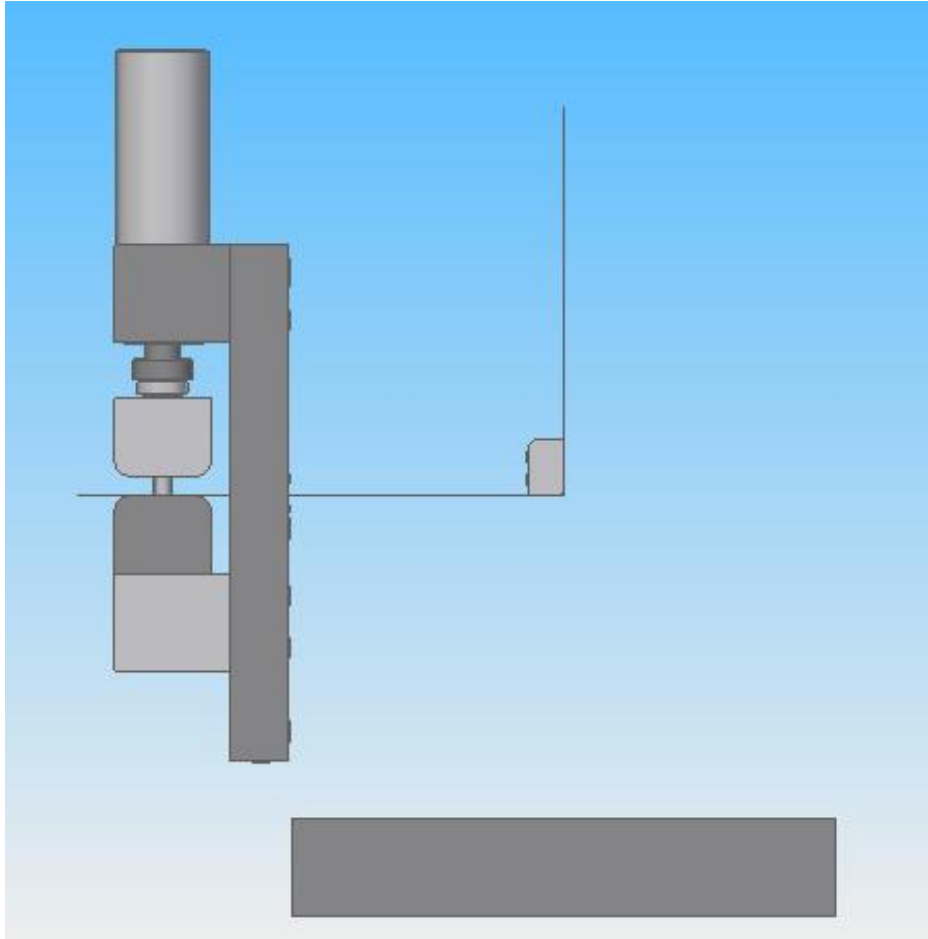
**Figura 5, anexo II.** Vista de planta de la placa de anclaje del utillaje a la máquina.

Ahora que conocemos las medidas de la placa de anclaje, debemos diseñar todo el conjunto del utillaje de forma que la parte de chapa que queda plegada hacia arriba, esté alineada con el centro de la placa esta placa.

## 2) Primera etapa

El uso de la placa ranurada del utillaje anterior ya nos determina en gran parte la forma del utillaje, ya que ésta debe quedar en posición vertical para que las mordazas queden como se muestra en la figura 16 de la memoria. Si esta placa se posiciona de forma vertical, el diseño toma la forma de la figura 6 de este anexo, donde se muestra la placa de anclaje a la máquina, y la placa que sostiene las mordazas, que cuenta con una ranura para que pase la chapa a través de ella. En la figura 6 también se muestra por primera vez la chapa

plegada sin rodillo, sino que aparece con el bloque con redondeo que se determino colocar finalmente.



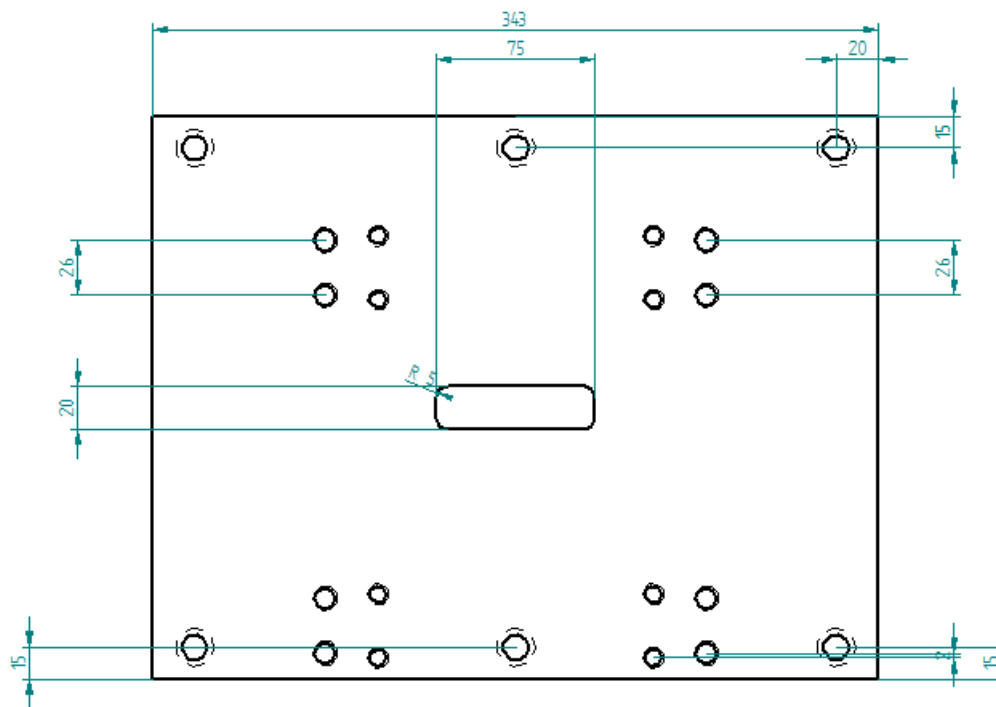
**Figura 6, anexo II.** Vista en SolidEdge de la placa ranurada con las mordazas y el cilindro montados sobre ella, así como la placa de anclaje, el bloque con redondeo y la chapa a ensayar plegada en forma de “L”.

Para continuar con el diseño, debemos conocer las dimensiones de la placa ranurada, y así poder adaptar lo mejor posible las demás piezas que diseñemos a ella.

A continuación se adjuntan las vistas que nos proporciona SolidEdge de esta pieza tal y como se utilizó para la configuración plana de utillaje (luego se le harán unas modificaciones).



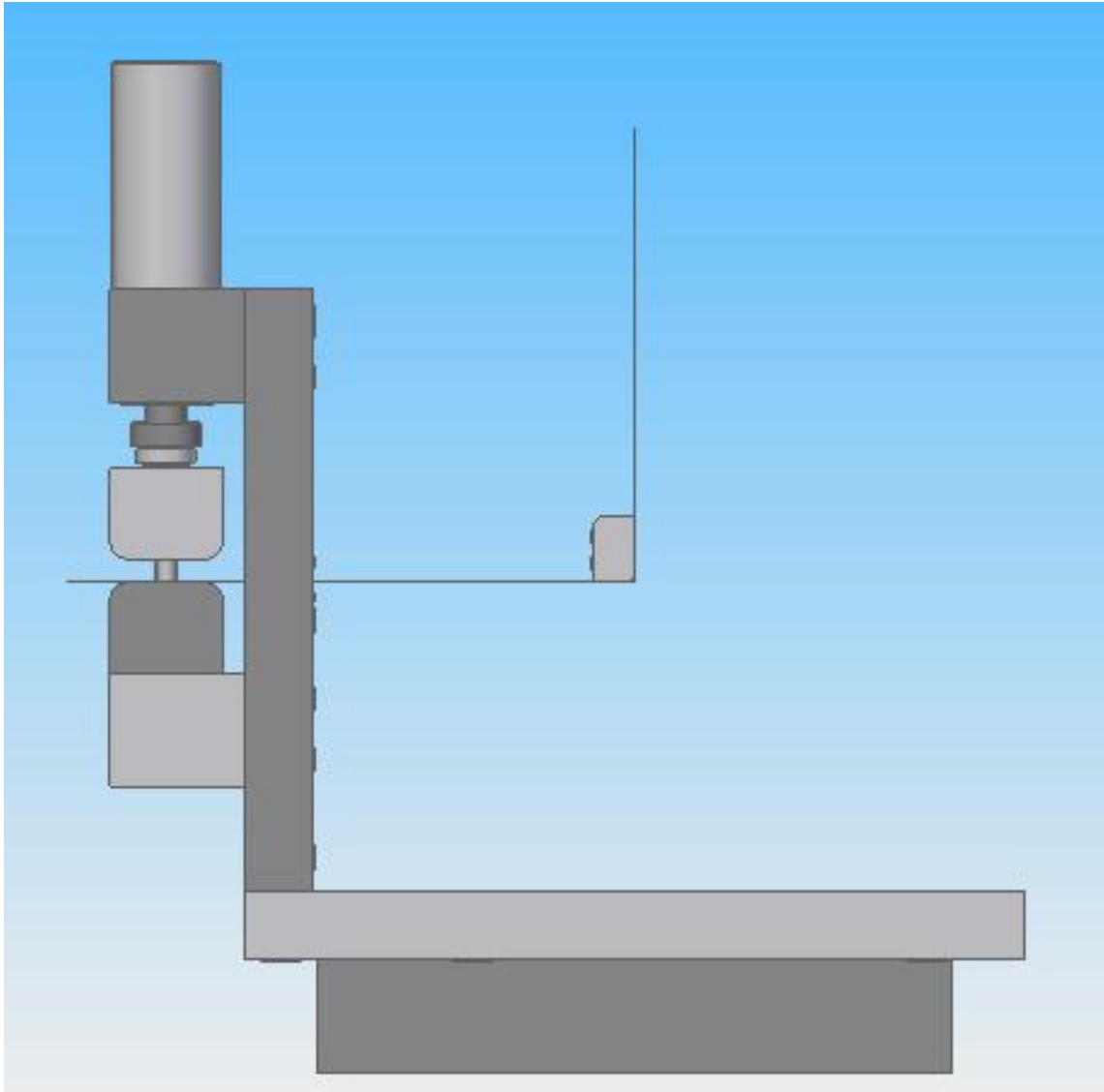
**Figura 7, anexo II.** Vista de alzado de la placa ranurada.



**Figura 8, anexo II.** Vista de planta de la placa ranurada.

### 3) Segunda etapa

Observando el primer boceto del utillaje, se consideró oportuno situar una placa que haga de base de todo el conjunto, y que a su vez se amarre a la placa de anclaje de la máquina, de tal forma que se pueda montar todo el utillaje sobre ella, y luego transportarlo todo junto hasta la placa de anclaje.

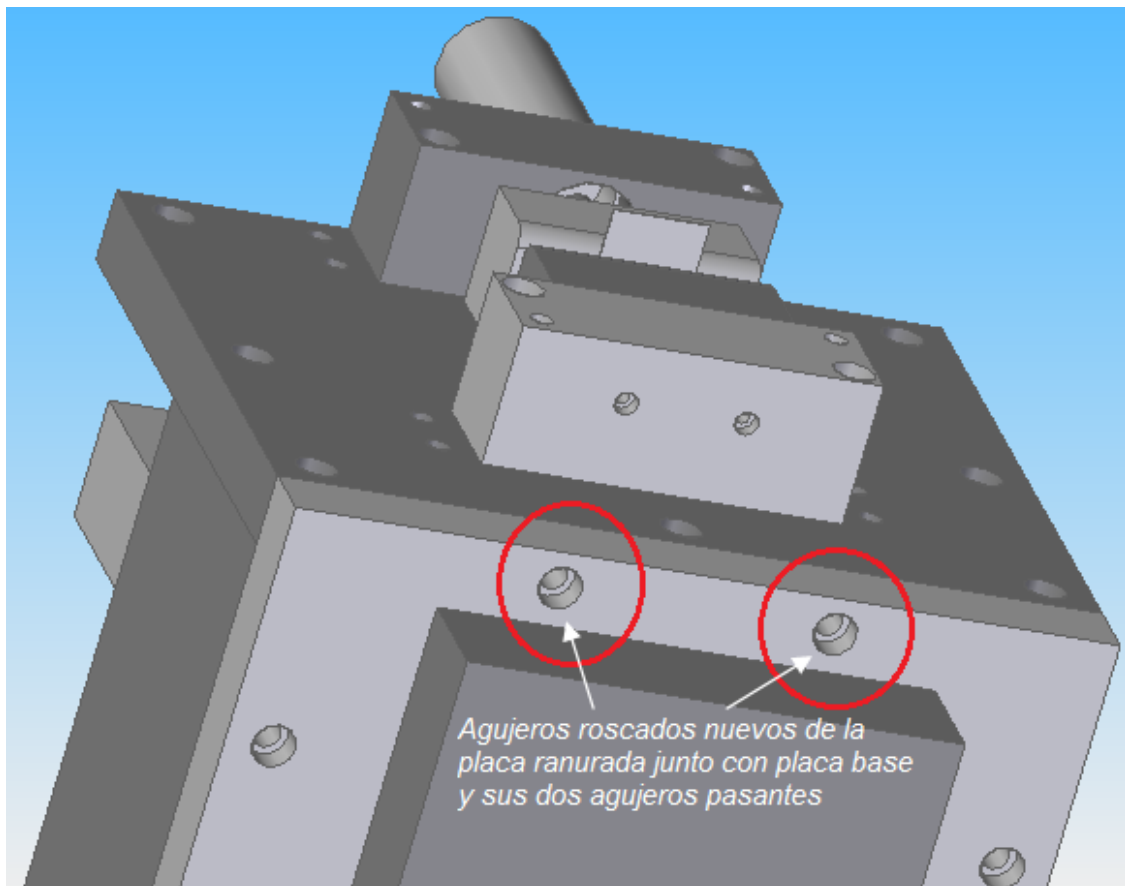


**Figura 9, anexo II.** Vista en SolidEdge de la placa ranurada con las mordazas y el cilindro montados sobre ella, así como la placa de anclaje, el bloque con resondeo, la chapa a ensayar plegada en forma de “L”, y la placa base de todo el utillaje.

En la figura 9, vemos como el diseño del utillaje va tomando forma. A partir de este boceto, se toman dos decisiones.

#### 4) Tercera etapa

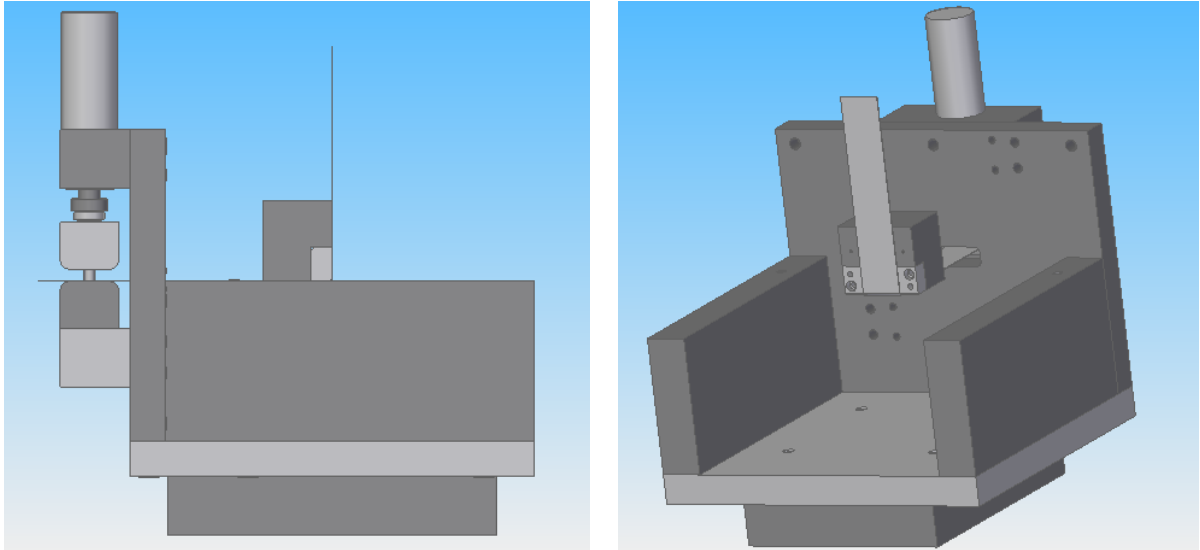
Primero, se decide que hay que mecanizar unos agujeros roscados por su parte inferior, en la placa que sostiene las mordazas (placa ranurada), para así poder amarrarla a la placa base del utillaje. Esta es una de las modificaciones que se le realizan a esta placa. A continuación se adjunta una figura explicativa de estos dos agujeros roscados junto con la placa base que se comenta en la segunda etapa.



**Figura 10, anexo II.** Vista en SolidEdge del utillaje desde abajo, donde se muestran, rodeados en rojo, los dos agujeros roscados que hay que mecanizar en la placa ranurada, junto con los dos agujeros pasantes de la placa base diseñada.

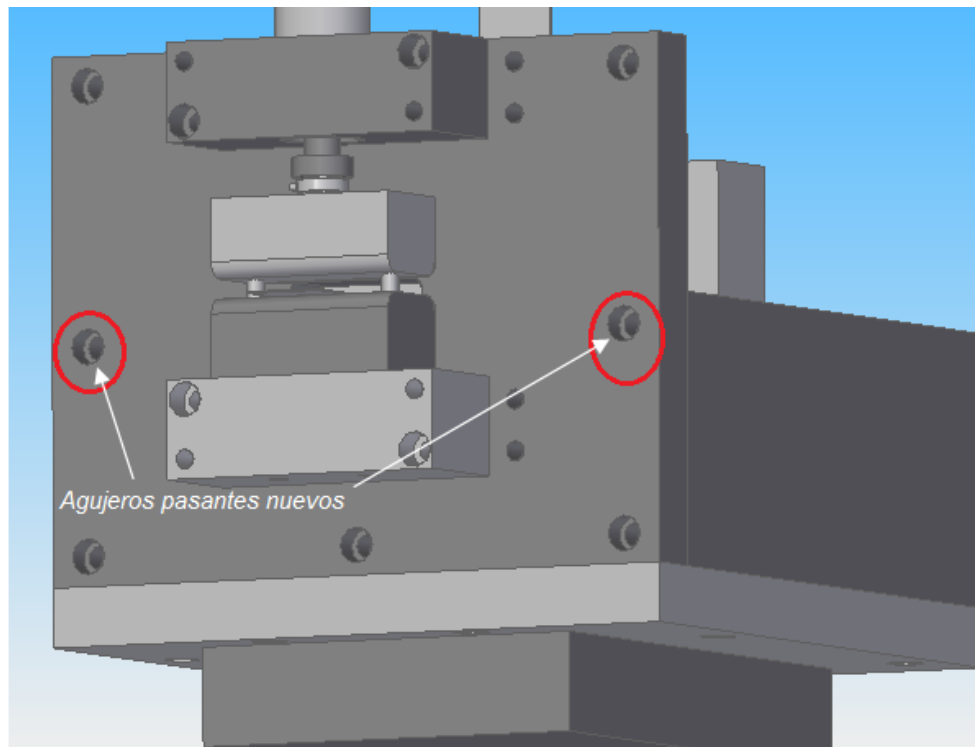
La otra decisión que se toma es que hay que colocar unas placas en los laterales del utillaje para que le den consistencia (en la figura 10 ya aparecen estas placas laterales), ya que con el diseño que se tiene hasta ahora, es muy probable que el amarre entre la base y la placa de las mordazas se deteriore debido al momento generado al someterse a la fuerza de la máquina. Además, al colocar estas placas laterales se podría facilitar la colocación del travesaño que sujete el bloque con el redondeo. Hay que tener presente que el bloque con redondeo ya “existe”, es decir, ya se mecanizó para colocarlo en una

matriz. Este bloque tiene una anchura muy inferior a la anchura del utillaje y por eso parece una buena idea amarrarlo a un travesaño que vaya de lado a lado.



**Figuras 11 y 12, anexo II.** Vistas en SolidEdge de perfil y posterior, respectivamente, del utillaje diseñado hasta ahora. En estas imágenes se incorporan las dos placas laterales.

Por otra parte, al decidir colocar las placas laterales, se toma la decisión de mecanizar en la placa ranurada vertical otros dos agujeros pasantes a media altura para que se atornille por ahí a las dos placas laterales. Esta placa ya contaba con dos agujeros (uno a cada extremo) en su parte inferior que también aprovecharemos para atornillar y dar mayor consistencia al utillaje.

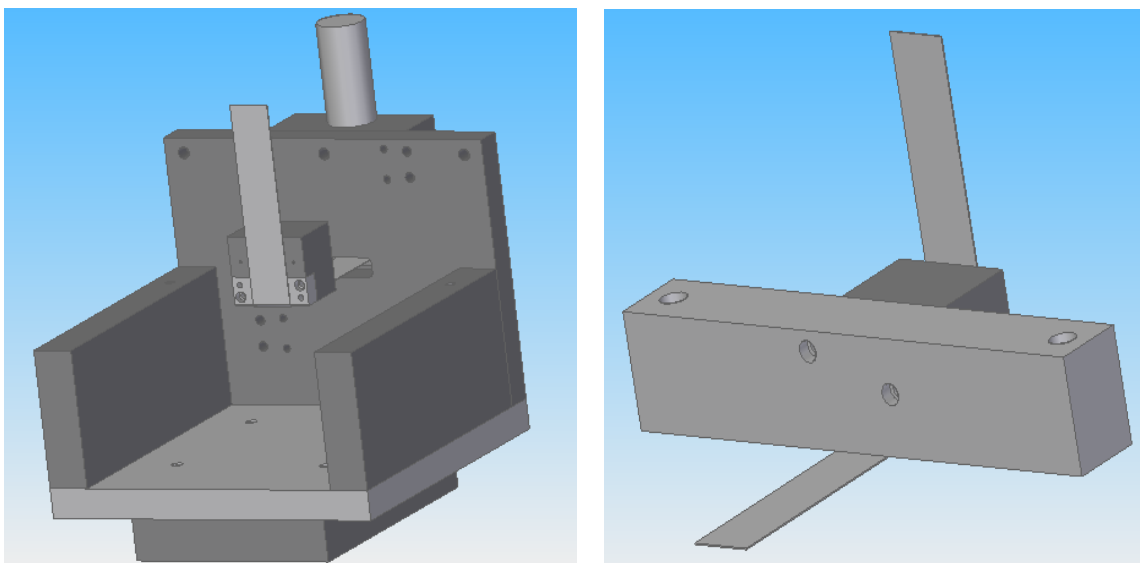


**Figura 13, anexo II.** Vista detalle en SolidEdge de los dos agujeros pasantes que se añaden a la placa ranurada para atornillarla a las paredes laterales.



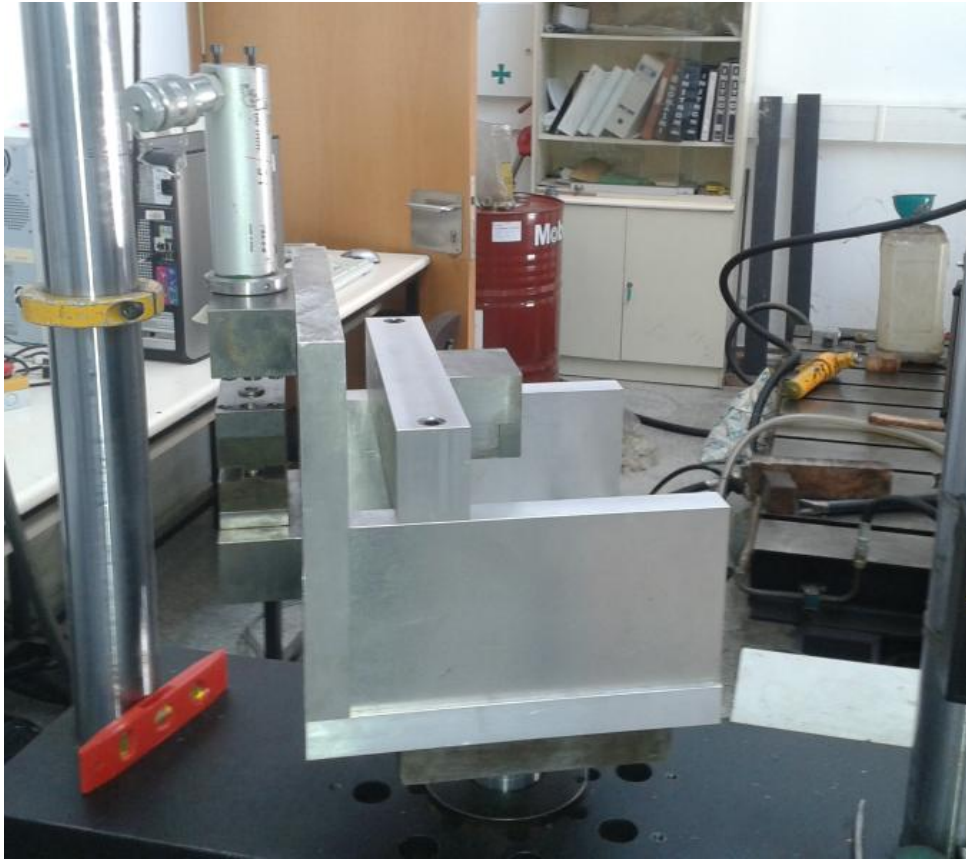
### 5) Cuarta etapa

En las figura 14 se muestra el utillaje con las placas laterales y el bloque con su postizo redondeado. Se aprecia perfectamente la anchura del bloque redondeado respecto al conjunto del utillaje, por lo que finalmente se determina amarrarlo a un travesaño que vaya de lado a lado del utillaje apoyado en las placas laterales. Como el bloque soporte del postizo ya dispone de dos agujeros roscados en su parte posterior, se ha decidido que se atornille al travesaño por ahí, lo que nos induce a mecanizar en el travesaño dos agujeros pasantes que permitan el amarre desde “atrás”.



**Figuras 14 y 15, anexo II.** Vistas en SolidEdge que muestran respectivamente el utillaje completo (sin el travesaño) visto desde atrás, montado sobre la placa de anclaje a la máquina, y una vista del travesaño junto con la matriz y el postizo visto desde atrás.

El montaje de la figura 15 (sin la probeta de chapa) es necesario hacerlo antes de atornillar el travesaño a las dos paredes laterales, por la incomodidad que supone atornillar la matriz al travesaño una vez que el travesaño está colocado, porque queda poco hueco entre este y la placa ranurada vertical.

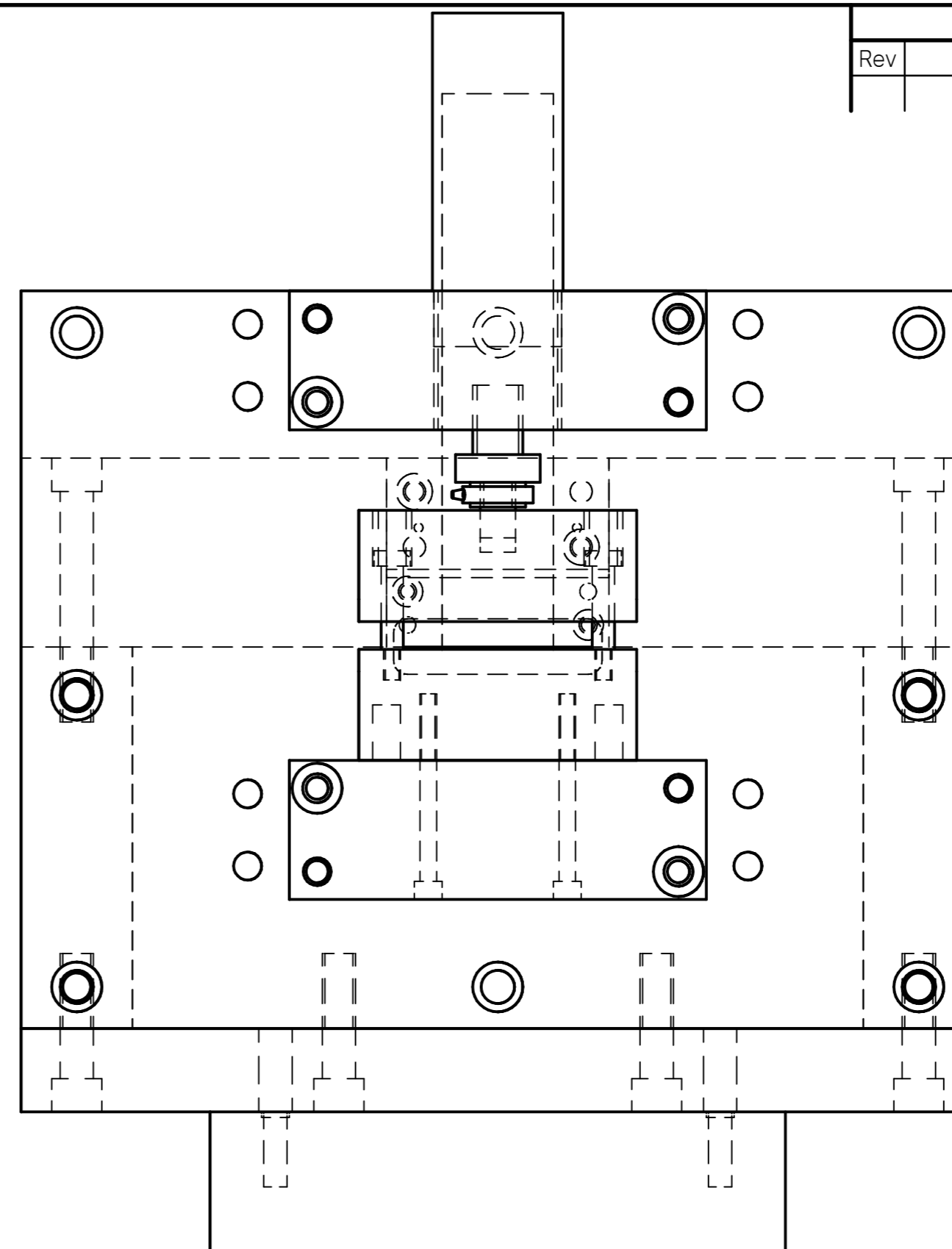
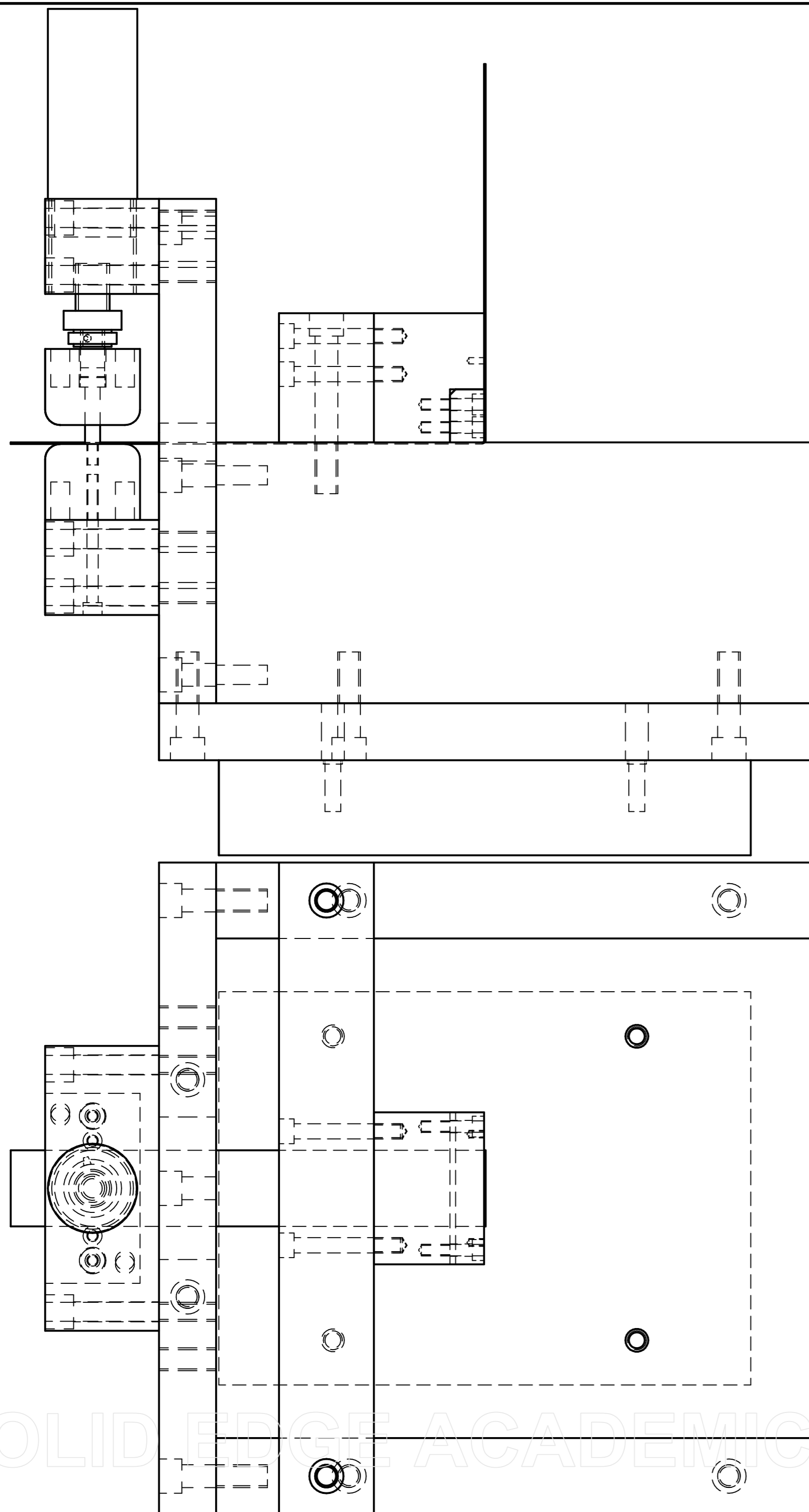


**Figura 16, anexo II.** Fotografía del utillaje y montaje sobre la máquina INSTRON.



# ANEXO III

Planos del utillaje

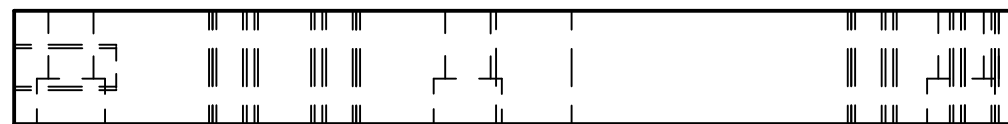
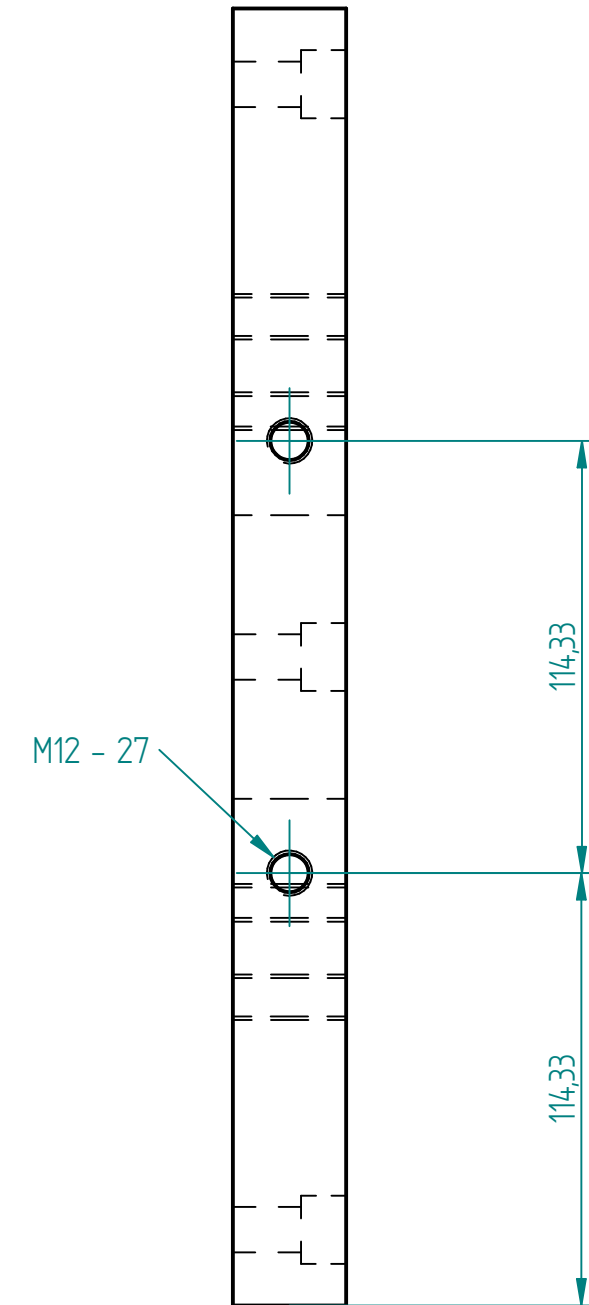
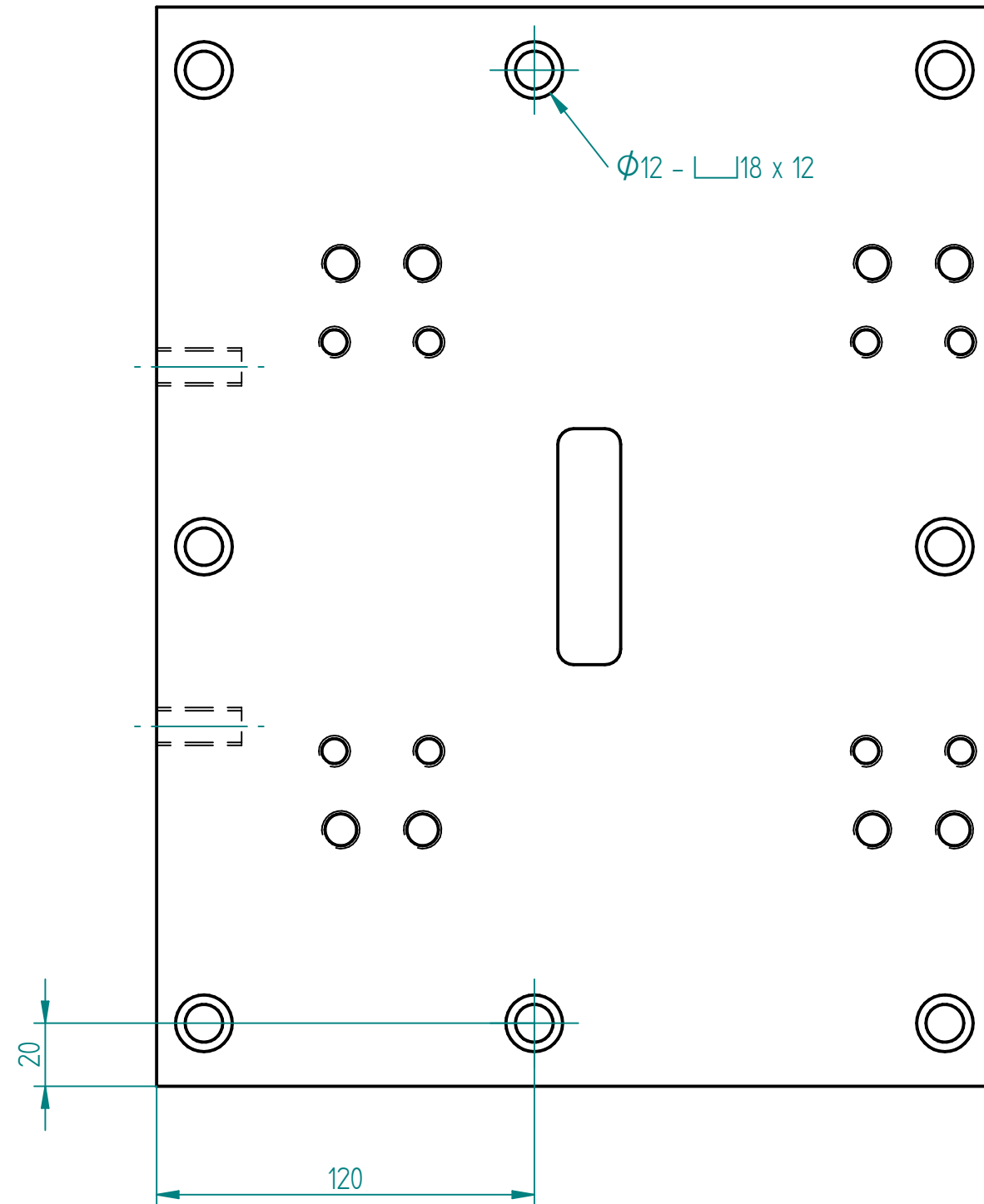


Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado

Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b>	
Dibujado	Héctor	Siemens PLM Software	
Comprobado	19/05/15	Título	
Aprobado 1		CONJUNTO	
Aprobado 2		A2	Plano
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°		Rev	
Archivo: UtilLajeFriccion_2015HECTOR_CON_BLOQUE.d		Escala	1:2
		Peso	
		Hoja	1 de 1

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

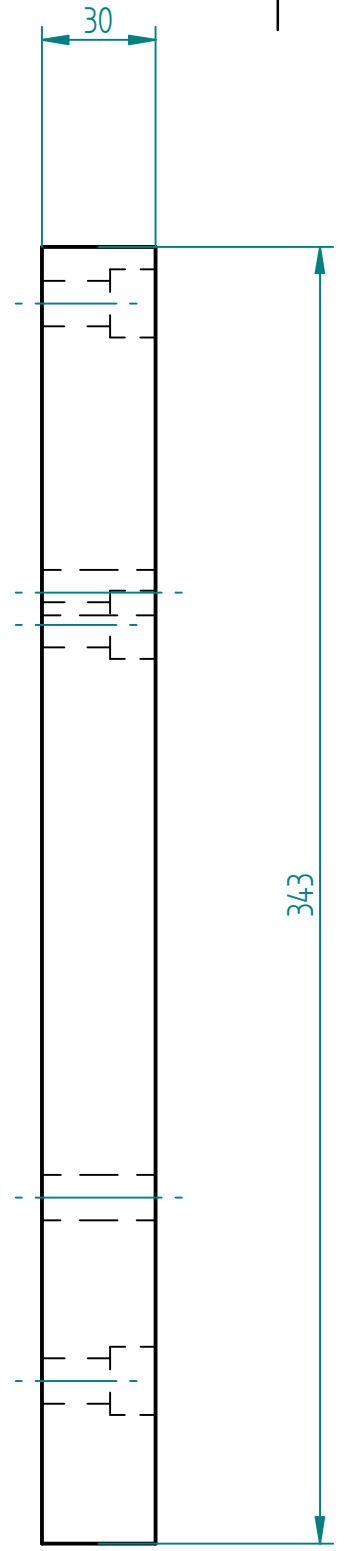
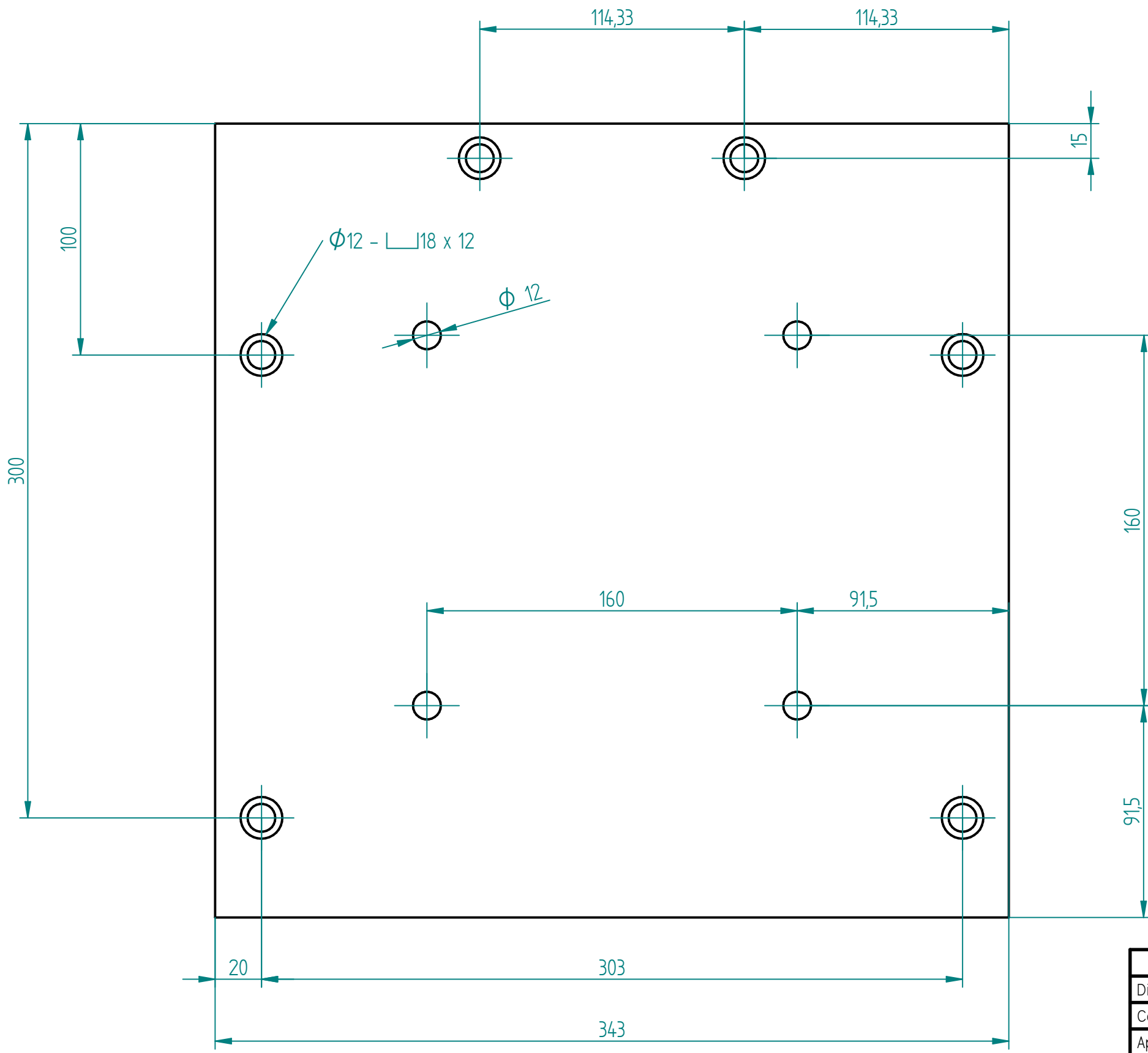
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



SOLID EDGE ACADEMIC COPY

	Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b> Siemens PLM Software	
Dibujado	Héctor	19/05/15	Título BASE ENSAYO FRICCIÓN	
Comprobado			A3 Plano Documento 1 Rev	
Aprobado 1			Archivo: BaseEnsayo.dft	
Aprobado 2			Escala 1:2 Peso Hoja 1 de 1	
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$				

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



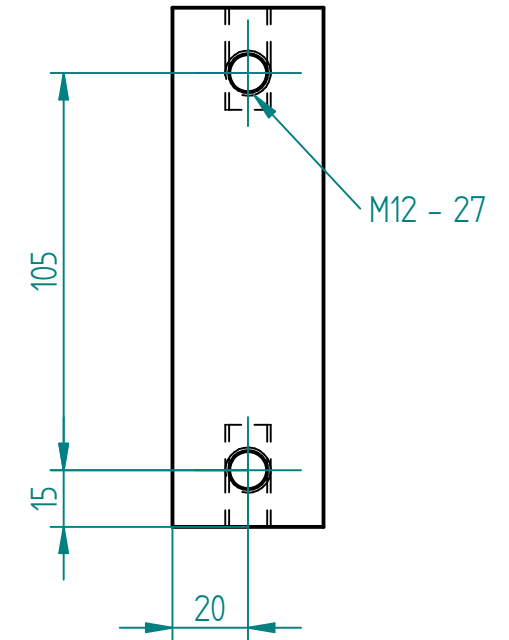
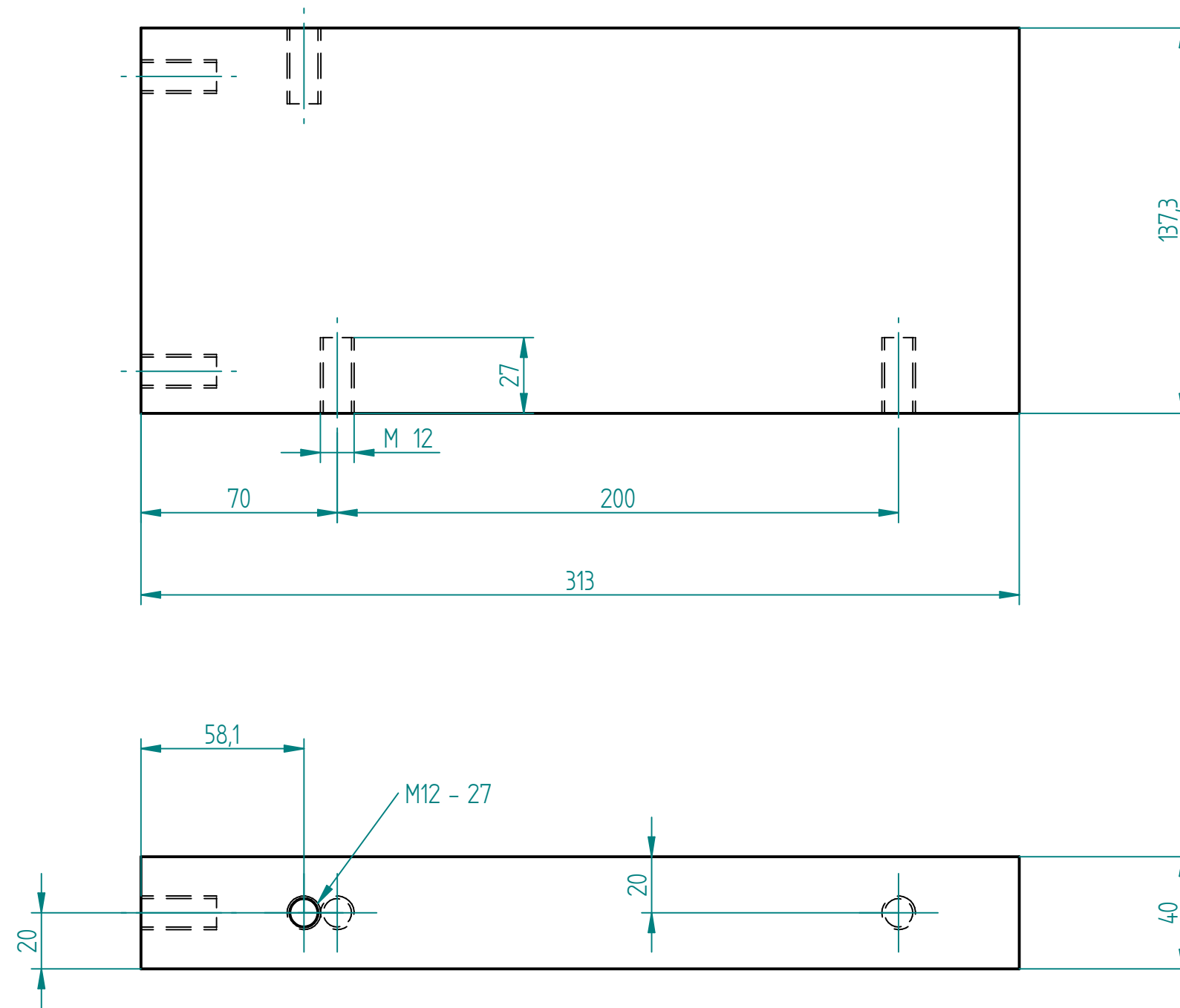
	Nombre	Fecha
Dibujado	HÉCTOR	18/05/15
Comprobado		
Aprobado 1		
Aprobado 2		

<b>Solid Edge ST</b> Siemens PLM Software		
Título PLACA BASE UTILLAJE		
A3	Plano Documento 2	Rev
Archivo: PiezaBaseUtillaje.dft		
Escala 1:2	Peso	Hoja 1 de 1

Salvo indicación contraria  
 cotas en milímetros  
 ángulos en grados  
 tolerancias ±0,5 y ±1°

SOLID EDGE ACADEMIC COPY

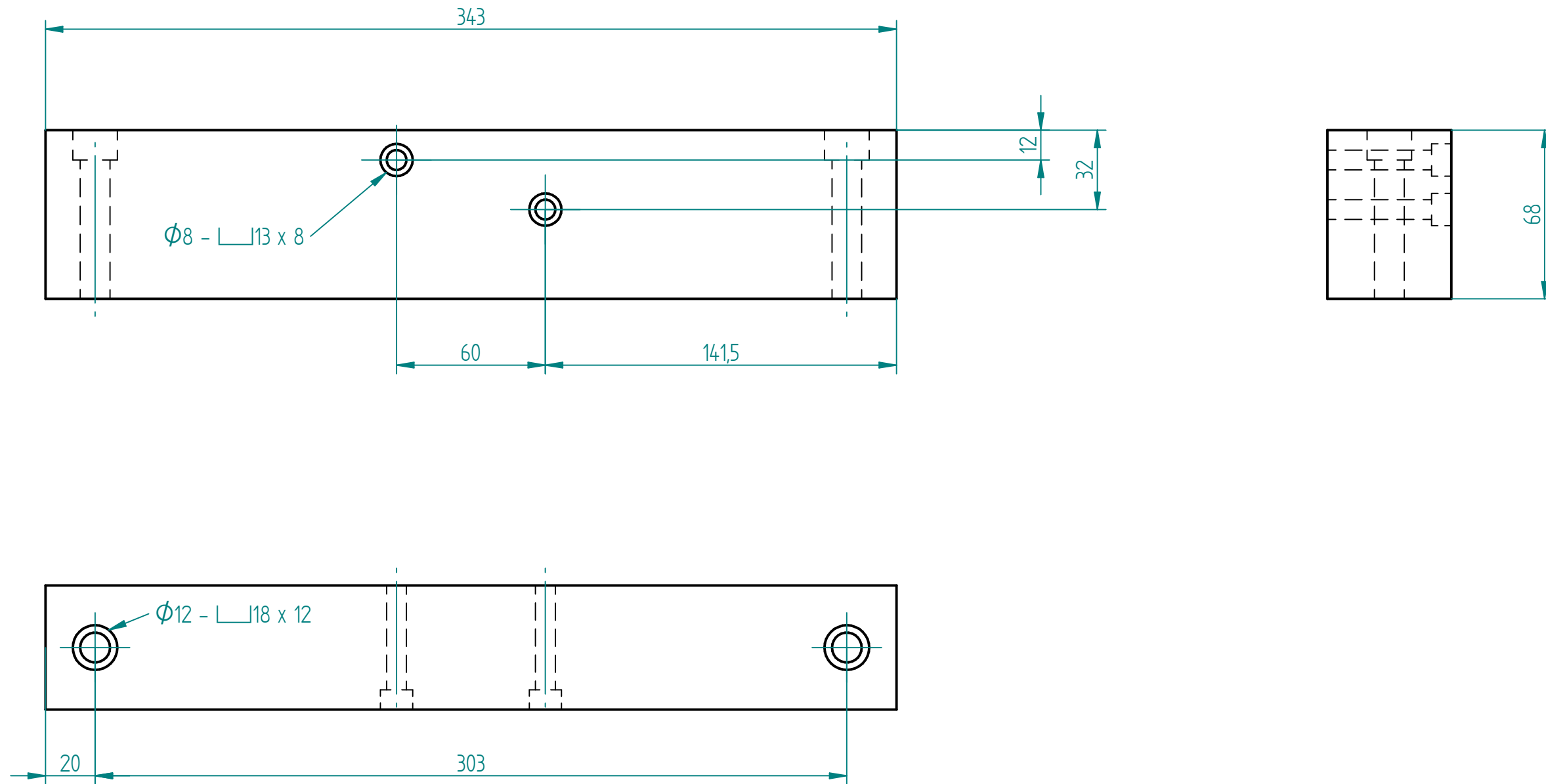
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



SOLID EDGE ACADEMIC COPY

Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b>	
Dibujado Héctor	18/05/15	Siemens PLM Software	
Comprobado		Título	
Aprobado 1		PLACA LATERAL	
Aprobado 2		A3	Plano
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias ±0,5 y ±1°		Documento 3	
		Rev	
Archivo: PlacaLateral_BLOQUE.dft		Escala 1:2	Peso
		Hoja 1 de 1	

Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



	Nombre	Fecha	<b>Solid Edge ST</b> Siemens PLM Software			
Dibujado	Héctor	19/05/15				
Comprobado			Título BLOQUE SOPORTE			
Aprobado 1						
Aprobado 2			A3	Plano	Documento 4	Rev
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$			Archivo: BloqueSoporte.dft			
			Escala	1:2	Peso	Hoja 1 de 1

SOLID EDGE ACADEMIC COPY





# ANEXO IV

Tablas, gráficas y resultados de los ensayos

A continuación se muestran las tablas y gráficas de todos los ensayos realizados, tanto los de configuración plana de utillaje, como los de configuración Rd de utillaje.

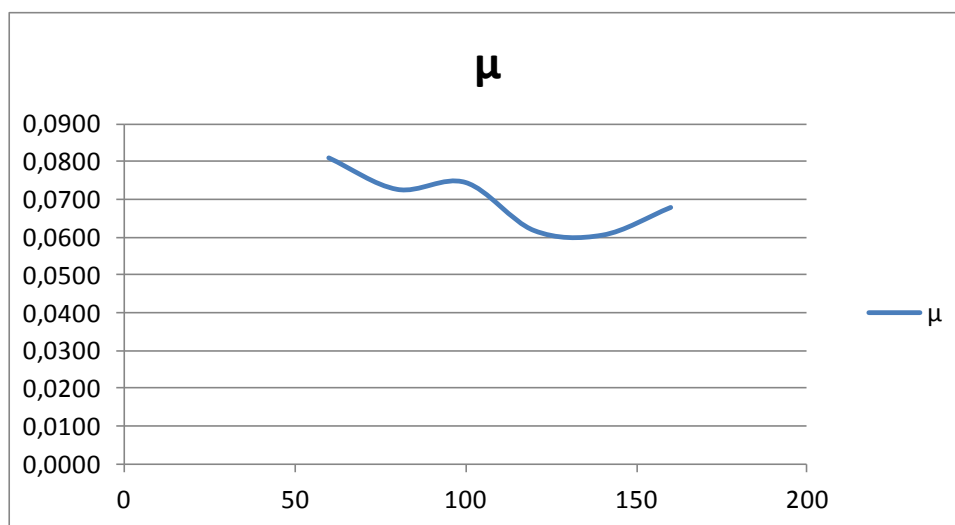
Cada una de estas gráficas, muestra seis puntos que corresponden a las 6 presiones de pisado que se han ensayado en cada chapa. Para la configuración plana tenemos 48 ensayos, por lo que hemos construido 8 gráficas. En este caso, son 4 repetidas con las mismas condiciones. Luego se ha calculado la media para sacar 4 gráficas más precisas, con valores de coeficientes de rozamiento más fiables. Estos valores se han utilizado para los cálculos de los coeficientes de rozamiento en el radio del postizo.

### 1) Ensayos con configuración plana de utillaje y mordazas F521

Las gráficas que se incluyen a continuación, muestran el coeficiente de rozamiento en la zona plana de la chapa respecto a la presión de pisado que ejercen las mordazas.

#### 1.1) Velocidad = 80 mm/min, primera repetición

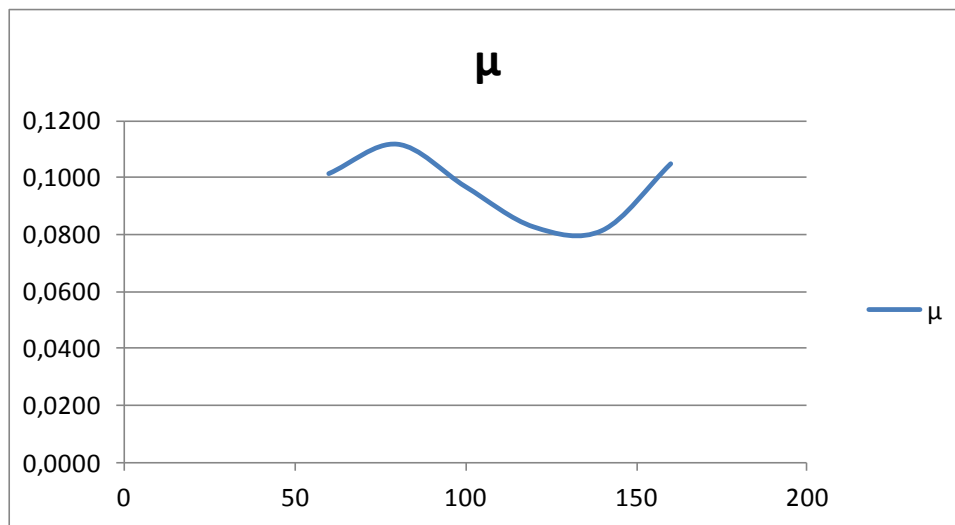
P [bar]	$\mu$
60	0,0808
80	0,0725
100	0,0743
120	0,0618
140	0,0606
160	0,0678



La gráfica muestra una tendencia a disminuir del coeficiente de rozamiento conforme aumenta la presión de pisado.

**1.2) Velocidad = 480 mm/min, primera repetición**

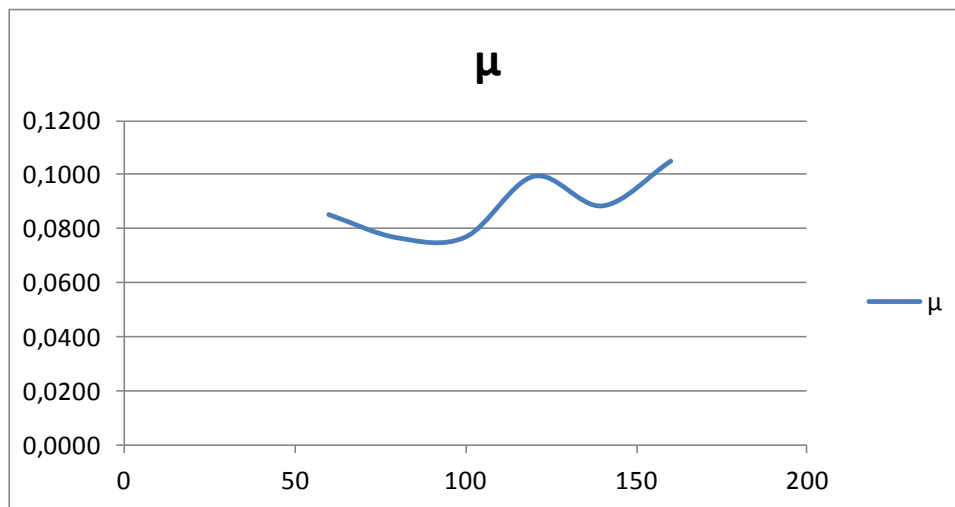
P [bar]	$\mu$
60	0,1013
80	0,1116
100	0,09671
120	0,0826
140	0,0814
160	0,1047



Esta gráfica es muy irregular, por lo que no se puede sacar ninguna conclusión firme.

### 1.3) Velocidad = 80 mm/min, segunda repetición

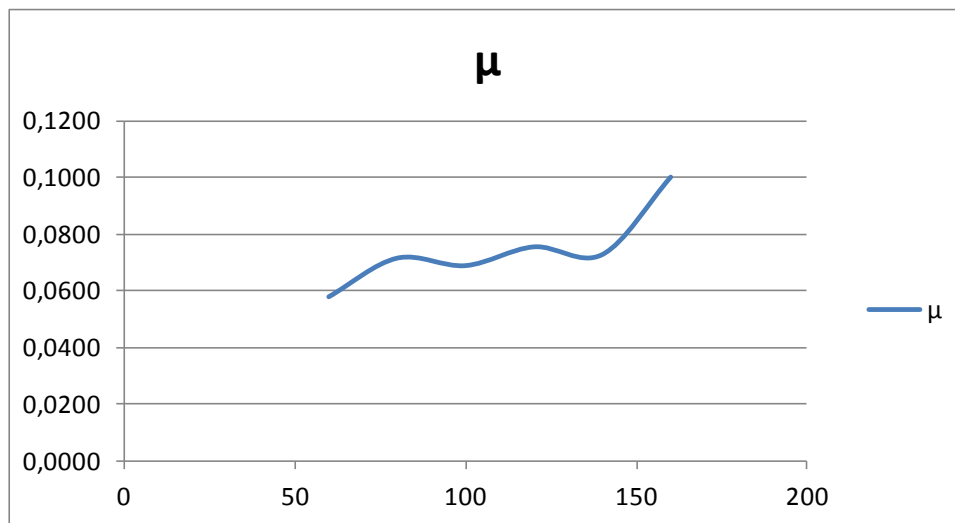
P [bar]	$\mu$
60	0,0853
80	0,0768
100	0,0771
120	0,0994
140	0,0885
160	0,1049



La gráfica muestra una tendencia a aumentar del coeficiente de rozamiento conforme aumenta la presión de pisado, aunque también con muchas irregularidades.

#### 1.4) Velocidad = 480 mm/min, segunda repetición

P [bar]	$\mu$
60	0,0578
80	0,0715
100	0,0688
120	0,0755
140	0,0728
160	0,1001



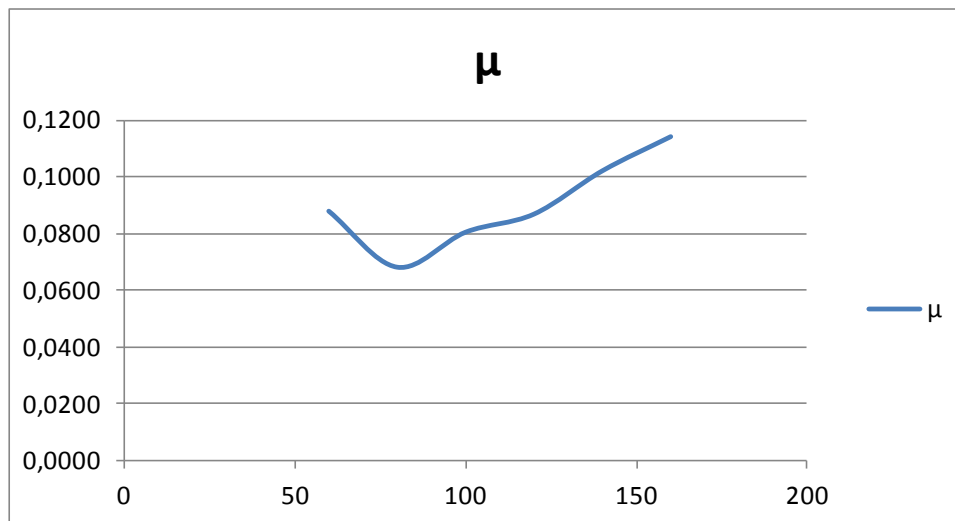
La gráfica muestra una tendencia a aumentar del coeficiente de rozamiento conforme aumenta la presión de pisado.

## 2) Ensayos con configuración plana de utillaje y mordazas AMPCO 25

Las gráficas que se incluyen a continuación, muestran el coeficiente de rozamiento en la zona plana de la chapa respecto a la presión de pisado que ejercen las mordazas.

### 2.1) Velocidad = 80 mm/min, primera repetición

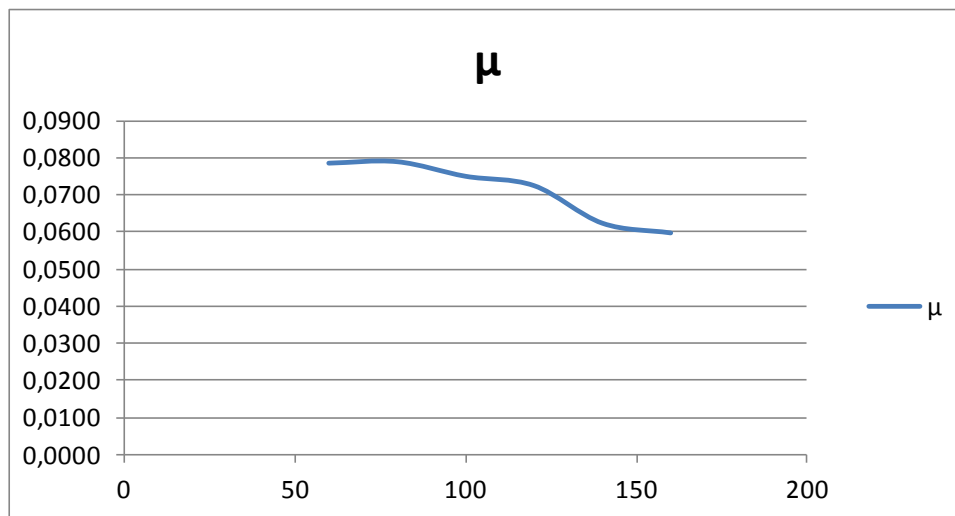
P [bar]	$\mu$
60	0,0879
80	0,0682
100	0,0805
120	0,0869
140	0,1021
160	0,1141



La gráfica muestra una tendencia a aumentar del coeficiente de rozamiento conforme aumenta la presión de pisado.

## 2.2) Velocidad = 480 mm/min, primera repetición

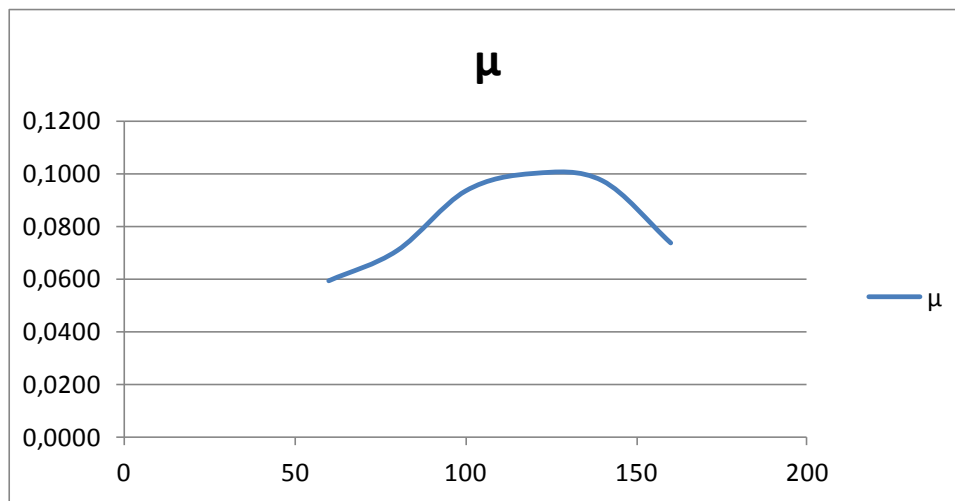
P [bar]	$\mu$
60	0,0784
80	0,0788
100	0,0749
120	0,0724
140	0,0623
160	0,0597



La gráfica muestra una tendencia a disminuir del coeficiente de rozamiento conforme aumenta la presión de pisado.

### 2.3) Velocidad = 80 mm/min, segunda repetición

P [bar]	$\mu$
60	0,0592
80	0,0706
100	0,0931
120	0,0997
140	0,0970
160	0,0735

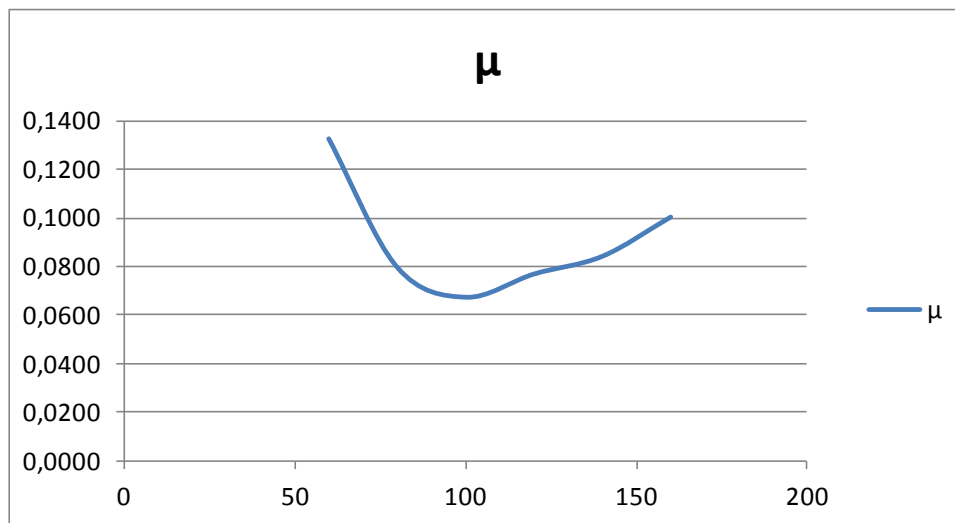


Esta gráfica es muy irregular, por lo que no se puede sacar ninguna conclusión firme.



## 2.4) Velocidad = 480 mm/min, segunda repetición

P [bar]	$\mu$
60	0,1322
80	0,0794
100	0,0671
120	0,0766
140	0,0839
160	0,1001



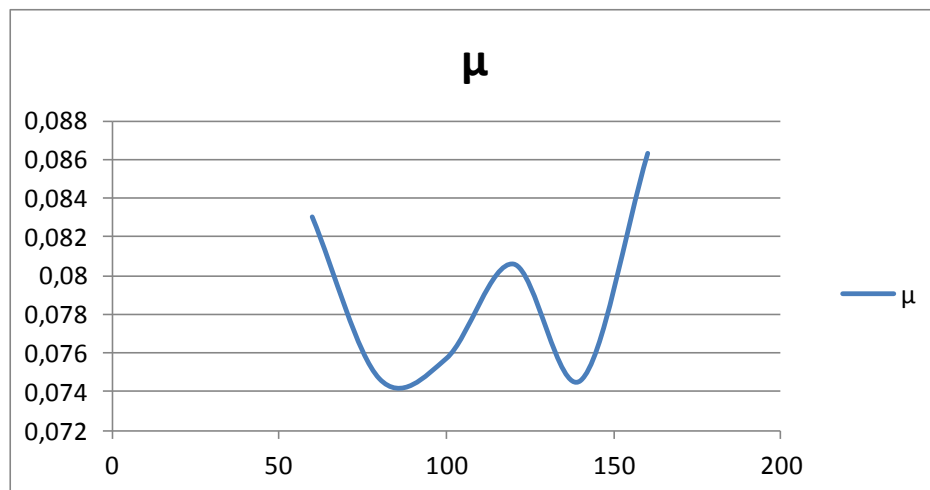
Esta gráfica es muy irregular, por lo que no se puede sacar ninguna conclusión firme.

### 3) Medias de los ensayos con configuración plana

Las gráficas que se incluyen a continuación, muestran el coeficiente de rozamiento en la zona plana de la chapa respecto a la presión de pisado que ejercen las mordazas.

#### 3.1) Velocidad = 80 mm/min, mordazas F521

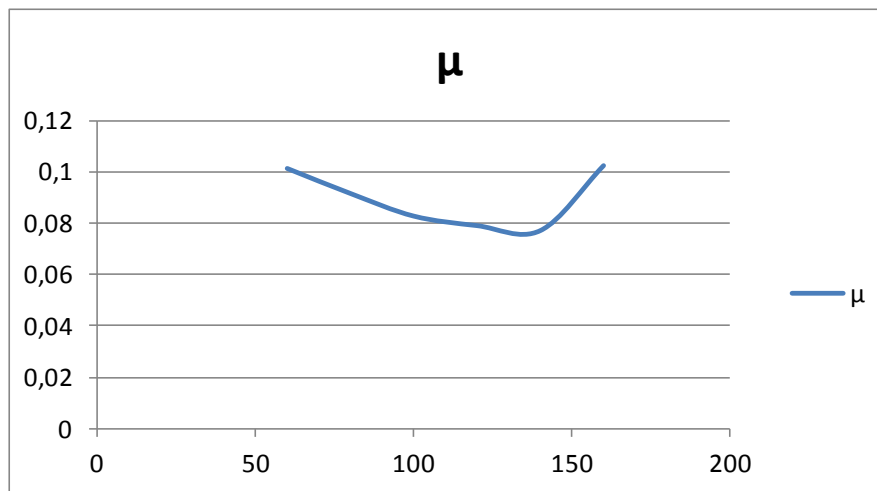
P [bar]	$\mu$
60	0,08305
80	0,07465
100	0,0757
120	0,0806
140	0,07455
160	0,08635



Esta gráfica es muy irregular, por lo que no se puede sacar ninguna conclusión firme.

### 3.2) Velocidad = 480 mm/min, mordazas F521

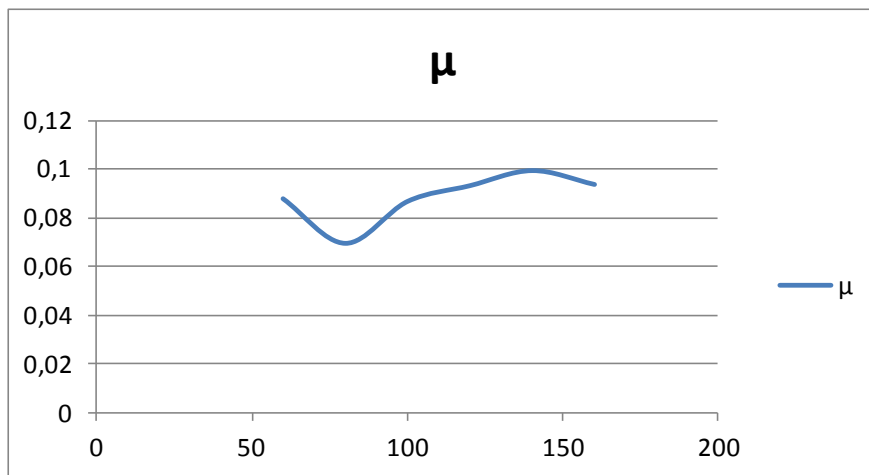
P [bar]	$\mu$
60	0,1013
80	0,09155
100	0,08275
120	0,07905
140	0,0771
160	0,1024



Esta gráfica muestra una tendencia clara a disminuir del coeficiente de rozamiento conforme aumenta la presión de pisado, solo que para la presión de 160 bar, se muestra una irregularidad importante, que hace aumentar el coeficiente de rozamiento hasta el valor más alto de la gráfica.

### 3.3) Velocidad = 80 mm/min, AMPCO 25

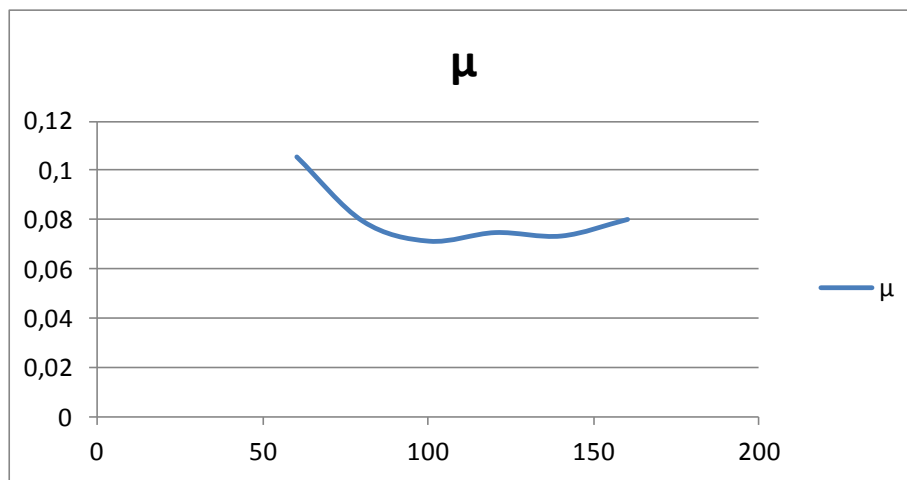
P [bar]	$\mu$
60	0,0879
80	0,0694
100	0,0868
120	0,0933
140	0,09955
160	0,0938



Esta gráfica es muy irregular, por lo que no se puede sacar ninguna conclusión firme.

### 3.4) Velocidad = 480 mm/min, AMPCO 25

P [bar]	$\mu$
60	0,1053
80	0,0791
100	0,071
120	0,0745
140	0,0731
160	0,07985



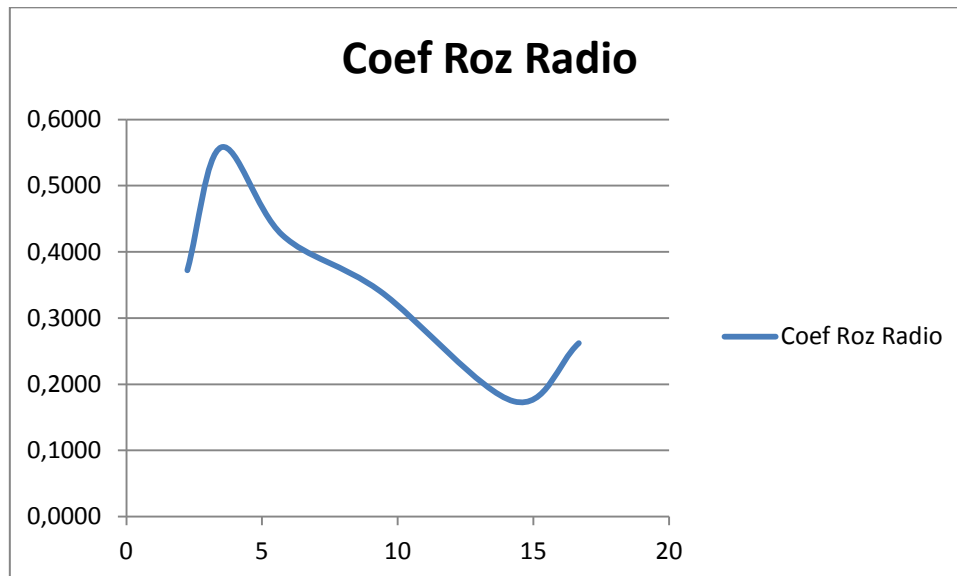
Esta gráfica muestra una tendencia clara a disminuir del coeficiente de rozamiento conforme aumenta la presión de pisado, aunque en los tres últimos valores tiende a mantenerse constante.

#### 4) Ensayos con configuración Rd de utillaje y mordazas AMPCO 25

Las gráficas que se incluyen a continuación, muestran el coeficiente de rozamiento en el radio del postizo respecto a la presión de contacto que ejerce la chapa sobre el radio del postizo.

##### 4.1) Cara pintada, velocidad = 80 mm/min, primera repetición

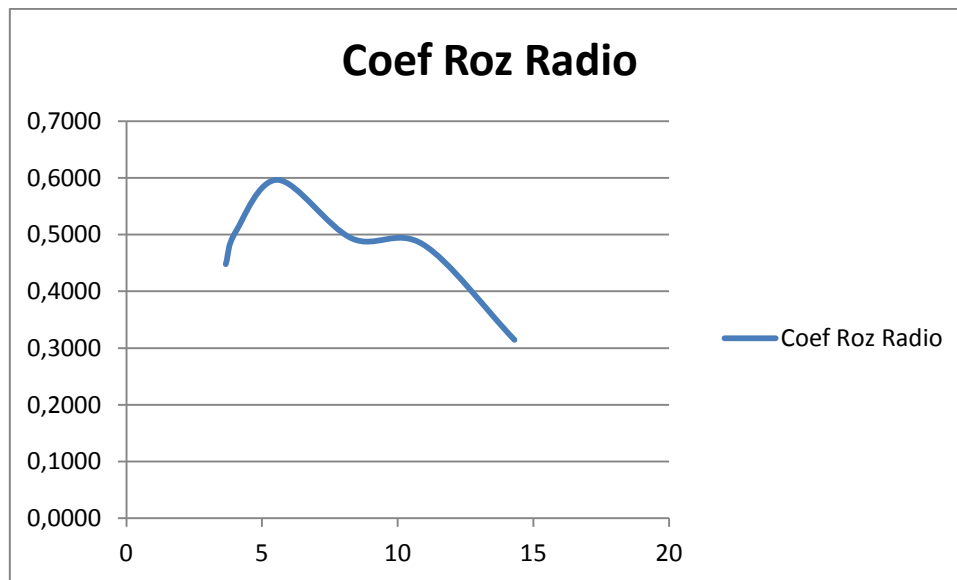
Presión de contacto en el radio [Mpa]	Coef Roz Radio
2,2452	0,3723
3,4999	0,5583
5,7481	0,4254
9,3451	0,3408
14,2768	0,1741
16,6768	0,2621



Esta gráfica muestra una clara tendencia a disminuir el coeficiente de rozamiento conforme aumenta la presión de contacto, pero presenta dos irregularidades en sus valores de presión más alto y más bajo.

#### 4.2) Cara pintada, velocidad = 480 mm/min, primera repetición

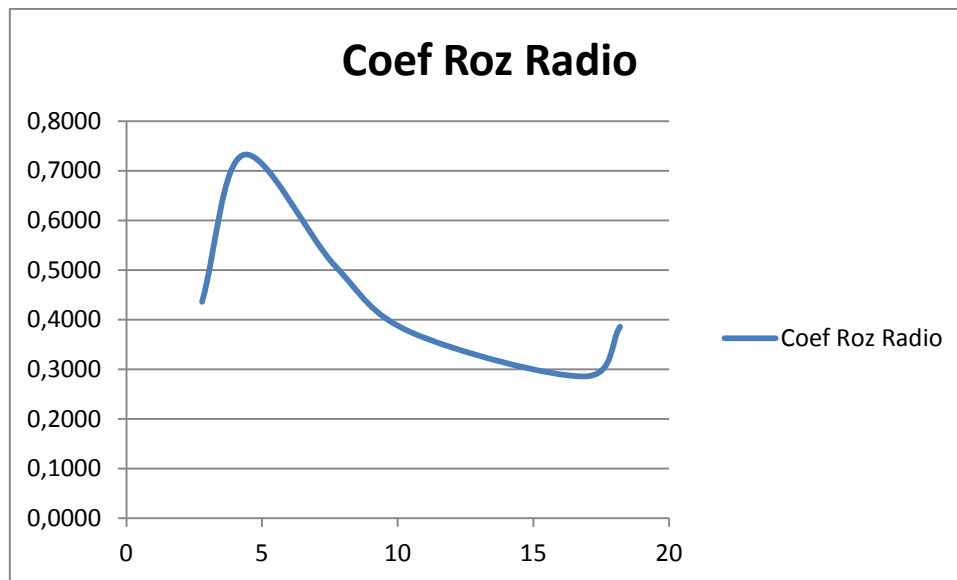
Presión de contacto en el radio [Mpa]	Coef Roz Radio
3,6607	0,4478
4,0190	0,5041
5,5830	0,5964
8,3123	0,4931
10,9393	0,4825
14,3031	0,3143



Esta gráfica muestra una tendencia a disminuir el coeficiente de rozamiento conforme aumenta la presión de contacto, pero presenta una irregularidad al principio, donde se crea un pico en la gráfica, y otra irregularidad en la zona central al pasar de una presión de 120 a 140 bar.

### 4.3) Cara fosfatada, velocidad = 80 mm/min, primera repetición

Presión de contacto en el radio [Mpa]	Coef Roz Radio
2,7850	0,4359
4,3279	0,7320
7,6805	0,5087
10,5002	0,3744
16,8997	0,2858
18,1983	0,3857

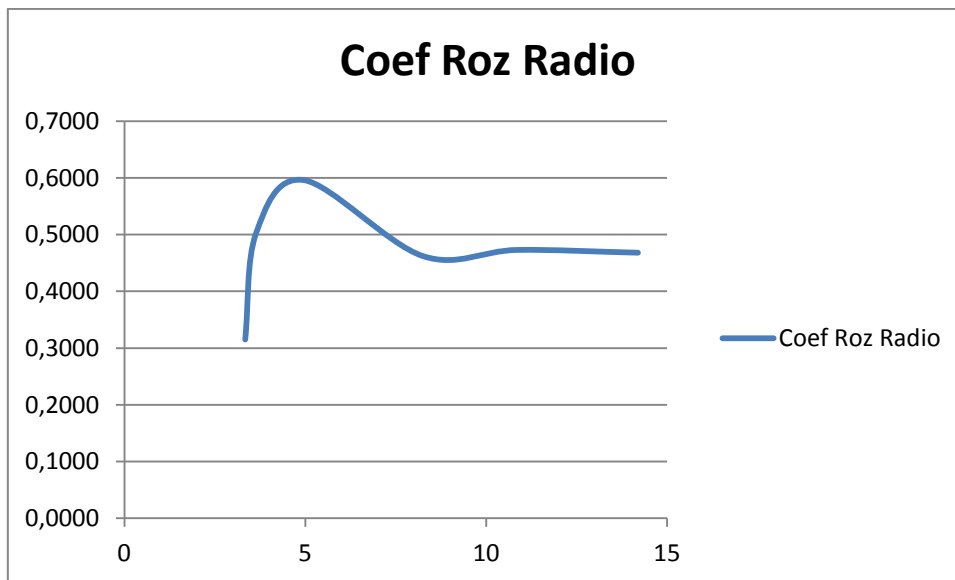


La gráfica muestra una clara tendencia a disminuir el coeficiente de rozamiento conforme aumenta la presión de contacto, pero presenta dos irregularidades en sus valores de presión más alto y más bajo.



#### 4.4) Cara fosfatada, velocidad = 480 mm/min, primera repetición

Presión de contacto en el radio [Mpa]	Coef Roz Radio
3,3404	0,3150
3,6392	0,5021
4,9519	0,5964
8,2504	0,4623
10,8579	0,4731
14,1966	0,4682

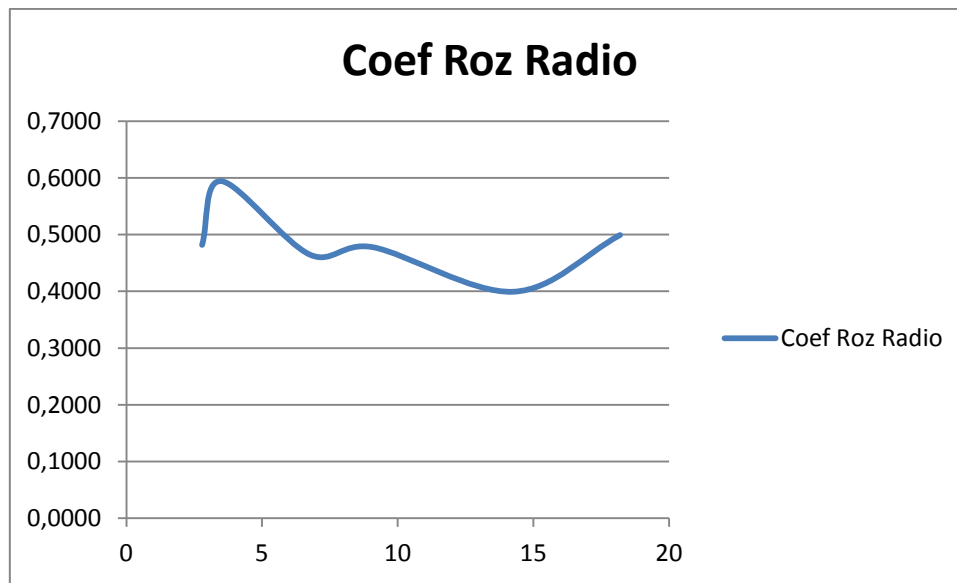


Esta gráfica muestra una clara tendencia a disminuir el coeficiente de rozamiento conforme aumenta la presión de contacto, pero presenta una irregularidad al principio, donde se crea un pico en la gráfica.

**\*\* Esta gráfica es la que se muestra en la sección 4 de la memoria y el tercer punto es el del ejemplo utilizado \*\***

#### 4.5) Cara pintada, velocidad = 80 mm/min, segunda repetición

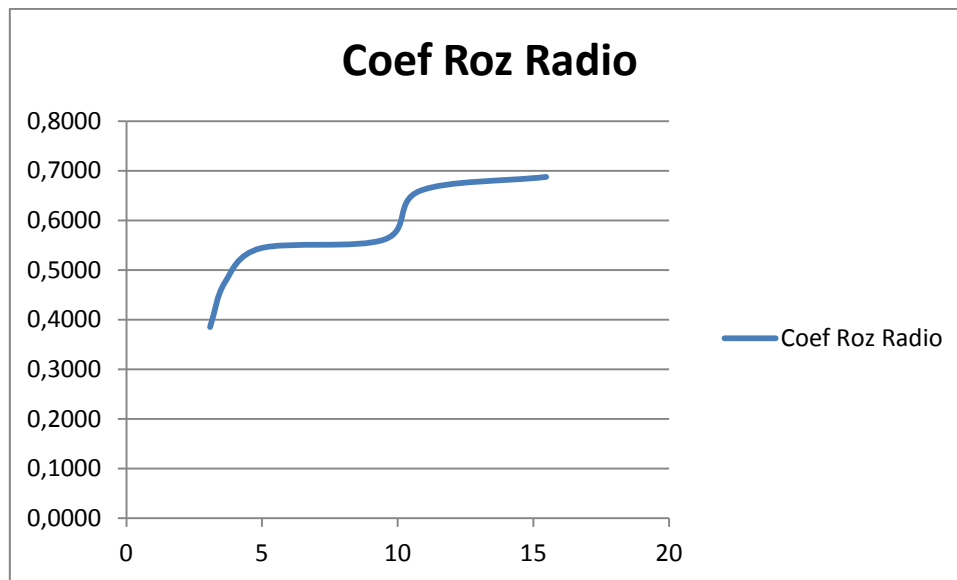
Presión de contacto en el radio [Mpa]	Coef Roz Radio
2,7850	0,4817
3,4956	0,5944
6,7662	0,4644
9,0812	0,4777
14,2591	0,3990
18,1983	0,4992



Esta gráfica es muy irregular, por lo que no se puede sacar ninguna conclusión firme.

#### 4.6) Cara pintada, velocidad = 480 mm/min, segunda repetición

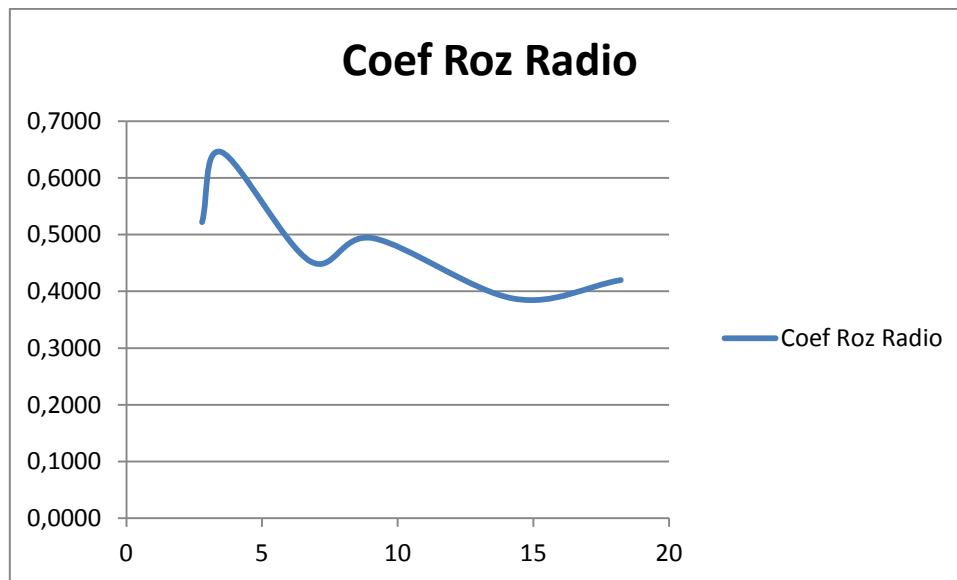
Presión de contacto en el radio [Mpa]	Coef Roz Radio
3,0835	0,3849
3,6302	0,4750
4,9396	0,5438
9,5159	0,5616
10,8310	0,6598
15,4727	0,6877



Esta gráfica muestra clara tendencia a aumentar el coeficiente de rozamiento conforme aumenta la presión de contacto. Así, se desmarca un poco del resto de gráficas de este tipo.

#### 4.7) Cara fosfatada, velocidad = 80 mm/min, segunda repetición

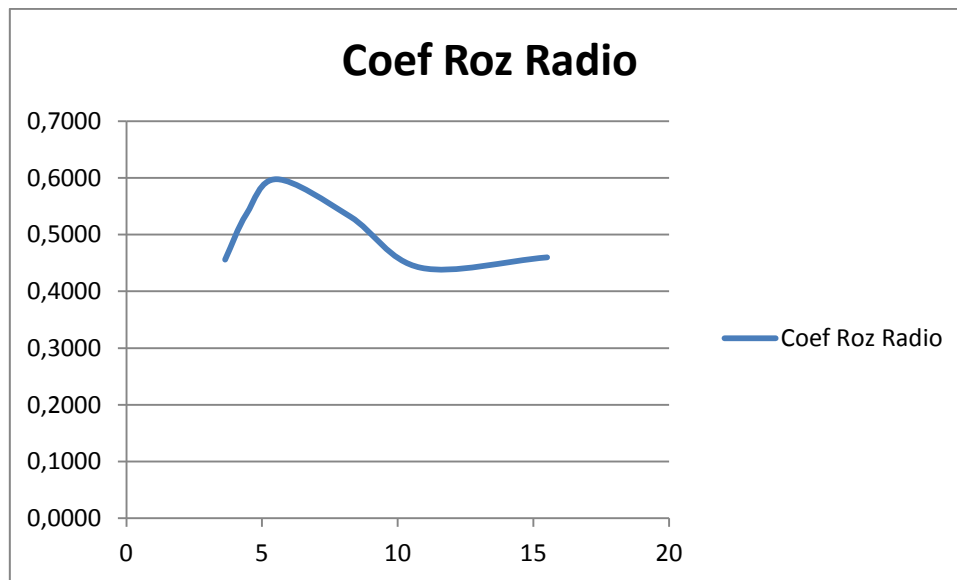
Presión de contacto en el radio [Mpa]	Coef Roz Radio
2,7884	0,5219
3,4999	0,6454
6,7746	0,4530
9,0925	0,4937
14,2768	0,3872
18,2209	0,4199



La gráfica muestra una tendencia a disminuir el coeficiente de rozamiento conforme aumenta la presión de contacto, pero presenta tres irregularidades. Una al principio, otra al final y otra aproximadamente en el valor intermedio de presión.

#### 4.8) Cara fosfatada, velocidad = 480 mm/min, segunda repetición

Presión de contacto en el radio [Mpa]	Coef Roz Radio
3,6334	0,4560
4,4135	0,5356
5,5414	0,5973
8,2504	0,5316
10,8579	0,4417
15,5111	0,4600



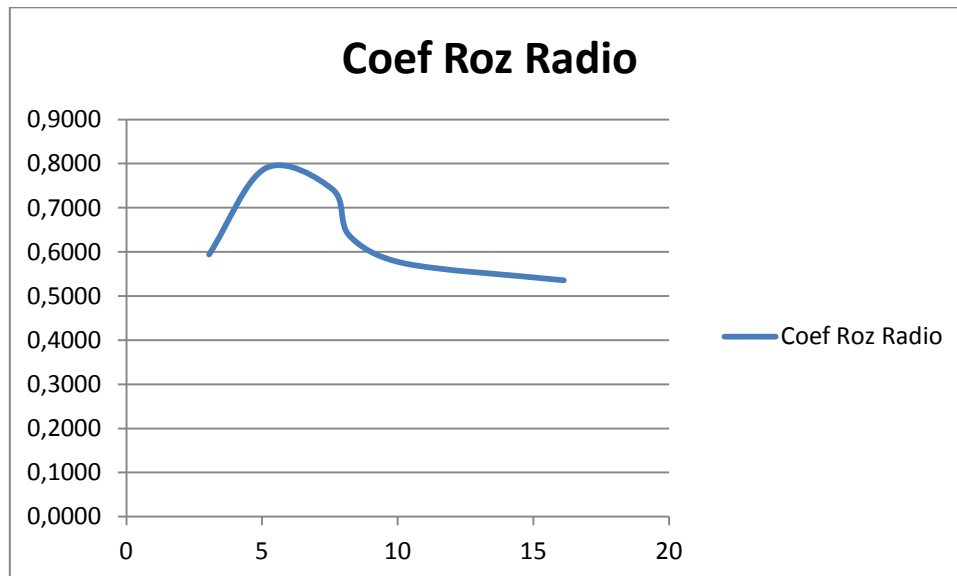
Esta gráfica muestra una tendencia clara a disminuir del coeficiente de rozamiento conforme aumenta la presión de pisado en sus primeros valores (a excepción del primero), aunque en los tres últimos valores tiende a mantenerse constante.

## 5) Ensayos con configuración Rd de utillaje y mordazas F521

Las gráficas que se incluyen a continuación, muestran el coeficiente de rozamiento en el radio del postizo respecto a la presión de contacto que ejerce la chapa sobre el radio del postizo.

### 5.1) Cara pintada, velocidad = 80 mm/min, primera repetición

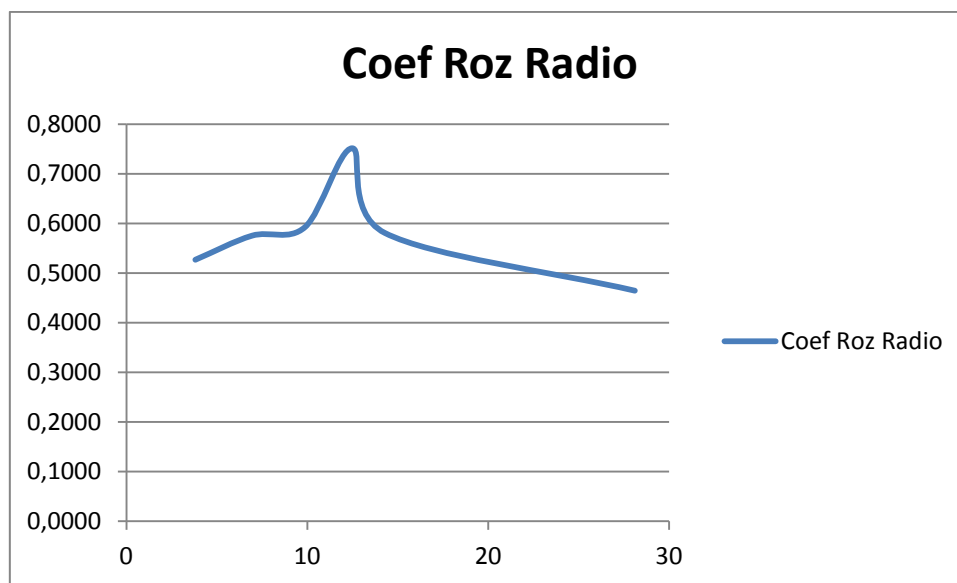
Presión de contacto en el radio [Mpa]	Coef Roz Radio
3,0473	0,5941
5,1283	0,7894
7,5957	0,7417
8,2296	0,6360
10,2667	0,5737
16,1238	0,5355



Esta gráfica la podemos separar en dos partes para su análisis. Primeramente, es tan irregular que no se puede sacar ninguna conclusión. Aunque en los tres últimos puntos muestra una leve tendencia a disminuir el coeficiente de rozamiento conforme aumenta la presión de contacto.

## 5.2) Cara pintada, velocidad = 480 mm/min, primera repetición

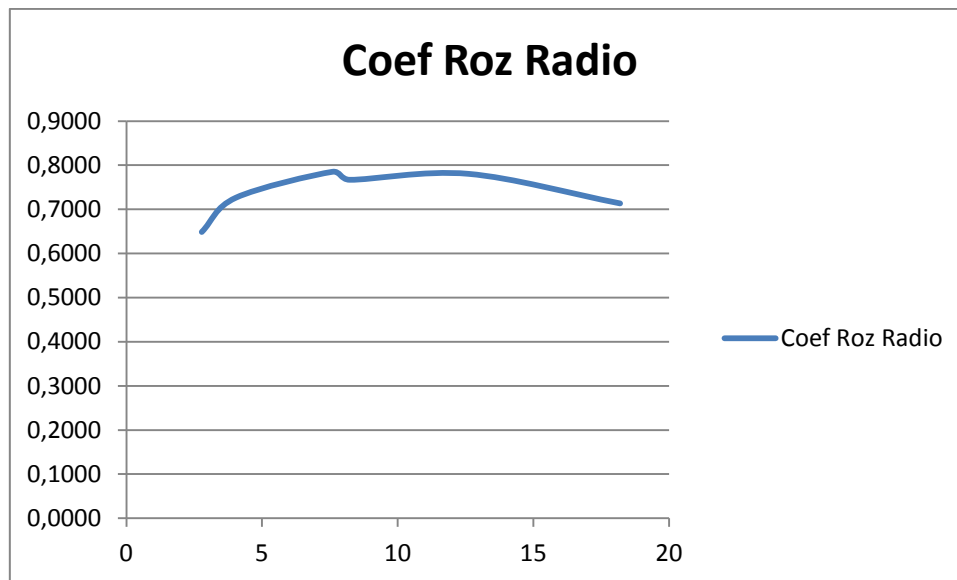
Presión de contacto en el radio [Mpa]	Coef Roz Radio
3,8211	0,5267
6,9507	0,5752
9,8822	0,5926
12,4996	0,7515
14,2908	0,5807
28,1006	0,4643



Esta gráfica, al igual que la anterior, la podemos separar en dos partes para su análisis. Primeramente es tan irregular que no se puede sacar ninguna conclusión. Aunque en los tres últimos puntos muestra una clara tendencia a disminuir el coeficiente de rozamiento conforme aumenta la presión de contacto.

### 5.3) Cara fosfatada, velocidad = 80 mm/min, primera repetición

Presión de contacto en el radio [Mpa]	Coef Roz Radio
2,77994819	0,6487
4,037163791	0,7263
7,595672081	0,785
8,229612676	0,7669
12,60004158	0,7804
18,19100241	0,7134

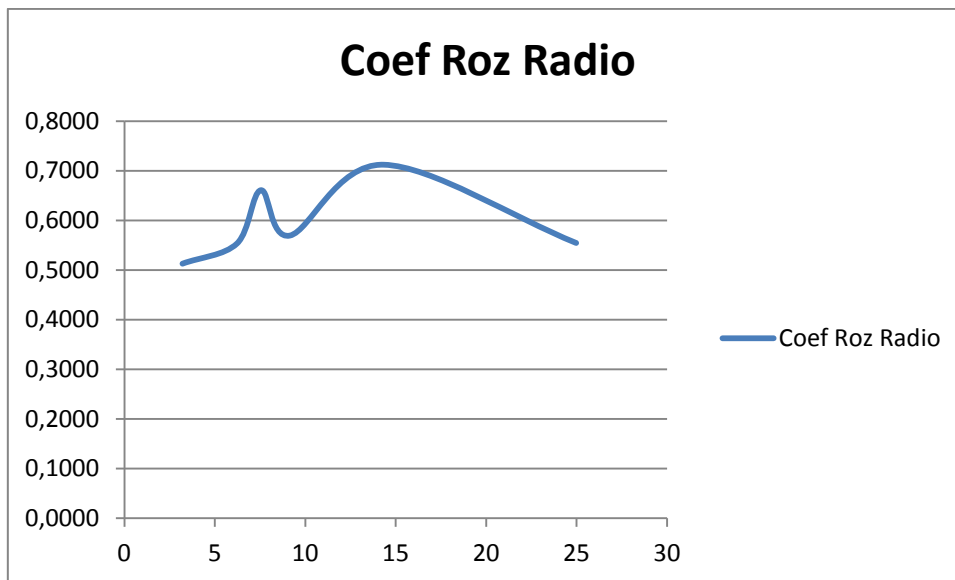


En esta gráfica, el coeficiente de rozamiento tiende a mantenerse constante.



#### 5.4) Cara fosfatada, velocidad = 480 mm/min, primera repetición

Presión de contacto en el radio [Mpa]	Coef Roz Radio
3,212778017	0,5126
6,226687005	0,5533
7,547984959	0,661
9,143955397	0,5693
14,32621282	0,7124
24,96918962	0,5544

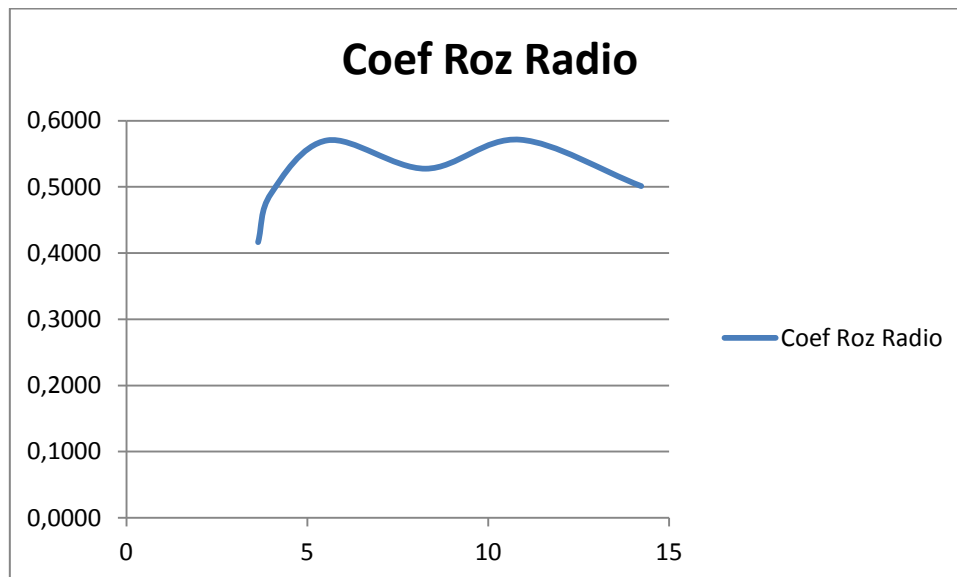


Para el análisis de esta gráfica, la separamos en dos partes. Primeramente es tan irregular que no se puede sacar ninguna conclusión. Aunque en los tres últimos puntos muestra una clara tendencia a disminuir el coeficiente de rozamiento conforme aumenta la presión de contacto.

## 6) Medias de los ensayos con configuración Rd y mordazas AMPCO 25

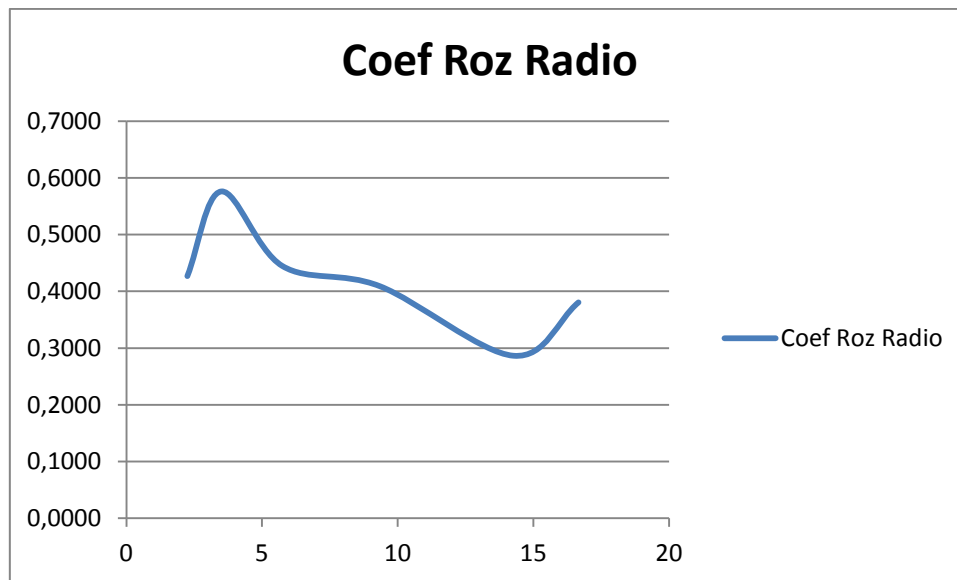
### 6.1) Cara pintada, velocidad = 480 mm/min

Presión de Contacto en el radio [MPa]	Coef Roz Radio
3,6425	0,4163
3,9991	0,4896
5,5553	0,5701
8,2711	0,5273
10,8852	0,5711
14,2322	0,5010



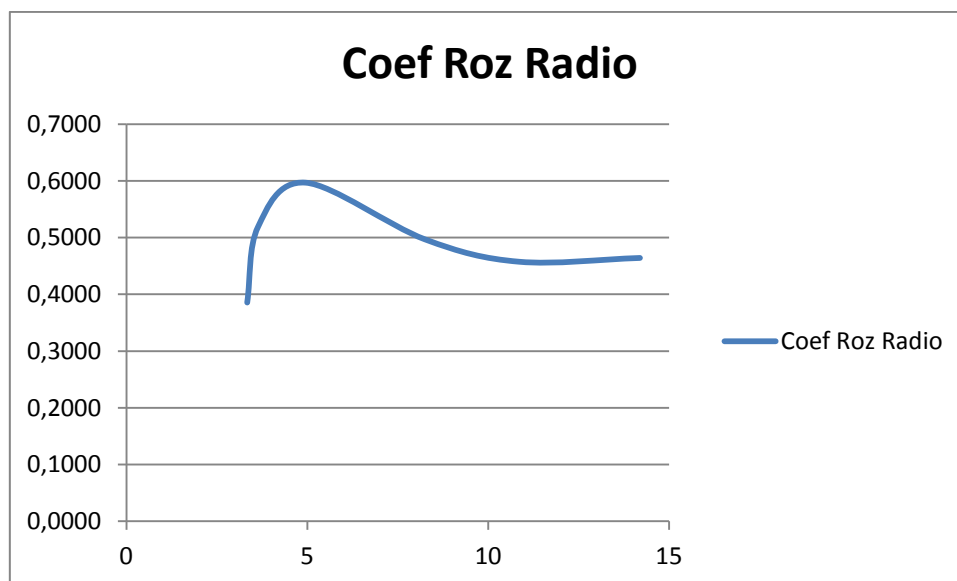
## 6.2) Cara pintada, velocidad = 80 mm/min

Presión de Contacto en el radio [MPa]	Coef Roz Radio
2,2438	0,4270
3,4977	0,5763
5,7446	0,4449
9,3393	0,4093
14,2679	0,2866
16,6664	0,3806



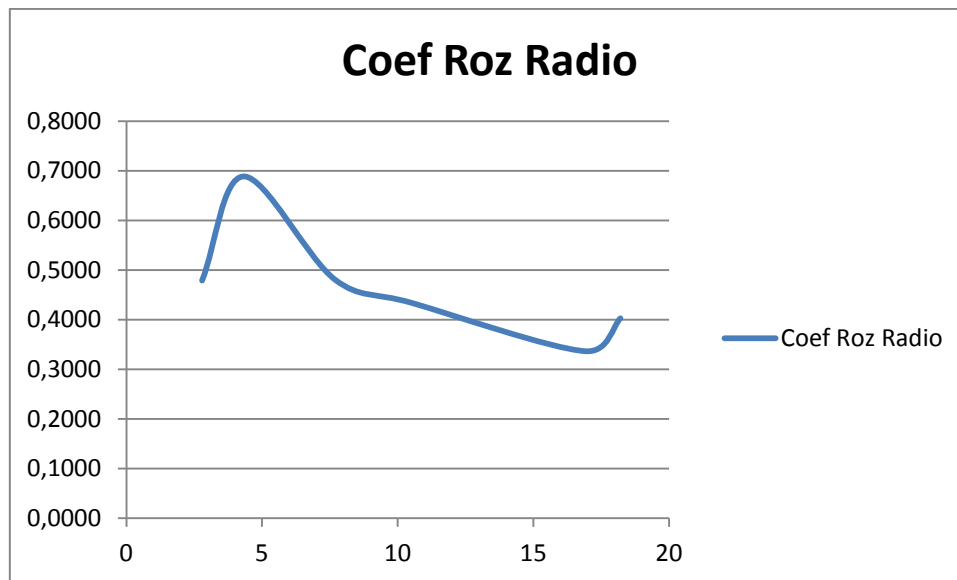
### 6.3) Cara fosfatada, velocidad = 480 mm/min

Presión de Contacto en el radio [MPa]	Coef Roz Radio
3,3404	0,3855
3,6392	0,5188
4,9519	0,5968
8,2504	0,4970
10,8579	0,4574
14,1966	0,4641



#### 6.4) Cara fosfatada, velocidad = 80 mm/min

Presión de Contacto en el radio [MPa]	Coef Roz Radio
2,7867	0,4789
4,3305	0,6887
7,6853	0,4809
10,5067	0,4340
16,9101	0,3365
18,2096	0,4028

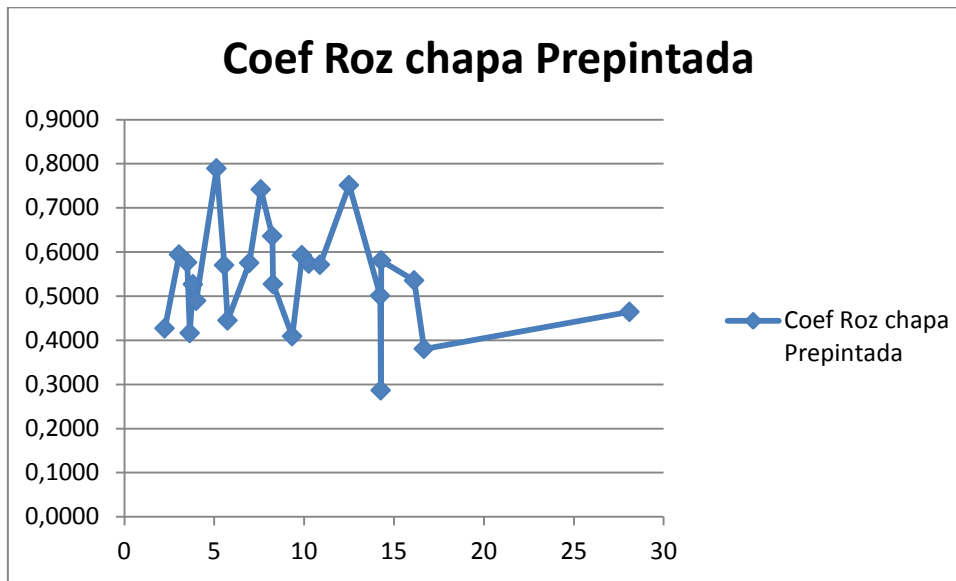


## 7) Construcción de las gráficas finales

Estas 4 gráficas que se muestran a continuación son las mismas que aparecen al final de la sección 4 de la memoria. Son uno de los objetivos de este trabajo. Estas gráficas se sacan de las tablas que las acompañan. Para la construcción de estas tablas hemos recopilado todos los valores de las tablas de los apartados 5 y 6 (mordazas F521 y media de los ensayos con mordazas AMPCO 25) y los hemos clasificado según sea ensayo en chapa prepintada o fosfatada, y ensayo con mordazas AMPCO 25 ó F521. Una vez clasificados, los hemos ordenado de menor a mayor presión de contacto para su representación en las gráficas. Así, cada valor de presión de contacto con su respectivo coeficiente de rozamiento aparece en las dos clasificaciones, según el tipo de mordazas y según la cara de la chapa que se ha ensayado.

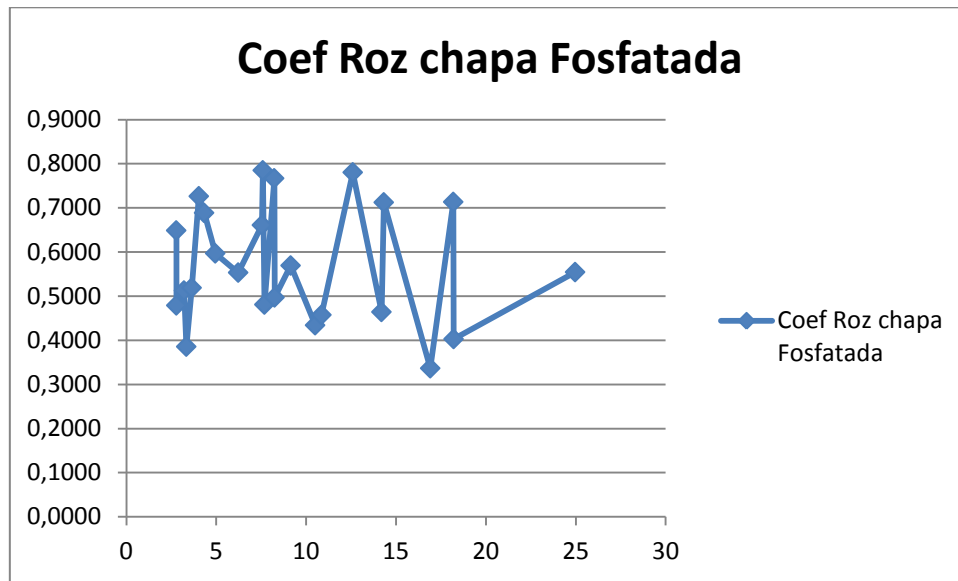
### 7.1) Gráfica final para chapa prepintada

PINTADA	
P. de Contacto	Coef. Roz
2,2438	0,4270
3,0473	0,5941
3,4977	0,5763
3,6425	0,4163
3,8211	0,5267
3,9991	0,4896
5,1283	0,7894
5,5553	0,5701
5,7446	0,4449
6,9507	0,5752
7,5957	0,7417
8,2296	0,6360
8,2711	0,5273
9,3393	0,4093
9,8822	0,5926
10,2667	0,5737
10,8852	0,5711
12,4996	0,7515
14,2322	0,5010
14,2679	0,2866
14,2908	0,5807
16,1238	0,5355
16,6664	0,3806
28,1006	0,4643



## 7.2) Gráfica final para chapa fosfatada

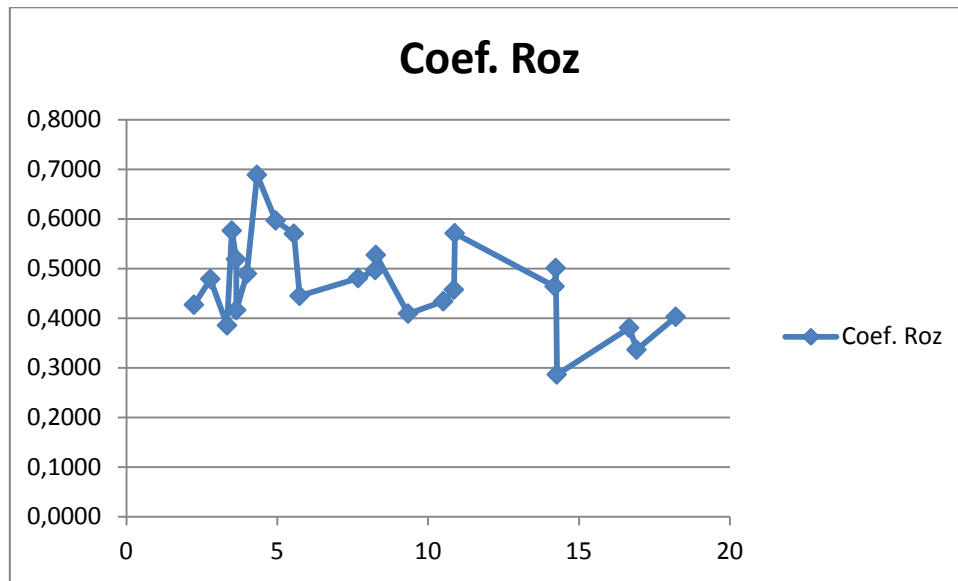
FOSFATADA	
P. de Contacto	Coef. Roz
2,7799	0,6487
2,7867	0,4789
3,2128	0,5126
3,3404	0,3855
3,6392	0,5188
4,0372	0,7263
4,3305	0,6887
4,9519	0,5968
6,2267	0,5533
7,5480	0,6610
7,5957	0,7850
7,6853	0,4809
8,2296	0,7669
8,2504	0,4970
9,1440	0,5693
10,5067	0,4340
10,8579	0,4574
12,6000	0,7804
14,1966	0,4641
14,3262	0,7124
16,9101	0,3365
18,1910	0,7134
18,2096	0,4028
24,9692	0,5544



### 7.3) Gráfica final para mordazas AMPCO 25

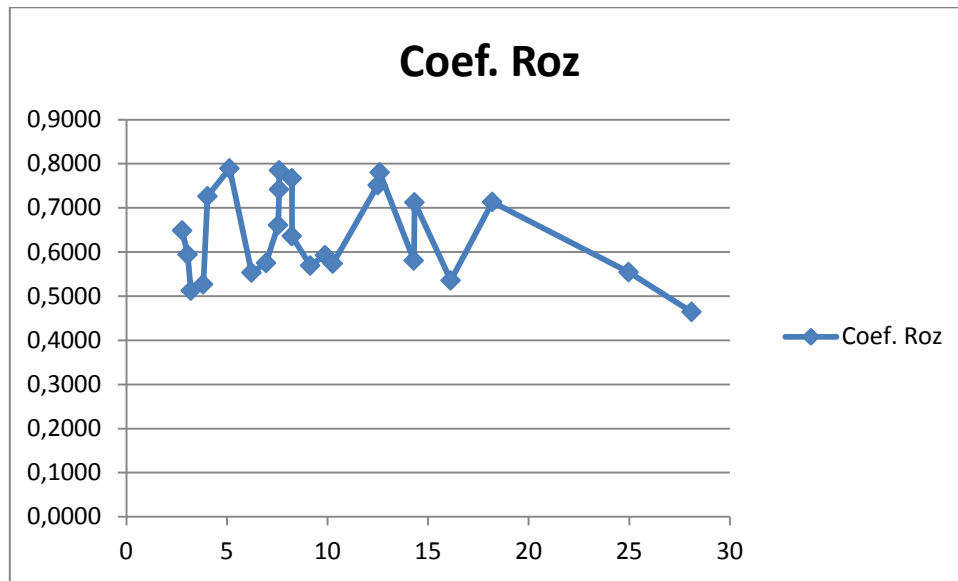
AMPCO 25	
P. de Contacto	Coef. Roz
2,2438	0,4270
2,7867	0,4789
3,3404	0,3855
3,4977	0,5763
3,6392	0,5188
3,6425	0,4163
3,9991	0,4896
4,3305	0,6887
4,9519	0,5968
5,5553	0,5701
5,7446	0,4449
7,6853	0,4809
8,2504	0,4970
8,2711	0,5273
9,3393	0,4093
10,5067	0,4340
10,8579	0,4574
10,8852	0,5711
14,1966	0,4641
14,2322	0,5010
14,2679	0,2866
16,6664	0,3806
16,9101	0,3365
18,2096	0,4028





#### 7.4) Gráfica final para mordazas F521

F521	
P. de Contacto	Coef. Roz
2,7799	0,6487
3,0473	0,5941
3,2128	0,5126
3,8211	0,5267
4,0372	0,7263
5,1283	0,7894
6,2267	0,5533
6,9507	0,5752
7,5480	0,6610
7,5957	0,7417
7,5957	0,7850
8,2296	0,7669
8,2296	0,6360
9,1440	0,5693
9,8822	0,5926
10,2667	0,5737
12,4996	0,7515
12,6000	0,7804
14,2908	0,5807
14,3262	0,7124
16,1238	0,5355
18,1910	0,7134
24,9692	0,5544
28,1006	0,4643





# ANEXO V

## Materiales

### **1) Materiales de mordazas y postizo**

Como se explica en la memoria del trabajo, en los ensayos se han utilizado dos parejas de mordazas de diferente material para hacer el pisado de la chapa. Unas son de la aleación AMPCO25 y las otras de acero F521. El postizo de la matriz es también de acero F521.

#### **Composición química del AMPCO 25:**

Cobre, aluminio, hierro, manganeso, zinc y estaño  
El porcentaje de cada uno de sus componentes no lo facilita el fabricante.

#### **Composición química del F521:**

1,55 % Carbono

0,40 % Manganeso

0,25 % Silicio

12 % Cromo

0,95 % Vanadio

0,8 % Molibdeno

El F521 es un acero de elevada dureza y gran resistencia al desgaste, que trabaja mal a esfuerzos de flexión, muy típico en matricería.

### **2) Material de chapa**

La chapa utilizada en los ensayos es una chapa de 0,8 mm de acero DC06, un tipo de acero muy utilizado en los procesos de embutición profunda. Su composición química según la norma UNE-EN 10130 de 2008 es:

0,02 % Carbono

0,02 % Fósforo

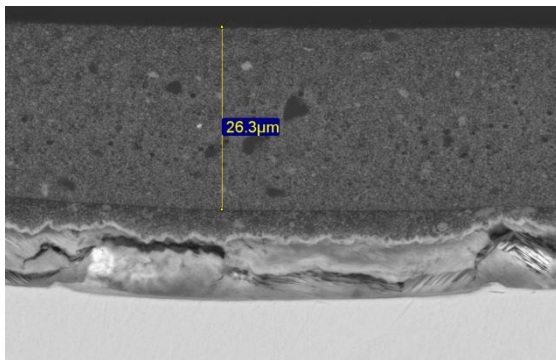
0,02 % Azufre

0,25 % Manganeso

0,3 % Titanio

Una capa de la chapa ha recibido un tratamiento de pintura, y la otra un tratamiento de fosfatado de cinc. En 2007, para los ensayos que se realizaron con la configuración plana de utillaje, se estudió este tipo de material para

conocer principalmente la capa de pintura, dado que la información que facilitaba el fabricante era escasa, diciéndonos que su dosificación era de 50 gr/m<sup>2</sup>. Se encargó entonces un estudio de espesores y de composición de las capas de recubrimiento contra oxidación y película de pintura al servicio de microscopía electrónica de la Universidad de Zaragoza. Se observa un espesor total en torno a 858  $\mu\text{m}$ , que incluye una capa superior de pintura de espesor no uniforme entre 23 y 26  $\mu\text{m}$ , otra capa intermedia de 4  $\mu\text{m}$ , otra de 1  $\mu\text{m}$  y otra capa de zincado entre 8 y 9  $\mu\text{m}$ , similar a la cara inferior. Esta última capa de zincado es la más débil en cuanto a resistencia a cizalladura.



Se ha consultó la normativa española relativa a la caracterización de pinturas y barnices, en especial a la determinación de espesor de película (UNE-EN ISO 2808) y a los ensayos normalizados de embutición (UNE-EN ISO 1520) y de plegado (en mandril cilíndrico UNE-EN ISO 1519 y en mandril cónico UNE-EN ISO 6860). Aparte de esto, se encargó también al laboratorio de calidad de BSH Electrodomésticos España la caracterización de la chapa prepintada según ensayos normalizados, al disponer de medios y experiencia contrastada. Realizaron ensayos en cámara de niebla salina, obteniendo un resultado muy malo. A las 500 y 750 horas se desprende la pintura prácticamente en su totalidad, observando ampollamiento por toda la probeta.

