



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Politécnica Superior de Alcoy

TRIBOLOGÍA DE LA ALEACIÓN DE TITANIO SP-700

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería, Procesado y Caracterización de  
Materiales

AUTOR/A: Cuervo Pinilla, Juan Manuel

Tutor/a: Sellés Cantó, Miguel Ángel

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

# RESUMEN

## TRIBOLOGÍA DE LA ALEACIÓN DE TITANIO SP-700

Este proyecto consiste en evaluar y caracterizar las propiedades mecánicas de la aleación de Titanio SP-700 para estudiar su conformabilidad y bajo qué condiciones se puede trabajar para obtener un mejor comportamiento. Inicialmente, y mediante el uso del simulador SFBT (Sistema de flexión bajo tensión) se realiza el estudio de los coeficientes de fricción sometiendo a las probetas de titanio a una carga axial bajo diferentes ángulos de inclinación de la máquina, velocidades de cilindros, diámetro de pin donde se somete a rozamiento y tipo de lubricante. Posteriormente se mide la rugosidad en la zona de deformación plástica para observar la relación entre el ángulo de inclinación y el contacto con el pin. Finalmente se caracteriza este material realizando ensayos de tensión y dureza para complementar la información y proceder a evaluar los resultados y sacar conclusiones. Este análisis será usado para poder evaluar las diferentes aplicaciones a las que puede ser sometido el Titanio SP-700.

## PALABRAS CLAVE

Tribología; titanio; aleación; SP-700; rozamiento.

# SUMMARY

## TRIBOLOGY OF TITANIUM SP-700 ALLOY

This project consists of evaluating and characterizing the mechanical properties of the SP-700 Titanium alloy to study its formability and under what conditions it can be worked to obtain better behavior. Initially, and through the use of the SFBT simulator (System of bending under tension), the study of the friction coefficients is carried out by subjecting the titanium specimens to an axial load under different angles of inclination of the machine, cylinder speeds, diameter of pin where it is subjected to friction and type of lubricant. Subsequently, the roughness in the plastic deformation zone is measured to observe the relationship between the angle of inclination and the contact with the pin. Finally, this material is characterized by carrying out stress and hardness tests to complement the information and proceed to evaluate the results and draw conclusions. This analysis will be used to be able to evaluate the different applications to which Titanium SP-700 can be subjected.

## KEYWORDS

Tribology; titanium; alloy; SP-700; friction.

# Tabla de Contenidos

RESUMEN .....	1
SUMMARY .....	2
ABREVIATURAS.....	6
LISTADO DE FIGURAS .....	8
LISTADO DE TABLAS.....	11
I. INTRODUCCIÓN.....	13
I.1. Introducción.....	14
I.2. Composición química SP-700.....	15
I.3. Conformado en caliente .....	15
I.4. Comportamiento a la fatiga .....	16
I.5. Aplicaciones comunes aleación de titanio SP-700.....	16
II. PLANIFICACIÓN Y OBJETIVOS.....	18
II.1. Objetivo general.....	19
II.2. Objetivos particulares .....	19
III. EXPERIMENTAL .....	20
III.1. Materiales.....	21
III.2. Técnicas y ensayos de caracterización .....	23
III.2.1. Propiedades tribológicas .....	23
III.2.1.1 Diseño de experimentos .....	24
III.2.2. Rugosidad.....	31
III.2.3. Propiedades mecánicas (Ensayo de tracción).....	33

<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>36</b>
<b>IV.1. Resultados ensayo de tensión .....</b>	<b>37</b>
<b>IV.2. Resultados en la medida de rugosidad .....</b>	<b>39</b>
<b>IV.3. Resultados medición coeficientes de rozamiento .....</b>	<b>43</b>
IV.3.1 Coeficiente de fricción en medio seco para pin 15,9 mm y 22,2 mm	44
IV.3.2 Coeficiente de fricción en medio lubricado para pin 15,9 mm y 22,2 mm.....	48
IV.3.3 Coeficiente de fricción para ángulo de 60° .....	52
IV.3.4 Coeficiente de fricción para ángulo de 15° .....	53
IV.3.5 Coeficiente de fricción para ángulo de 45° .....	55
<b>IV.4. Resultados análisis de varianza.....</b>	<b>57</b>
IV.4.1 ANOVA variable salida 1 – Fuerza máxima cilindro 1 (kN) .....	58
IV.4.2 ANOVA variable salida 2 – Fuerza máxima cilindro 2 (kN) .....	60
IV.4.3 ANOVA variable salida 3 – Desplazamiento máximo cilindro 2 (mm) .....	62
IV.4.4 ANOVA variable salida 4 – Diferencia máxima fuerza cil 1 y cil 2 (kN) .....	64
IV.4.5 ANOVA variable salida 5 – Exterior long Ra (micras) .....	66
IV.4.6 ANOVA variable salida 6 – Exterior transv Ra (micras) .....	66
IV.4.7 ANOVA variable salida 7 – Interior transv Ra (micras) .....	67
IV.4.8 ANOVA variable salida 8 – Interior long Ra (micras) .....	67
IV.4.9 ANOVA variable salida 9 – Promedio presión de contacto (MPa)...	68
IV.4.10 ANOVA variable salida 10 – Promedio coef rozamiento.....	70
IV.4.11 ANOVA variable salida 11 – Fuerza de fricción (N).....	71
<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>73</b>

<b>V.1. Conclusiones .....</b>	<b>74</b>
V.1.1 Conclusiones ensayo de tensión.....	74
V.1.2 Conclusiones medida de rugosidad.....	74
V.1.3 Conclusiones medición de coeficientes de rozamiento.....	74
V.1.3 Conclusiones análisis de varianza.....	75
<b>V.2. Líneas futuras .....</b>	<b>76</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>77</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>78</b>

# ABREVIATURAS

SP-700	Aleación de titanio Ti-4.5Al-3V-2Fe-2Mo
SFBT	Sistema de flexión bajo tensión
E	Módulo elástico [MPa]
Ra	Rugosidad media [micras]
Rz	Rugosidad máxima [micras]
Lo	Longitud inicial entre puntos [mm]
Lu	Longitud final entre puntos [mm]
Rm	Resistencia tracción [MPa]
Rp	Límite elástico convencional [MPa]
Su	Área de rotura [mm <sup>2</sup> ]
F <sub>B</sub>	Fuerza de conformado [N]
$\sigma_y$	Módulo elástico [N/mm <sup>2</sup> ]
t <sub>s</sub>	Espesor probeta [mm]
w	Ancho probeta [mm]
r	Radio [mm]
$\theta$	Ángulo inclinación [°]
$\mu$	Coefficiente de rozamiento [adimensional]
F1	Fuerza cilindro 1 [N]
F2	Fuerza cilindro 2 [N]

Ff	Fuerza fricción [N]
FR	Fuerza resultante [N]
A	Área contacto probeta - pin [mm <sup>2</sup> ]
PC	Presión de contacto [N/mm <sup>2</sup> ]

# LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Grafica temperatura vs Elongación SP700 y Aleación de titanio común.....	14
Figura 2. Grafica Temperatura vs Tensión SP700 y Aleación de titanio común. ....	15
Figura 3 Grafica ciclos para la falla vs Tensión máxima SP700 y Aleación de titanio común.....	16
Figura 4. Probetas Titanio SP-700.....	21
Figura 5. Medidas probetas SP-700.....	21
Figura 6. Elementos básicos del SFBT .....	24
Figura 7. Aplicación de pintura para probetas .....	26
Figura 8. Pin pasador usado para cada ensayo. Diámetro izquierdo 22,2 mm y diámetro derecha 15,9 mm.....	26
Figura 9. Finalización del montaje de cada pin pasador .....	27
Figura 10. Configuración a 60° .....	27
Figura 11. Configuración a 45° .....	28
Figura 12. Configuración a 15° .....	28
Figura 13. Condiciones iniciales CatmanEasy V5.2.2. DAQ Project. ....	29
Figura 14. Tara a cero SFBT sensores cilindros 1 y 2. ....	29
Figura 15. Cuadro de control SFBT.....	30
Figura 16. Toma de medida rugosidad / Lectura rugosímetro.....	31
Figura 17. Perfil de rugosidades para platina ensayada en el SFBT .....	32
Figura 18. Toma medida rugosidad en pin .....	33
Figura 19. Probetas aleación de titanio SP-700 utilizadas para ensayo de tracción.....	33
Figura 20. Maquina universal de ensayos.....	34
Figura 21. Parámetros de ensayo .....	34
Figura 22. Parámetros de la probeta .....	35

Figura 23. Ensayo a tracción probeta 1.....	37
Figura 24. Ensayo a tracción probeta 2.....	38
Figura 25. Diagrama puntos de contacto para medidas de rugosidades .....	40
Figura 26. Orientación marcas longitudinales del proceso de laminación probetas SP-700.....	42
Figura 27. Diagrama representación de algunas variables en el SFBT .....	43
Figura 28. Coeficiente de rozamiento en medio seco pin 15,9 mm .....	46
Figura 29. Fuerza de fricción en medio seco pin 15,9 mm.....	46
Figura 30. Coeficiente de rozamiento en medio seco pin 22,2 mm .....	47
Figura 31. Fuerza de fricción en medio seco pin 22,2 mm.....	48
Figura 32. Coeficiente de rozamiento en medio lubricado pin 15,9 mm.....	49
Figura 33. Fuerza de fricción en medio lubricado pin 15,9 mm .....	50
Figura 34. Coeficiente de rozamiento en medio lubricado pin 22,2 mm.....	51
Figura 35. Fuerza de fricción en medio lubricado pin 22,2 mm .....	51
Figura 36. Coeficiente de rozamiento para ángulo 60° .....	53
Figura 37. Coeficiente de rozamiento para ángulo 15° .....	55
Figura 38. Coeficiente de rozamiento para ángulo 45° .....	56
Figura 39. Medias ángulo vs fuerza máxima cilindro 1.....	58
Figura 40. Medias diámetro vs fuerza máxima cilindro 1 .....	59
Figura 41. Medias velocidad cilindro 2 vs fuerza máxima cilindro 1 .....	59
Figura 42. Medias ángulo vs fuerza máxima cilindro 2.....	60
Figura 43. Medias diámetro pin vs fuerza máxima cilindro 2 .....	61
Figura 44. Medias velocidad cilindro 2 vs fuerza máxima cilindro 2.....	61
Figura 45. Medias ángulo vs desplazamiento máximo cilindro 2.....	62
Figura 46. Medias velocidad cilindro 2 vs desplazamiento máximo cilindro 2 .....	63

Figura 47. Medias ángulo vs diferencia máxima fuerza cil 1 y cil 2.....	64
Figura 48. Medias diámetro pin vs diferencia máxima fuerza cil 1 y cil 2.....	65
Figura 49. Medias ángulo vs promedio presión de contacto .....	68
Figura 50. Medias diámetro pin vs promedio presión de contacto.....	69
Figura 51. Medias ángulo vs promedio coeficiente de rozamiento.....	70
Figura 52. Medias ángulo vs fuerza de fricción .....	71
Figura 53. Medias diámetro pin vs fuerza fricción.....	72

# LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Composición química SP-700.....	15
Tabla 2. Medidas probetas SP-700 a ensayar.....	22
Tabla 3 Diseño de experimentos para el SFBT .....	25
Tabla 4. Cuadro guía toma de medidas rugosidades en las 20 probetas ensayadas.....	32
Tabla 5. Tabla guía para toma de medidas de rugosidad en los 2 pines pasadores.....	33
Tabla 6. Rugosidades probetas ángulo 15° en aceite y seco .....	40
Tabla 7. Rugosidades probetas ángulo 45° en aceite y seco .....	41
Tabla 8. Rugosidades probetas ángulo 60° en aceite y seco .....	41
Tabla 9. Rugosidades en pines antes y después del ensayo en SFBT .....	42
Tabla 10. Coeficiente de fricción en medio seco para pin 15,9 mm y 22,2 mm.....	45
Tabla 11. Coeficiente de fricción en medio lubricado para pin 15,9 mm y 22,2 mm .....	49
Tabla 12. Probetas ángulo de 60° para estudio de coeficiente rozamiento .....	52
Tabla 13. Probetas ángulo de 15° para estudio de coeficiente rozamiento .....	54
Tabla 14. Probetas ángulo de 45° para estudio de coeficiente rozamiento .....	55
Tabla 15. Análisis de varianza para V1 .....	58
Tabla 16. Análisis de varianza para V2 .....	60
Tabla 17. Análisis de varianza para V3 .....	62
Tabla 18. Análisis de varianza para V4 .....	64
Tabla 19. Análisis de varianza para V5 .....	66
Tabla 20. Análisis de varianza para V6 .....	66
Tabla 21. Análisis de varianza para V7 .....	67
Tabla 22. Análisis de varianza para V8 .....	67

Tabla 23. Análisis de varianza para V9 .....	68
Tabla 24. Análisis de varianza para V10 .....	70
Tabla 25. Análisis de varianza para V11 .....	71

# **I. INTRODUCCIÓN**

## INTRODUCCIÓN

## I. Introducció

# I.1. Introducció

Las aleaciones de titanio son más livianas y resistentes que el acero, usadas generalmente en varios campos de la industria que requiere alta tecnología. Los campos de investigación de estos materiales se han expandido a la industria aeronáutica, aeroespacial, automotriz, medicina y en algunos casos en aplicaciones del deporte.

La aleación de Titanio SP-700 (Ti-4.5Al-3V-2Fe-2Mo), es una aleación de tipo alfa + beta cuyos granos son ultra finos alcanzando tamaños de grano entre 2 a 3 micras. Esta estructura micro fina le permite tener excelentes propiedades de resistencia a la fatiga. Este material es una aleación de alta resistencia y alta conformabilidad desarrollada por la compañía JFE Steel en 1990. Tiene excelente comportamiento superplástico (Figura 1) y resistencia a la fatiga (figura 3) a comparación de las aleaciones comunes de Titanio (Ti-6Al-4V). Ti SP-700 es usado en la industria aeroespacial y automotriz debido a su baja densidad a comparación del acero, bajo módulo de Young y alta durabilidad. (JFE Steel, 2008)

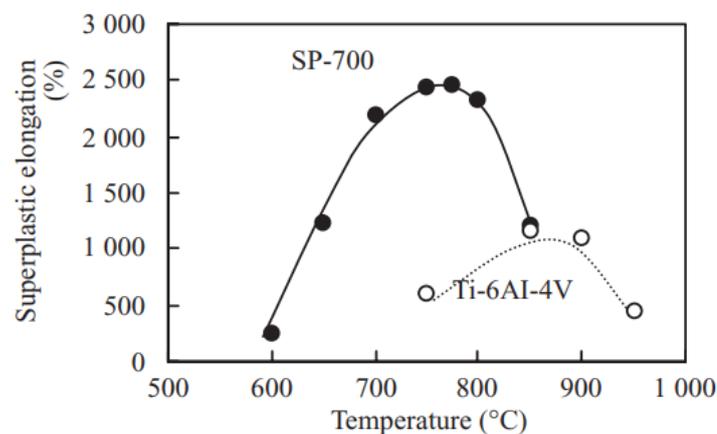


Figura 1. Gráfica temperatura vs Elongación SP700 y Aleación de titanio común.

## I. Introducción

# I.2. Composición química SP-700

Comparando la composición química del Ti SP-700 con la aleación de titanio común podemos comparar los porcentajes en la siguiente tabla. (Ishikawa, Kuboyama, Niikura, & Ouchi, 1993)

	Al	V	Fe	Mo	O	C	N	H	T <sub>p</sub> (K)
SP-700	4.38	2.98	1.98	1.87	0.09	0.008	0.004	0.007	1173
Ti-6Al-4V	6.47	4.09	0.14	-	0.17	0.025	0.015	0.015	1268

Tabla 1. Composición química SP-700

# I.3. Conformado en caliente

El SP-700 en el conformado en caliente presenta baja susceptibilidad al agrietamiento y buena calidad de superficie después de cualquier conformado incluyendo la baja oxidación y defectos superficiales. En condiciones de temperatura, el SP-700 presenta mayores tasas de deformación a temperaturas menores, lo que lo convierte en un material de muy buenas prestaciones para conformado en caliente en comparación a la aleación de titanio común. (JFE Steel, 2005)

En algunos casos se puede formar oxido en el titanio durante el trabajo en caliente debido a que es un metal muy activo y reacciona fácilmente con cualquier gas como el oxígeno. Para esto es importante remover estas capas de óxido ya que la alta dureza que produce ese oxido afecta las propiedades de conformado, ductilidad y resistencia a la fatiga. (JFE Steel, 2005)

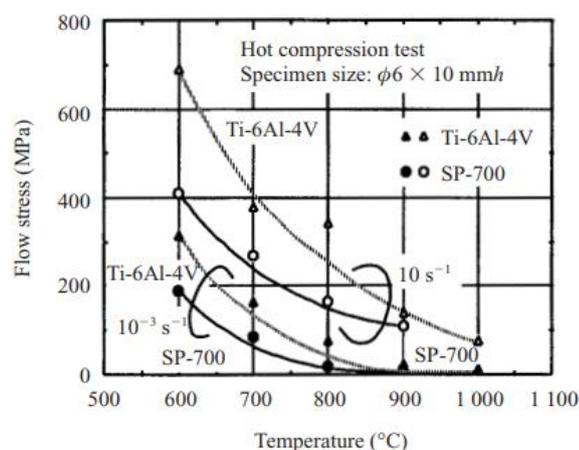


Figura 2. Grafica Temperatura vs Tensión SP700 y Aleación de titanio común.

## I. Introducción

# I.4. Comportamiento a la fatiga

La microestructura de granos ultra finos en el SP-700 le permite a este material tener una alta resistencia a la fatiga debido a que disminuye la posibilidad de formación de grietas a trabajos cíclicos. En comparación a la aleación común, luego del trabajo en caliente la aleación de titanio SP-700 presenta menor tamaño de grano. A medida que el tamaño de grano es más fino, la resistencia a la fatiga se incrementa en este metal lo cual permite que este material tenga excelentes prestaciones para aplicaciones de coches de carreras, motores de motocicletas, deportes etc. (Ishikawa, Kuboyama, Niikura, & Ouchi, 1993)

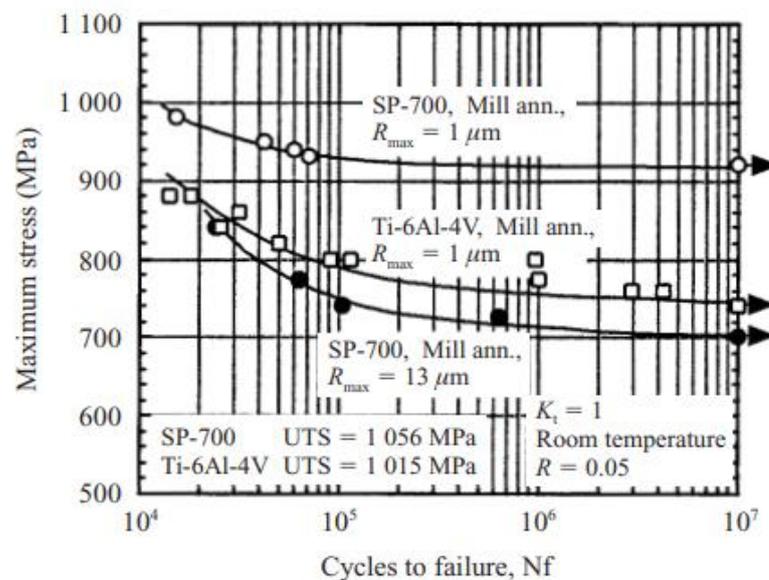


Figura 3 Gráfica ciclos para la falla vs Tensión máxima SP700 y Aleación de titanio común.

# I.5. Aplicaciones comunes aleación de titanio SP-700

Algunas aplicaciones de las aleaciones de titanio pueden estar relacionadas en las aplicaciones biomédicas ya que es un material compatible con el organismo humano sin producir reacciones alérgicas, en el ámbito energético para la construcción de centrales térmicas eléctricas debido a su resistencia mecánica y química, en el sector automotriz debido a su resistencia a la fatiga, en la industria militar como material de blindaje debido a su alta dureza y tenacidad, en la industria aeroespacial para construcción de aviones y cohetes espaciales debido a su baja densidad

## I. Introducción

---

y resistencia a altas temperaturas, construcción naval debido a su resistencia a la corrosión marina, joyería debido a su resistencia y facilidad de conformado (ductilidad), instrumentos deportivos para fabricación de palos de golf y para decoración por su buen acabado.

## **II. PLANIFICACIÓN Y OBJETIVOS**

PLANIFICACIÓN Y  
OBJETIVOS

## II. Objetivos

---

### II.1. Objetivo general

Teniendo en cuenta las consideraciones anteriores, la hipótesis general de este trabajo establece que el titanio SP-700 es un material cuyas propiedades mecánicas le permiten tener un mejor comportamiento bajo cargas de flexión.

**Es por esta razón que el objetivo general de este proyecto se centra en el estudio y análisis de la tribología de la aleación de titanio SP-700.**

### II.2. Objetivos particulares

Para poder alcanzar el objetivo principal es importante enumerar los siguientes objetivos particulares

- Estudio de rugosidad en probetas
- Caracterización de probetas de titanio SP-700
- Análisis de propiedades de fricción a tensión en el SFBT (simulador de flexión bajo tensión)
- Comparación de resultados para determinar el comportamiento del material ante cargas a flexión.

### **III. EXPERIMENTAL**

EXPERIMENTAL

## III.1. Materiales

Los materiales empleados para este trabajo serán 20 probetas de aleación de titanio SP-700 suministradas por la UPV (Figura 4). Estas probetas tienen de largo 400 mm, de ancho 25 mm y de espesor 2.4 mm. Además, tienen una sección reducida para generar concentración de esfuerzos cuyo ancho es de 8 mm (figura 5). Algunas de estas probetas tienen otras medidas, por esta razón se especifican las medidas de las probetas usadas para los ensayos.

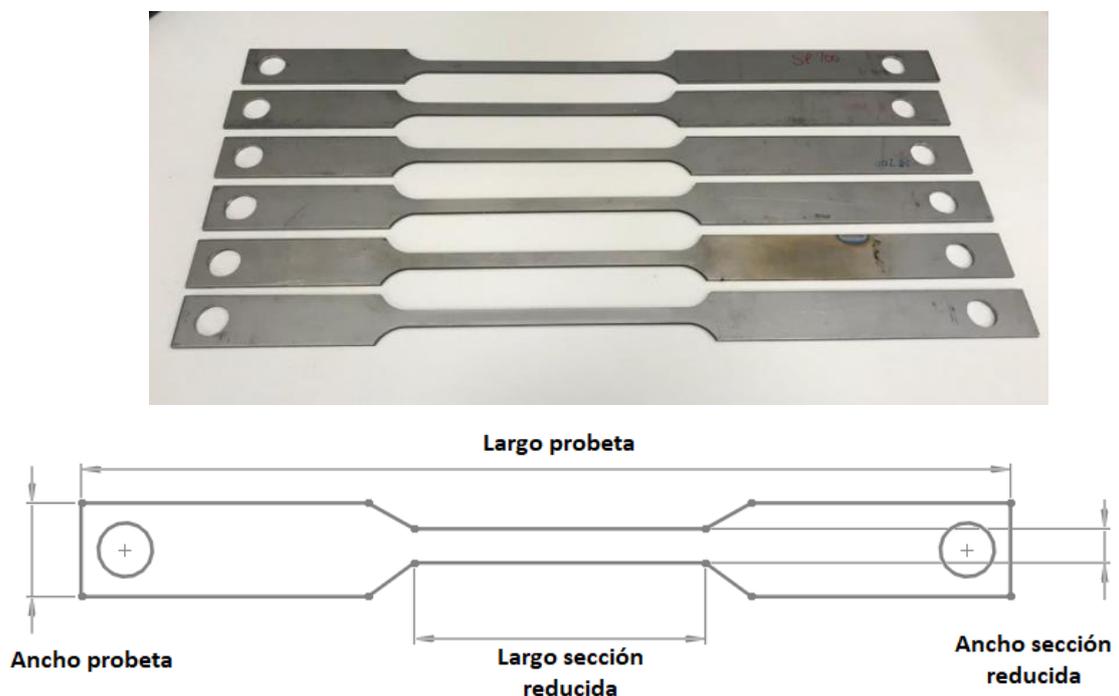


Figura 4. Probetas Titanio SP-700



Figura 5. Medidas probetas SP-700

Probeta	Largo (mm)	Largo sección reducida (mm)	Ancho (mm)	Ancho sección reducida (mm)	Espesor (mm)
1	410	140	25	8	2,4
2		240			
3		140			
4		140			
5		200			
6		140			
7		140			
8		200			
9		140			
10		140			
11		140			
12		140			
13		240			
14		140			
15		140			
16		140			
17		140			
18		140			
19		240			
20		140			

Tabla 2. Medidas probetas SP-700 a ensayar.

## III.2. Técnicas y ensayos de caracterización

Este apartado incluirá todas las técnicas empleadas para determinar el objetivo de investigación. Para cada una de las técnicas empleadas se va a realizar una breve explicación del procedimiento y explicación del equipo empleado para el mismo.

### III.2.1. Propiedades tribológicas

Para la determinación de las propiedades tribológicas del titanio SP-700 se ha utilizado una máquina de ensayos denominada SFBT (Sistema de flexión bajo tensión). Esta fue una máquina diseñada y fabricada en varias etapas por grupos de diseño del departamento de Ingeniería mecánica de la UPV.

Este sistema está constituido por una estructura de aluminio, un conjunto de elementos que permiten el desplazamiento de un sistema de medida y a su vez almacena datos en tiempo real. Mediante el desplazamiento controlado de una probeta de aleación de titanio SP-700 alrededor de un cilindro o pin se forma un ángulo determinado por la posición relativa de los elementos del simulador. El desplazamiento de la pletina de titanio se realiza mediante actuadores lineales cuya velocidad y posición es controlada. La fuerza y tensiones resultantes sobre el material son consecuencia de las propiedades del material a analizar (Pla, 2015). Se pretende que con los valores obtenidos en la simulación de aproximadamente 20 probetas se puedan analizar los resultados obtenidos.

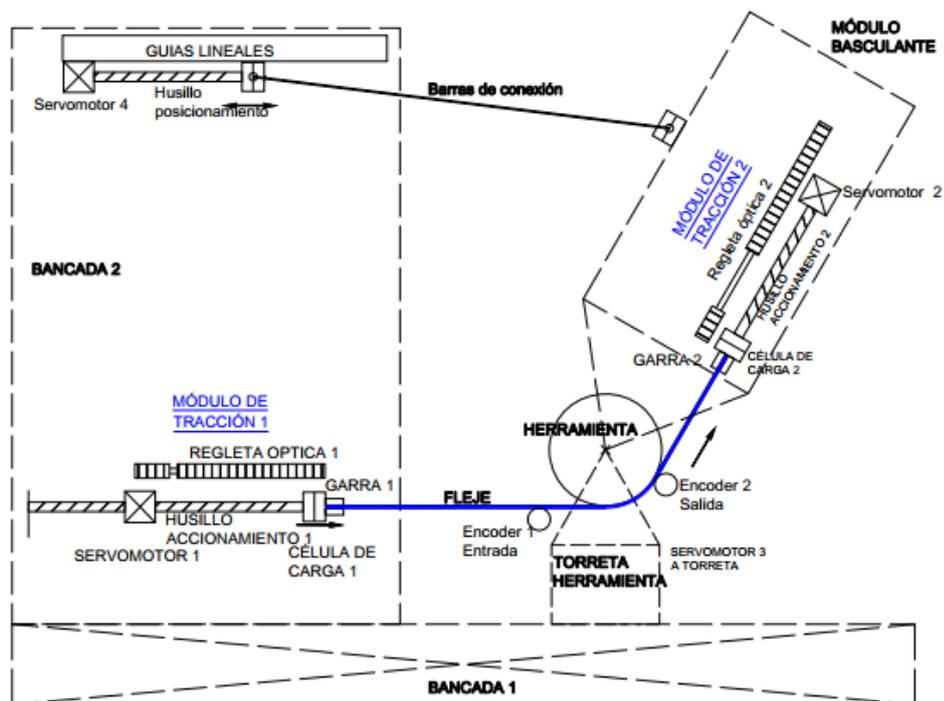


Figura 6. Elementos básicos del SFBT

Antes de iniciar con esta prueba de caracterización fue necesario realizar un diseño de experimentos.

### III.2.1.1 Diseño de experimentos

El diseño de experimentos es una técnica estadística, que nos permite identificar las causas de un efecto dentro de un estudio experimental, para de esta manera se pueda conocer el comportamiento de ciertas variables ante el estímulo de otras. Es por esta razón que para este caso en particular se van a estudiar las siguientes variables de interés.

1. **EXP:** Es la variable que nos permitirá separar cada una de las 20 probetas. Esta variable irá desde el EXP 1 hasta el EXP 20.
2. **Angulo (°):** Será el ángulo de inclinación del SFBT. Para este estudio se decide realizar pruebas con 15, 45 y 60°.
3. **Diámetro Pin (mm):** Es el diámetro del pin pasador del SFBT que va a permitir el rozamiento en un punto de cada probeta. Este punto va a ser fundamental para nuestro estudio. Se van a usar dos diámetros: 15,9 mm y 22,2 mm.

4. **Velocidad cilindros (mm/s):** Es la velocidad a la que el cilindro 2 va a desplazarse para realizar el estudio. El cilindro 1 se considera fijo (0 mm/s) y para el cilindro 2 se van a usar velocidades de 1 y 5 mm/s.
5. **Lubricante:** En el punto de contacto del pin pasador con la probeta se va a revisar el comportamiento de la variable respuesta con la superficie seca y con aceite. El aceite usado para este caso sería Repsol Telex HVLP 46 (ISO VG 46).
6. **Fuerza cilindro 2:** Esta sería nuestra variable respuesta. Con esta fuerza más adelante se procederá a realizar unos cálculos para poder obtener los coeficientes de rozamiento.

EXP	FACTOR 1: ANGULO GRADOS	FACTOR 2: DIAMETRO PIN MM	FACTOR 3: VELOCIDAD MM/S	FACTOR 4: LUBRICANTE
1	15	22,2	5	ACEITE
2	60	15,9	5	SECO
3	45	15,9	5	ACEITE
4	60	15,9	1	ACEITE
5	15	15,9	5	SECO
6	15	15,9	5	ACEITE
7	45	22,2	1	ACEITE
8	60	15,9	1	SECO
9	45	15,9	1	ACEITE
10	15	22,2	5	SECO
11	60	22,2	5	ACEITE
12	15	22,2	1	ACEITE
13	45	15,9	5	SECO
14	15	22,2	1	SECO
15	60	22,2	1	SECO
16	45	22,2	1	SECO
17	45	22,2	5	SECO
18	15	15,9	1	ACEITE
19	15	15,9	1	SECO
20	45	22,2	5	ACEITE

*Tabla 3 Diseño de experimentos para el SFBT*

Antes de iniciar el proceso de ensayo con el SFBT es necesario rociar una ligera capa de pintura en cada una de las probetas en la zona en la cual van a hacer contacto con el pin. Esto es debido a que esta máquina tiene instalada una cámara que permite tomar varias capturas durante el ensayo. Estas capturas se van a pasar más adelante a un programa especial que nos va a ayudar a calcular desplazamientos, velocidades y

aceleraciones entre puntos. Esta información nos puede servir más adelante para poder lograr los objetivos de estudio. En la siguiente imagen (figura 7) se puede apreciar las capturas que se observan desde la cámara del SFBT. Los puntos que se observan son los que nos van a permitir arrojar más datos para el estudio.



*Figura 7. Aplicación de pintura para probetas*

Una vez se tienen las probetas pintadas procedemos a realizar el montaje del pin pasador utilizado para cada ensayo. Finalmente se cierra la carcasa del pin y se acomoda la cámara para poder tomar la serie de imágenes.



*Figura 8. Pin pasador usado para cada ensayo. Diámetro izquierdo 22,2 mm y diámetro derecha 15,9 mm.*



*Figura 9. Finalización del montaje de cada pin pasador*

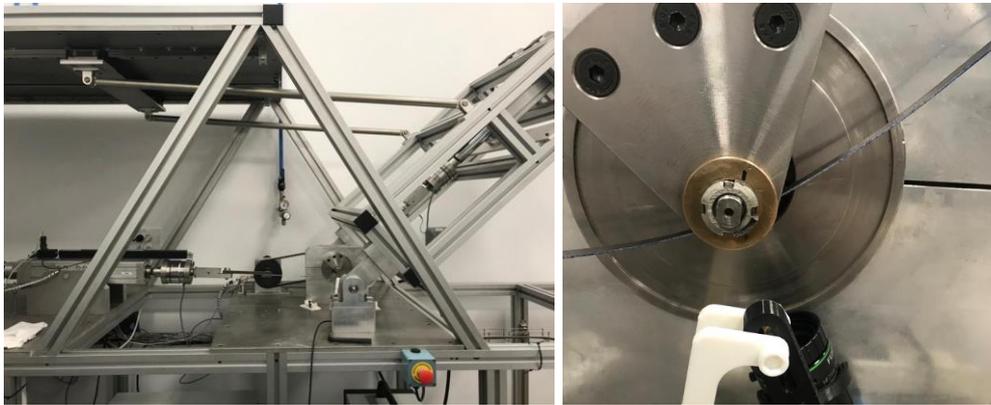
Dependiendo el ensayo a realizar se va adoptando la configuración descrita en la Tabla 2. Para el caso de los ángulos de inclinación se realiza el siguiente montaje mostrado en la figura 10.



*Figura 10. Configuración a 60°*



*Figura 11. Configuración a 45°*



*Figura 12. Configuración a 15°*

Luego de darle el ángulo de inclinación a la máquina, nos disponemos a realizar el montaje de la probeta. Para esto es indispensable dejar el cilindro 1 fijo y realizar el desplazamiento del cilindro 2 para lograr que la máquina encaje con la oreja de la probeta.

Para realizar los ensayos, se usa el software CatmanEasy V5.2.2. DAQ Project el cual es el interfaz entre la máquina física y el ordenador. En este programa se ven los diferentes sensores que tiene la máquina instalada, sin embargo, en nuestro caso puntual solamente trabajaremos con los sensores de fuerza de los cilindros y los sensores de desplazamiento de los mismos.

Al realizar el montaje de la probeta es importante realizar una precarga manual del sistema. Para nuestro caso estamos usando lo más cercano posible a 1.8 kN. Esto es debido a que para comparar los resultados de las 20 probetas es importante que cada ensayo se realice bajo condiciones de carga similares (Ver figura 13).

catmanEasy V5.2.2 DAQ project: <C:\Users\Lab-AIM\Documents\HBM....banco\_deformacion\_plastica.MEP>

Channel name	Reading	Sample rate/Filter	Sensor/Function	Zero value
1 MX840_0				
5 Sensor fuerza cilindro 1	1,681 kN	50 Hz / Filter: Off	U3 100KN - 134110232 (134110232)	-0,8981 kN
6 Sensor fuerza cilindro 2	1,808 kN	50 Hz / Filter: Off	U3 100KN - 134110239 (134110239)	-1,269 kN
7 Sensor de presión		50 Hz / BE 5 Hz (Auto)	ISE30A.PRESION	-1000000 Pa
8 Sensor de Caudal		50 Hz / BE 5 Hz (Auto)	PFMV301-M CAUDAL	-1000000 ---
9 Desplazamiento_Cilindro2	0,00000 mm	50 Hz / Filter: Off	PD500360LP1	0,00000 mm
10 Desplazamiento_Cilindro1	0,00000 mm	50 Hz / Filter: Off	PD500360LP1	0,00000 mm
11 Encoder_izquierdo	No signal	50 Hz / Filter: Off	E6C2-CWZ1X	0,00000 *
12 Encoder_derecho	No signal	50 Hz / Filter: Off	E6C2-CWZ1X	0,00000 *
<b>Computation channels</b>				
14 Diferencia fuerzas	0,01546		ABS(Sensor fuerza cilindro 1-Sensor fuerz	0,00000
15 1 Fuerza cilindro 1	15,70 N		Sensor fuerza cilindro 1*1000	0,00000 N
16 2 Fuerza cilindro 2	0,2373 N		Sensor fuerza cilindro 2*1000	0,00000 N

Figura 13. Condiciones iniciales CatmanEasy V5.2.2. DAQ Project.

Una vez aplicada la precarga, es importante realizar la tara a cero del SFBT. Como se puede ver en la siguiente imagen, tanto los sensores de fuerza como desplazamiento de los cilindros 1 y 2 se encuentran cercanos al valor cero (ver figura 14).

catmanEasy V5.2.2 DAQ project: <C:\Users\Lab-AIM\Documents\HBM....banco\_deformacion\_plastica.MEP>

Channel name	Reading	Sample rate/Filter	Sensor/Function	Zero value
1 MX840_0				
5 Sensor fuerza cilindro 1	0,00727 kN	50 Hz / Filter: Off	U3 100KN - 134110232 (134110232)	0,7894 kN
6 Sensor fuerza cilindro 2	0,00956 kN	50 Hz / Filter: Off	U3 100KN - 134110239 (134110239)	0,5078 kN
7 Sensor de presión		50 Hz / BE 5 Hz (Auto)	ISE30A.PRESION	-1000000 Pa
8 Sensor de Caudal		50 Hz / BE 5 Hz (Auto)	PFMV301-M CAUDAL	-1000000 ---
9 Desplazamiento_Cilindro2	0,00000 mm	50 Hz / Filter: Off	PD500360LP1	0,00000 mm
10 Desplazamiento_Cilindro1	0,00000 mm	50 Hz / Filter: Off	PD500360LP1	0,00000 mm
11 Encoder_izquierdo	No signal	50 Hz / Filter: Off	E6C2-CWZ1X	0,00000 *
12 Encoder_derecho	No signal	50 Hz / Filter: Off	E6C2-CWZ1X	0,00000 *
<b>Computation channels</b>				
14 Diferencia fuerzas	0,01546		ABS(Sensor fuerza cilindro 1-Sensor fuerz	0,00000
15 1 Fuerza cilindro 1	15,70 N		Sensor fuerza cilindro 1*1000	0,00000 N
16 2 Fuerza cilindro 2	0,2373 N		Sensor fuerza cilindro 2*1000	0,00000 N

Figura 14. Tara a cero SFBT sensores cilindros 1 y 2.

En el cuadro de control que se muestra a continuación (figura 15) se puede ver la configuración del ensayo que se quiere realizar. Se establecen los valores de tiempo del ensayo (9 segundos para nuestros ensayos) y velocidad del cilindro 2 (depende del valor del diseño de experimentos). Se debe tener presente que el SFBT tiene una capacidad de carga en sus celdas de 10 kN y que cuando el sistema detecta que se llega a ese valor se activa el paro de emergencia del equipo y se procede a pausar el ensayo y detener la toma de datos. Una vez finalizado cada ensayo se debe detener la toma de capturas de la cámara y se debe realizar el desmontaje de la probeta. Este desmontaje se debe hacer de tal manera que no se pierda el ángulo de inclinación al cual fue sometida ya que en estas condiciones se van a medir rugosidades el cual es el siguiente apartado.

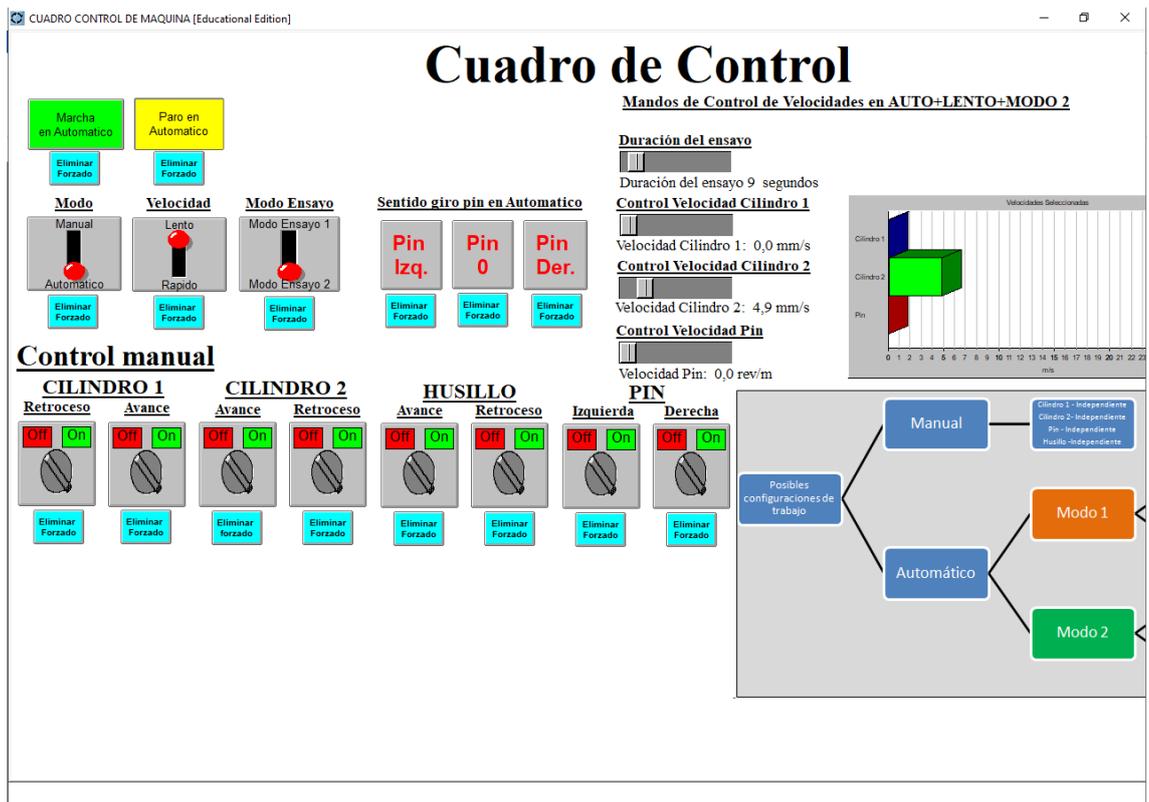


Figura 15. Cuadro de control SFBT

### III.2.2. Rugosidad

Este apartado contiene la parte experimental realizada a cada una de las 20 probetas estudiadas para poder medir su rugosidad y ver más adelante la relación entre los ensayos del SFBT con las medidas obtenidas con el rugosímetro. También se realiza la medida de rugosidad de los 2 pines pasadores tanto transversal como longitudinalmente para conocer la variación en la rugosidad antes y después del ensayo con el SFBT (ver figura 16).

Para la medida de las rugosidades se usa un rugosímetro de marca Mitutoyo modelo SJ-301 como el que se puede ver a continuación.



*Figura 16. Toma de medida rugosidad / Lectura rugosímetro*

Para organizar nuestro material a medir, es importante seguir con la misma identificación de las probetas (EXP 1, EXP 2, ... etc.). A cada una de las 20 probetas se les toman las medidas de rugosidad exterior e interior tanto longitudinal como transversalmente para cada superficie. Se entiende parte exterior a aquella superficie que durante el ensayo en el SFBT no tuvo contacto directo con el pin pasador, por otro lado, la parte interior es aquella superficie que tuvo contacto directo con el pin durante el ensayo descrito en el anterior apartado.

Para cada una de las superficies, es importante tomar dos medidas: La primera es el Ra que es la media obtenida del perfil de rugosidades (medida obtenida en micras), y la Rz que es la medida máxima o pico máximo obtenido del perfil de rugosidades (medida obtenida en micras). Tanto para el Ra como para el Rz se toman tres medidas

diferentes para mitigar en lo posible las desviaciones de los datos y al final trabajar con promedios.

EXP	EXTERIOR LONG		EXTERIOR TRANSV		INTERIOR TRANSV		INTERIOR LONG	
	Ra (micras)	Rz (micras)	Ra (micras)	Rz (micras)	Ra (micras)	Rz (micras)	Ra (micras)	Rz (micras)
0								
0								
0								
1								
1								
1								

Tabla 4. Cuadro guía toma de medidas rugosidades en las 20 probetas ensayadas.

En la siguiente imagen se puede observar un ejemplo del perfil de rugosidades que se puede obtener gracias a este equipo. En esta grafica se puede observar las diferentes medidas obtenidas a lo largo de los 8 mm recorridos por la aguja del equipo. Se pueden ver tanto el Rz (pico máximo) y el Ra es calculado por el equipo con el promedio de todas esas medidas obtenidas. Cada cuadro representa 0,2 mm de escala.

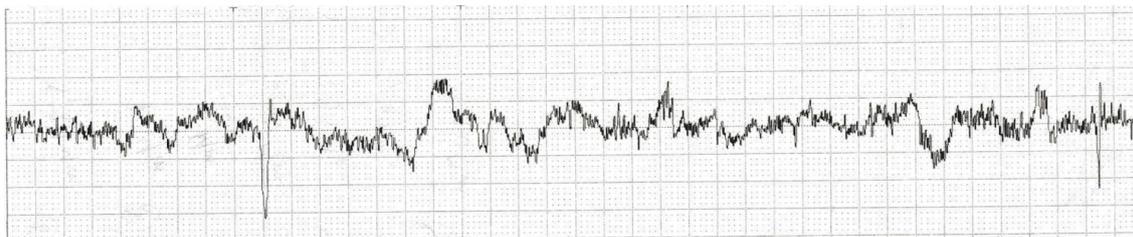


Figura 17. Perfil de rugosidades para platina ensayada en el SFBT

Una vez obtenidas las medidas de rugosidades en las probetas, se procede a tomar las medidas de los pines pasadores (ver figura 18). Se usa la siguiente tabla de apoyo para observar mejor los datos. Es importante tener en cuenta la rugosidad del pin tanto antes como después del ensayo para comparar datos. Para el pin de 15,9 mm y el de 22,2 mm se toman los mismos valores de Ra y Rz tanto longitudinal como transversalmente.

PIN	RUGOSIDAD ANTES DEL ENSAYO				RUGOSIDAD DESPUES DEL ENSAYO			
	DIRECCION LONG		DIRECCION TRANSV		DIRECCION LONG		DIRECCION TRANSV	
	Ra (micras)	Rz (micras)	Ra (micras)	Rz (micras)	Ra (micras)	Rz (micras)	Ra (micras)	Rz (micras)
PIN 15,9 mm								
PIN 15,9 mm								
PIN 15,9 mm								
PIN 22,2 mm								
PIN 22,2 mm								
PIN 22,2 mm								

Tabla 5. Tabla guía para toma de medidas de rugosidad en los 2 pines pasadores.



Figura 18. Toma medida rugosidad en pin

### III.2.3. Propiedades mecánicas (Ensayo de tracción)

El ensayo de tracción consiste en realizar una prueba destructiva para obtener, interpretar y analizar algunas propiedades mecánicas de cualquier material. Este ensayo somete una probeta con geometría definida a una carga que la estira aumentando su elongación con el tiempo hasta producir la rotura de la muestra. Al tener esta rotura se pueden calcular varias propiedades en la máquina de ensayos.

Para este ensayo es necesario que las probetas tengan cierta forma característica con medidas de curvatura en cuello que generen concentradores de esfuerzos para que el material se rompa en una zona específica y no en los bordes. En este caso tenemos 2 probetas de titanio SP-700 a las cuales se les va a realizar este ensayo (ver figura 19).



Figura 19. Probetas aleación de titanio SP-700 utilizadas para ensayo de tracción.

El equipo usado para realizar este ensayo se denomina maquina universal de ensayos (ver figura 20) y se pueden hacer pruebas de tracción, compresión y flexión. Simplemente para realizar una prueba u otra solo es necesario cambiar las mordazas o apoyos y elegir el sentido y orientación en el que se quiere aplicar la carga.



Figura 20. Maquina universal de ensayos

Para realizar este ensayo primero se debe configurar en el software de la maquina el tipo de ensayo que en este caso es tracción. Posteriormente se instalan las celdas de carga de 50 kN ya que el material que se va a fallar es un metal altamente resistente. Finalmente se digita la velocidad de desplazamiento de las mordazas que en nuestro caso será de 30 mm/min (ver figura 21).

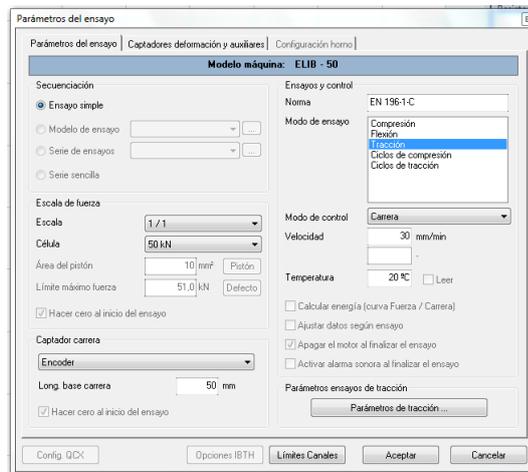


Figura 21. Parámetros de ensayo

Una vez se tienen estos parámetros iniciales, debemos medir la sección reducida de la probeta. Esta sección nos arroja medidas de 8 mm de ancho y 2.5 mm de espesor (ver figura 22). También se debe marcar unos puntos en cada final de la sección reducida y tomar esa medida. Esto es para poder tomar la elongación de la probeta al final del ensayo.

The image shows a software window titled "Parámetros de la probeta" with the following fields and values:

Field	Value
Referencia del ensayo	T1
Procedencia	
Muestra número	
Materia	
Fecha/hora muestra	01/01/2000 0:00:00
Tipo de probeta	Sin definir
Sección	Rectangular
Ancho	8,00 mm
Espesor	2,50 mm
Longitud	14,00 mm
Resit. del proyecto	550,0 MPa
Edad	28
Masa	0,00 g
Densidad	0,00 g/cm <sup>3</sup>
Tipo de ajuste	Sin definir
Condición probeta	Sin definir
Condición curado	Sin definir
Tipo rotura	Sin definir
Alargamiento después de rotura	<input checked="" type="checkbox"/> Cálculo manual alarg. remanente después rotura
Obtención del valor de Lo	Manual
Longitud inicial entre puntos (Lo)	49,65 mm
Longitud final entre puntos (Lu)	11,50 mm
Sección a la rotura (Su)	<input checked="" type="checkbox"/> Preguntar por 'Su' al finalizar el ensayo
Ancho	9,00 mm
Espesor	1,00 mm
Área Final (Su)	9,00 mm <sup>2</sup>
Cargas / apoyos para flexión	
Distancia entre apoyos (inf.)	60,00 mm
Distancia entre apoyos de carga	0,00 mm
Dist. base de medida	1000,00 mm
<input type="checkbox"/> Cálculo de la Resistencia y la Tensión usando el área corregida.	
<input type="checkbox"/> Pedir las cotas de la probeta al finalizar el ensayo	
Buttons	Información adicional..., Cotas probeta, Aceptar, Cancelar

Figura 22. Parámetros de la probeta

Se le da inicio al ensayo y cuando la probeta falle el ensayo se detiene. Finalmente el software nos pide la medida final entre puntos y tanto el espesor como el ancho del punto de falla. Digitamos estos valores en el programa y nos arroja la grafica que se va a mostrar mas adelante.

## **IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Esta sección se enseñarán los resultados obtenidos en cada uno de los sub apartados anteriormente descritos.

## IV.1. Resultados ensayo de tensión

A continuación, se presentan las dos graficas obtenidas para cada ensayo de tracción realizado. Esto con el fin de conocer más propiedades mecánicas de esta aleación de titanio SP-700.

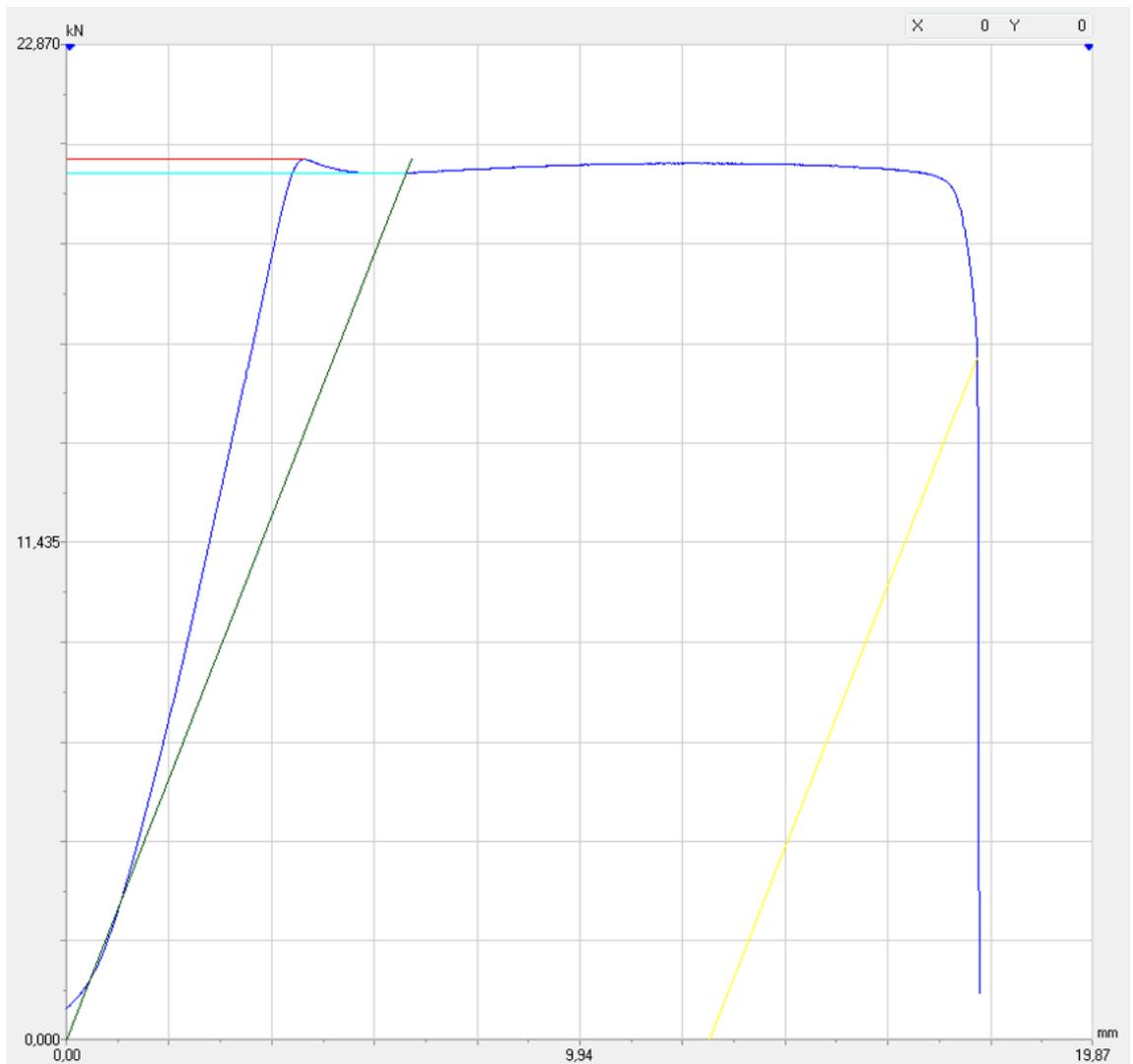


Figura 23. Ensayo a tracción probeta 1.

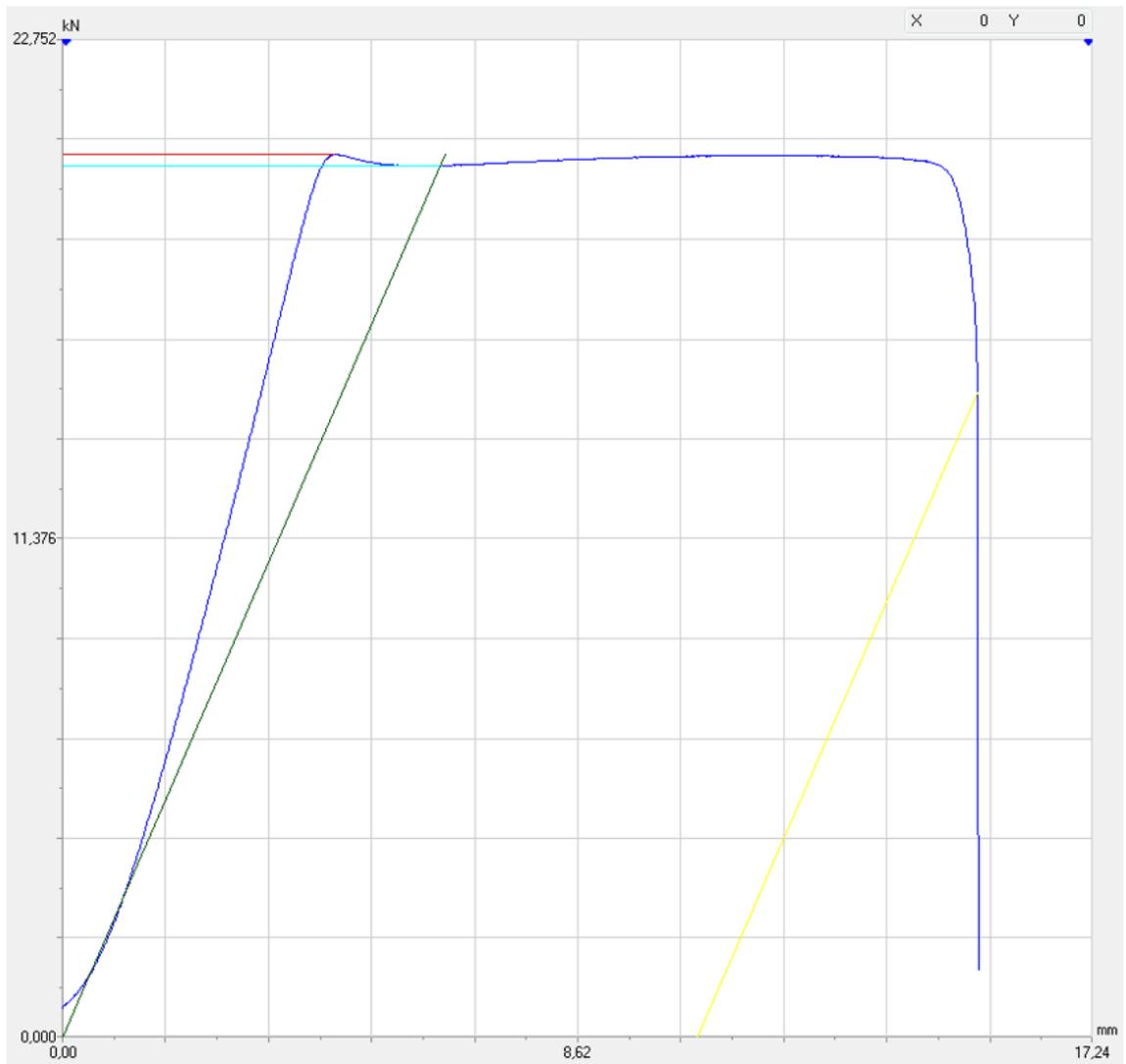


Figura 24. Ensayo a tracción probeta 2.

Luego de analizar estos datos se pueden observar las excelentes propiedades mecánicas del SP-700. Este material tiene una resistencia máxima a la tracción promedio de 1.009,3 MPa, un límite elástico promedio de 994.95 MPa, un módulo de elasticidad promedio de 7.707,8 MPa y se necesitaron aproximadamente de 20.187 kN de fuerza para lograr su rotura.

Probeta	1		2	
Ancho	8	mm	8	mm
Espesor	2,5	mm	2,5	mm
Longitud	14	mm	14	mm
Área	20	mm <sup>2</sup>	20	mm <sup>2</sup>

Longitud inicial entre puntos (Lo)	49,65	mm	49,65	mm
Longitud final entre puntos (Lu)	15,3	mm	15,3	mm
Límite elástico al (Tracción)	0,001	%	0,001	%
Resistencia máxima	1011,9	MPa	1006,7	MPa
Límite de extensión al (Tracción)	0,5	%	0,5	%
Resistencia tracción (Rm)	1011,9	MPa	1006,7	MPa
Límite elástico convencional (Rp)	996,1	MPa	993,8	MPa
Área de rotura (Su)	11,9	mm <sup>2</sup>	11,9	mm <sup>2</sup>
Fuerza máxima	20,239	kN	20,135	kN
Módulo de elasticidad (E)	7566,6	MPa	7849	MPa

## IV.2. Resultados en la medida de rugosidad

Para los resultados de las rugosidades, es necesario realizar un listado por grupos de las medidas obtenidas para poder comparar los resultados de una forma mas sencilla. Es por esto que para este apartado se van a separar las medidas obtenidas por las variables Angulo de Inclinación (15, 45 y 60°) y Tipo de lubricante (seco o aceite).

Para las siguientes tablas mostradas a continuación, se debe mencionar que los datos son separados por punto de contacto para tener una mejor medida. La columna exterior longitudinal es la rugosidad medida en la parte exterior al punto de contacto de la probeta con el pin en una dirección longitudinal, la columna interior longitudinal es la rugosidad medida en la parte interior al punto de contacto de la probeta con el pin en la dirección longitudinal. Lo mismo sucede, pero para la medida obtenida en la dirección transversal.

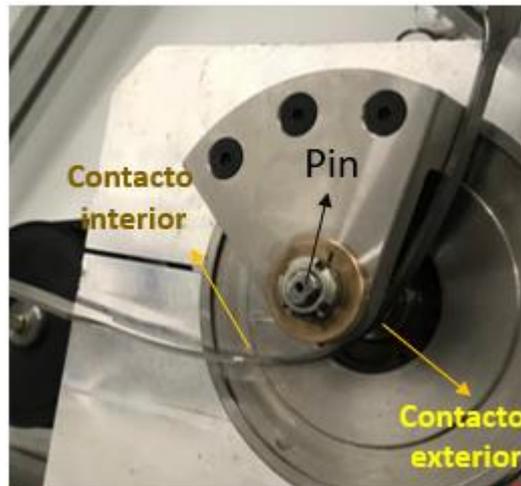


Figura 25. Diagrama puntos de contacto para medidas de rugosidades

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para las rugosidades de la probeta. Se nombra el EXP 0 a las medidas obtenidas en las probetas antes del ensayo. Se puede suponer que la medida antes del ensayo en las 20 probetas analizadas puede ser la misma ya que vienen de la misma lamina de material SP-700.

RUN	EXTERIOR LONG		EXTERIOR TRANSV		INTERIOR TRANSV		INTERIOR LONG		TIPO LUB	ANGULO
	Ra (micras)	Rz (micras)	Ra (micras)	Rz (micras)	Ra (micras)	Rz (micras)	Ra (micras)	Rz (micras)		
0	0,35	1,29	0,89	4,27	0,89	4,27	0,35	1,29	-	-
1	0,33	1,63	0,96	2,98	0,68	2,95	0,63	2,80	ACEITE	15
6	0,44	1,93	0,60	2,85	0,55	2,66	0,79	3,00	ACEITE	15
12	0,18	0,92	0,83	3,30	0,69	2,91	0,27	1,22	ACEITE	15
18	0,34	1,53	0,63	2,84	0,58	2,74	0,53	1,76	ACEITE	15
5	0,90	2,84	1,22	2,73	0,48	2,07	0,38	1,36	SECO	15
10	0,46	1,78	0,57	3,05	0,75	3,31	0,26	1,42	SECO	15
14	0,21	1,22	0,72	3,13	0,62	2,96	1,11	4,18	SECO	15
19	0,20	1,08	0,51	2,38	0,45	2,56	0,44	1,77	SECO	15

Tabla 6. Rugosidades probetas ángulo 15° en aceite y seco

RUN	EXTERIOR LONG		EXTERIOR TRANSV		INTERIOR TRANSV		INTERIOR LONG		TIPO LUB	ANGULO
	Ra (micras)	Rz (micras)	Ra (micras)	Rz (micras)	Ra (micras)	Rz (micras)	Ra (micras)	Rz (micras)		
0	0,35	1,29	0,89	4,27	0,89	4,27	0,35	1,29	-	-
3	0,83	3,71	0,42	2,11	0,62	2,05	0,32	1,55	ACEITE	45
7	0,80	3,00	1,20	4,42	1,12	4,14	0,70	4,10	ACEITE	45
9	0,48	1,87	0,82	3,42	0,95	4,61	0,65	3,60	ACEITE	45
20	0,40	1,64	0,83	3,22	0,69	3,28	0,35	2,19	ACEITE	45
13	0,44	1,51	0,66	3,69	0,66	2,62	0,40	1,63	SECO	45
16	0,42	1,92	0,84	3,27	0,73	3,26	0,38	2,03	SECO	45
17	0,41	1,59	0,69	2,93	0,44	2,18	0,42	2,44	SECO	45

Tabla 7. Rugosidades probetas ángulo 45° en aceite y seco

RUN	EXTERIOR LONG		EXTERIOR TRANSV		INTERIOR TRANSV		INTERIOR LONG		TIPO LUB	ANGULO
	Ra (micras)	Rz (micras)	Ra (micras)	Rz (micras)	Ra (micras)	Rz (micras)	Ra (micras)	Rz (micras)		
0	0,35	1,29	0,89	4,27	0,89	4,27	0,35	1,29	-	-
4	0,89	1,97	1,17	3,39	0,65	3,28	0,27	1,22	ACEITE	60
11	0,47	2,13	0,70	3,30	0,67	2,86	0,71	3,99	ACEITE	60
2	0,96	3,37	0,96	2,98	0,68	2,95	0,63	2,80	SECO	60
8	0,82	5,03	1,43	4,11	0,59	3,16	0,58	2,25	SECO	60
15	0,45	1,68	0,58	2,63	0,82	3,54	0,43	2,05	SECO	60

Tabla 8. Rugosidades probetas ángulo 60° en aceite y seco

Después de analizar estos resultados se puede determinar que la medida de rugosidad para las 20 probetas cambia al momento de someter las probetas a una carga de deformación. Comparando los resultados con el EXP 0 (Rugosidad inicial) se puede apreciar que esta depende de una carga externa para poder variar su medida.

Para las tres tablas mostradas anteriormente, se puede apreciar que la medida de rugosidad transversal tanto para el interior como el exterior, en la mayoría de casos es superior a la medida en la dirección longitudinal, esto es debido a que las marcas del material luego de su proceso de laminación permiten que quede con cierto acabado que, al momento de someterlo a una carga para deformarlo, estas líneas se prolonguen en la misma dirección y permita obtener estos resultados. En este caso, para las 20 probetas se podía apreciar que las marcas formadas por la laminación se encontraban situadas en longitudinalmente en la probeta como se muestra a continuación.

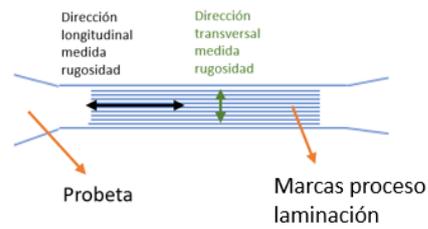


Figura 26. Orientación marcas longitudinales del proceso de laminación probetas SP-700.

Para el caso de los pines usados para el ensayo en el SFBT se puede apreciar que las medidas de rugosidad aumentan tanto longitudinal como transversalmente al momento de ser sometido a una carga de presión que más adelante denominaremos como presión de contacto. Además, los pines fueron fabricados con cierto acabado al momento de ser mecanizado y este acabado se puede rayar debido a esta carga en el punto de contacto. Si observamos el Rz que son los picos que muestra el rugosímetro se puede ver como alcanzan en algunos puntos medidas de 9.98, 7.8 y 8.45 micras luego del ensayo.

PIN	RUGOSIDAD PIN ANTES DEL ENSAYO				RUGOSIDAD PIN DESPUES DEL ENSAYO			
	DIRECCION LONG		DIRECCION TRANSV		DIRECCION LONG		DIRECCION TRANSV	
	Ra (micras)	Rz (micras)	Ra (micras)	Rz (micras)	Ra (micras)	Rz (micras)	Ra (micras)	Rz (micras)
PIN 15,9 mm	0,5	3,14	0,44	3,47	2,5	1,25	1,58	4,81
PIN 15,9 mm	0,62	3,2	0,53	3,5	2,62	2,12	1,96	9,98
PIN 15,9 mm	0,65	3,5	0,42	3,1	2,62	1,83	1,7	7,8
PIN 22,2 mm	0,19	1,29	0,55	3,13	2,25	7,65	1,13	5,54
PIN 22,2 mm	0,29	1,1	0,39	3,1	2,4	8,45	1,8	7,86
PIN 22,2 mm	0,22	1,3	0,42	3,3	2,3	7,8	1,7	6,5

Tabla 9. Rugosidades en pines antes y después del ensayo en SFBT

## IV.3. Resultados medición coeficientes de rozamiento

Según el estudio previo realizado por Rafael Pla, es necesario usar una serie de ecuaciones para poder obtener diferentes variables presentadas a continuación. (Pla, 2015). Mediante una hoja de cálculo se presentan todas estas ecuaciones teniendo como base las medidas obtenidas en el sistema de flexión bajo tensión (SFBT).

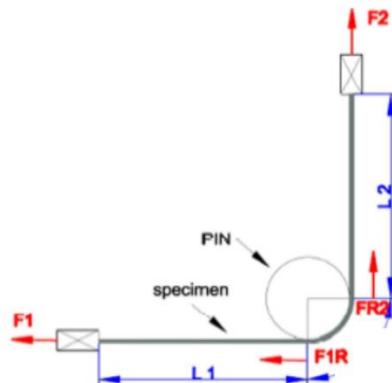


Figura 27. Diagrama representación de algunas variables en el SFBT

Como variables de entrada del estudio se tienen:

- Velocidad cilindro 1 (mm/s)
- Velocidad cilindro 2 (mm/s)
- Velocidad del pin (mm/s)
- Dirección del pin (en sentido o en contra manecillas del reloj)
- Diámetro del pin (mm)
- Lubricación (Seco o Con aceite)
- Rugosidad de la superficie (Ra)
- Temperatura (°C)
- Angulo de conformado (°)

Como variables de entrada de cada probeta se tienen:

- Ancho (mm)
- Espesor (mm)
- Longitud total (mm)
- L1: Longitud desde el cilindro 1 hasta el centro del pin (mm)
- L2: Longitud desde el cilindro 2 hasta el centro del pin (mm)

- Limite elástico SP-700 (N/mm<sup>2</sup>)
- Módulo de Young SP-700 (N/mm<sup>2</sup>)

Algunas de las ecuaciones usadas por Rafael Pla en su tesis de 2015 son las siguientes:

$$F_B = \frac{\sigma_y \cdot t_s^2 \cdot w}{2 \cdot r} * \tan\left(\frac{\theta}{2}\right); \text{ donde:}$$

$$\begin{aligned} F_B &= \text{Fuerza conformado (N)} \\ \sigma_y &= \text{Modulo de Young (N/mm}^2\text{)} \\ t_s &= \text{Espesor probeta (mm)} \\ w &= \text{ancho probeta (mm)} \\ 2 \cdot r &= \text{Diámetro pin (mm)} \\ \theta &= \text{Angulo conformado (}^\circ\text{)} \end{aligned}$$

$$\mu = \frac{2}{\theta} \cdot \frac{F2 - F1 - FB}{(F1 + F2)}; \text{ FF} = F2 - F1 - FB; \text{ donde:}$$

$$\begin{aligned} \mu &= \text{Coeficiente de rozamiento} \\ F1 &= \text{Fuerza cilindro 1 (N)} \\ F2 &= \text{Fuerza cilindro 2 (N)} \\ FF &= \text{Fuerza fricción (N)} \end{aligned}$$

$$FR = \frac{F1 + F2}{A}; PC = \frac{FR}{A}; \text{ donde:}$$

$$\begin{aligned} FR &= \text{Fuerza resultante (N)} \\ A &= \text{Area contacto probeta - pin (mm}^2\text{)} \\ PC &= \text{Presión de contacto (N/mm}^2\text{)} \end{aligned}$$

Con base en estos resultados se procede a comparar el coeficiente de fricción y la fuerza de fricción para cada uno de los siguientes escenarios:

### IV.3.1 Coeficiente de fricción en medio seco para pin 15,9 mm y 22,2 mm

En primera instancia se van a comparar los resultados en un medio seco en el punto de contacto entre el pin y la probeta. Primero con el diámetro de pin de 15.9 mm y posteriormente con el diámetro de 22.2 mm.

EXPERIMENTO	FACTOR 1: ANGULO °	FACTOR 2: DIAMETRO PIN mm	FACTOR 3: VELOCIDAD mm/s	FACTOR 4: LUBRICANTE
2	60	15,9	5	SECO
5	15	15,9	5	SECO
8	60	15,9	1	SECO
13	45	15,9	5	SECO
19	15	15,9	1	SECO
10	15	22,2	5	SECO
14	15	22,2	1	SECO
15	60	22,2	1	SECO
16	45	22,2	1	SECO
17	45	22,2	5	SECO

*Tabla 10. Coeficiente de fricción en medio seco para pin 15,9 mm y 22,2 mm*

Se puede observar que las probetas que más deslizan para un medio seco en pin de 15,9 mm son aquellas que fueron sometidas a carga con ángulos de 60° (EXP 2 y EXP 8) debido a que su coeficiente de rozamiento tiende a cero a medida que aumenta la presión de contacto. Además, estas mismas probetas presentan una fuerza de fricción menor a las demás por la misma razón. También se puede observar que la probeta con coeficientes de rozamiento mayores es la que fue sometida a un ángulo de inclinación de 45° (EXP 13). En cuanto a la fuerza de fricción presente, el estudio muestra un comportamiento estable de 2000 a 4000 N para las probetas sometidas a un ángulo de contacto de 15° (EXP 5 y EXP 19). (Ver figuras 28 y 29)

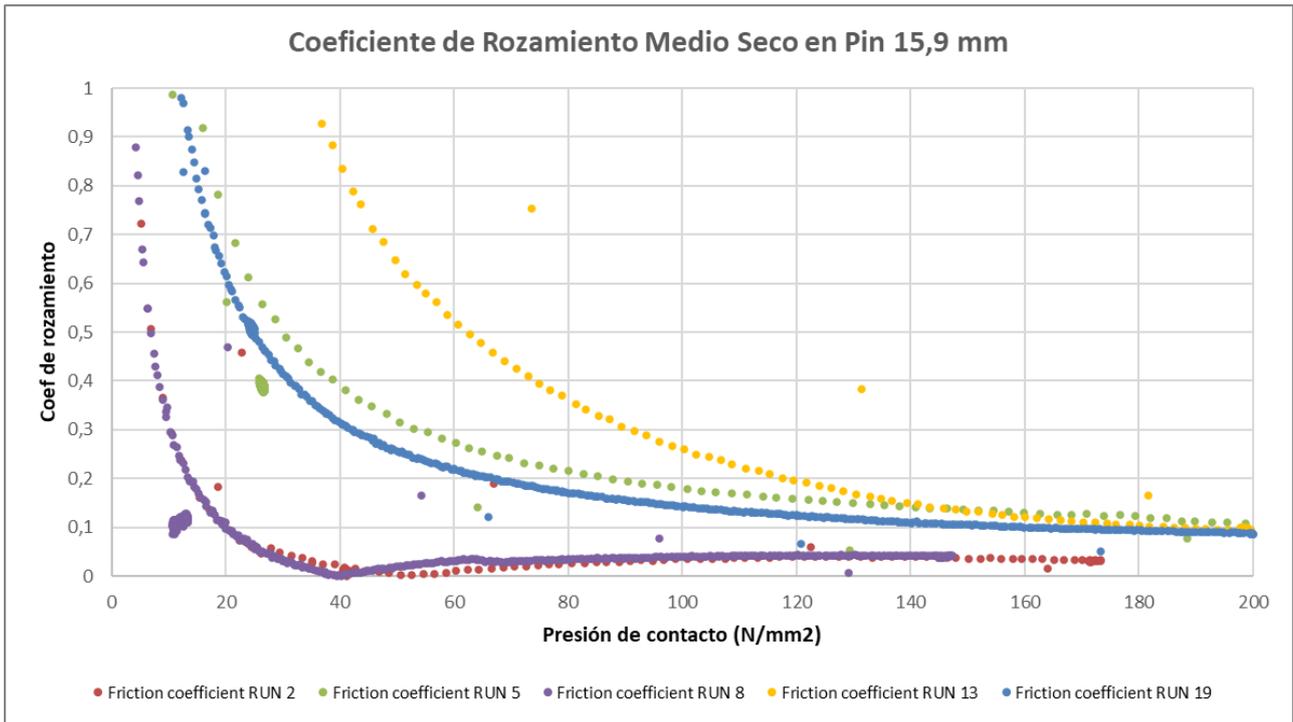


Figura 28. Coeficiente de rozamiento en medio seco pin 15,9 mm

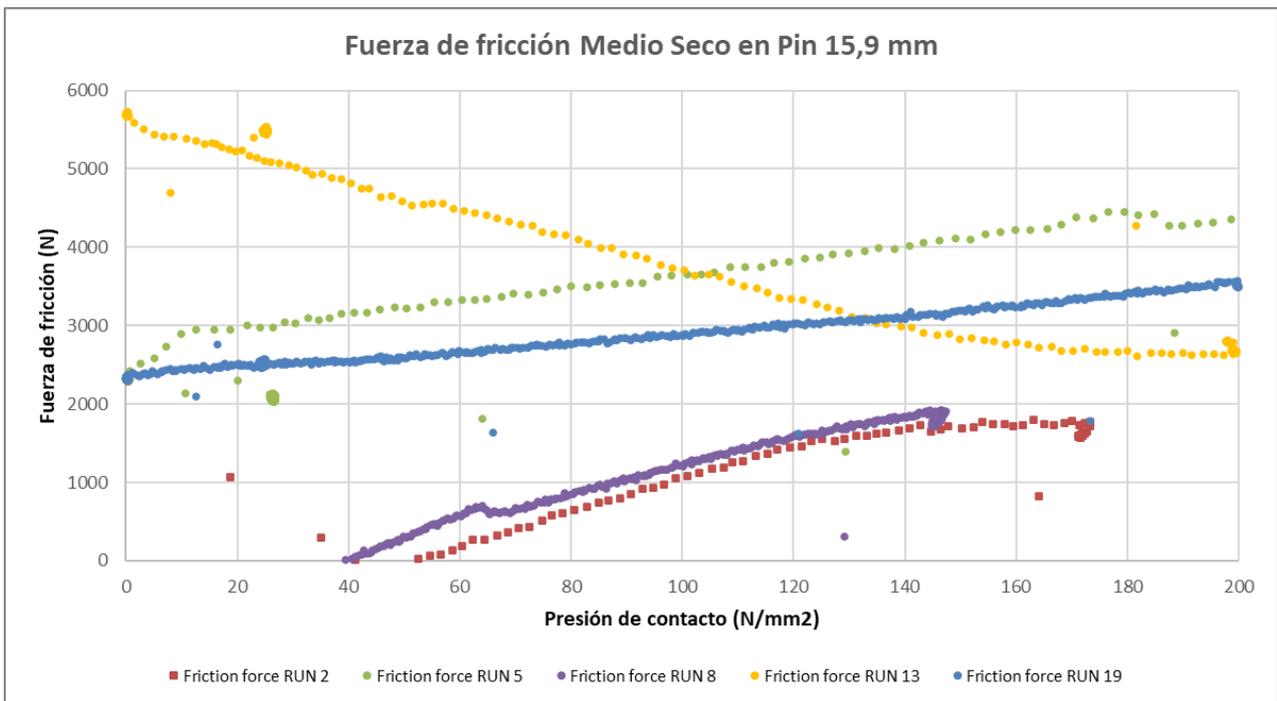


Figura 29. Fuerza de fricción en medio seco pin 15,9 mm

Para el caso del pin de 22,2 se puede observar que las probetas con menores coeficientes de rozamiento para un medio seco son aquellas que fueron sometidas a

carga con ángulos de 60° (EXP 15) debido a que su coeficiente de rozamiento tiende a cero a medida que aumenta la presión de contacto. Además, estas mismas probetas presentan una fuerza de fricción menor a las demás por la misma razón. También se puede observar que la probeta con coeficientes de rozamiento mayores es la que fue sometida a un ángulo de inclinación de 45° (EXP 16 y EXP 17). En cuanto a la fuerza de fricción presente, el estudio muestra un comportamiento estable de 1500 a 3000 N para las probetas sometidas a un ángulo de contacto de 15° (EXP 10 y EXP 14). (Ver figuras 30 y 31)

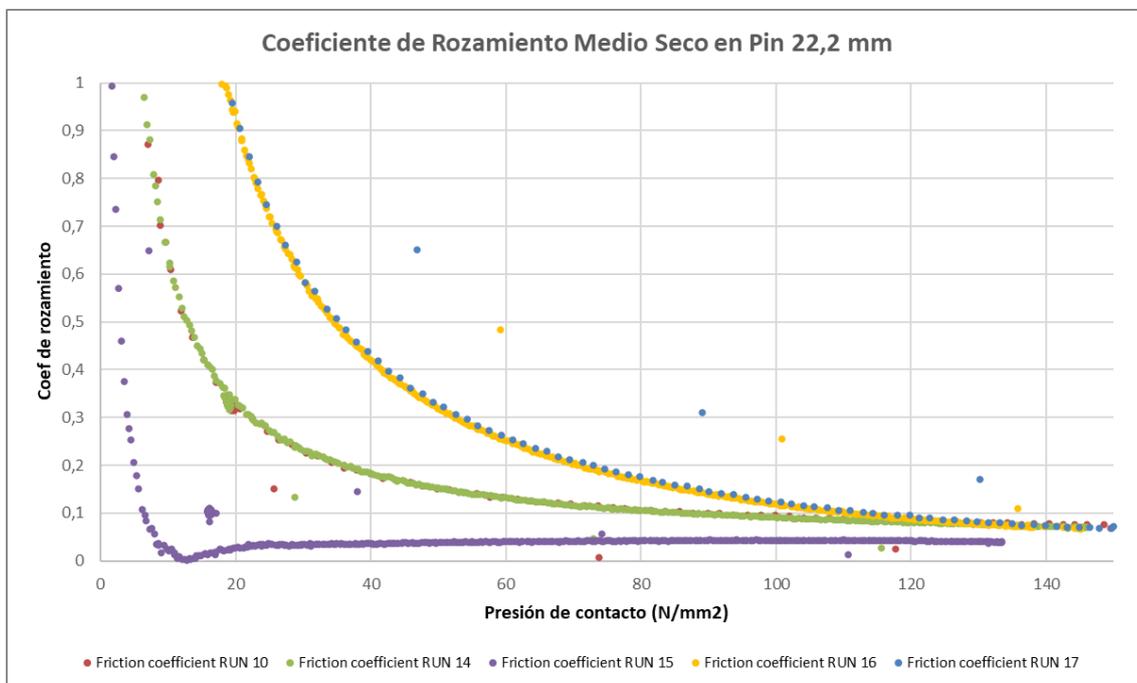


Figura 30. Coeficiente de rozamiento en medio seco pin 22,2 mm

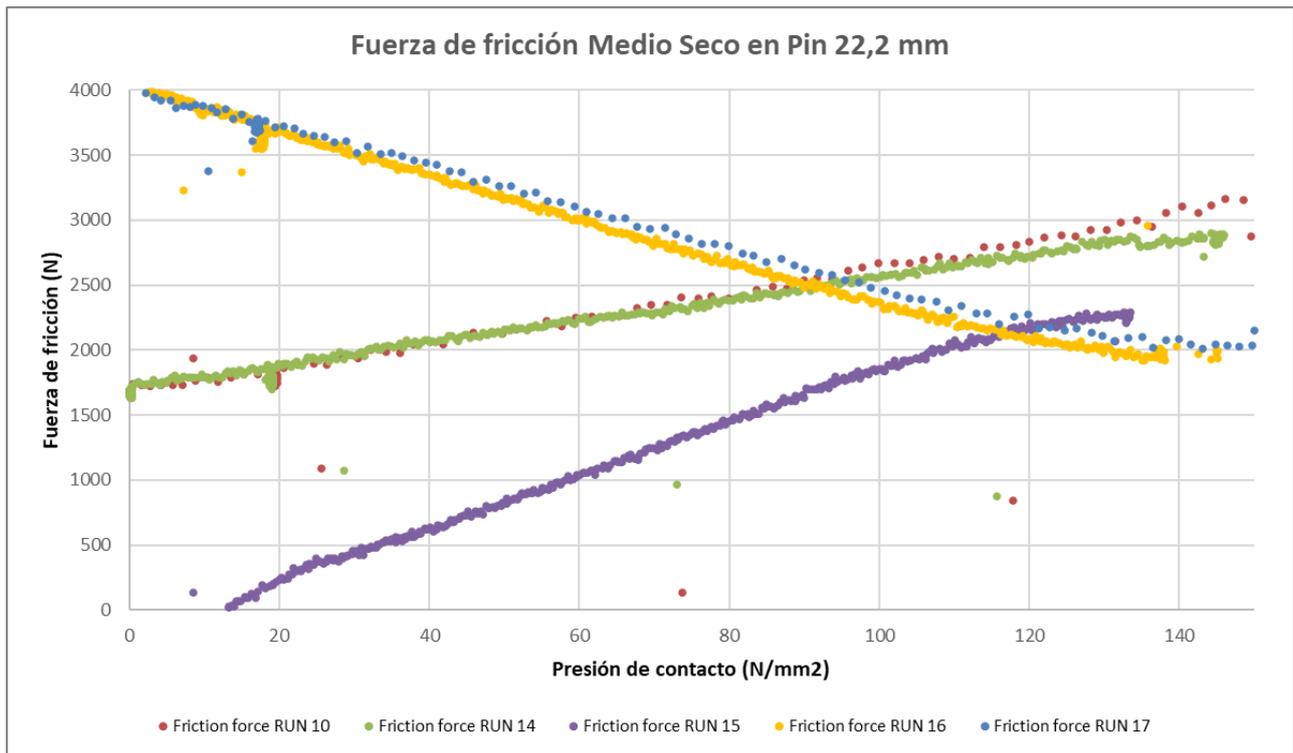


Figura 31. Fuerza de fricción en medio seco pin 22,2 mm

### IV.3.2 Coeficiente de fricción en medio lubricado para pin 15,9 mm y 22,2 mm

Finalmente se van a comparar los resultados en un medio lubricado en el punto de contacto entre el pin y la probeta. Primero con el diámetro de pin de 15.9 mm y posteriormente con el diámetro de 22.2 mm.

EXP	FACTOR 1: ANGULO °	FACTOR 2: DIAMETRO PIN mm	FACTOR 3: VELOCIDAD mm/s	FACTOR 4: LUBRICANTE
3	45	15,9	5	ACEITE
4	60	15,9	1	ACEITE
6	15	15,9	5	ACEITE
9	45	15,9	1	ACEITE
18	15	15,9	1	ACEITE
1	15	22,2	5	ACEITE
7	45	22,2	1	ACEITE
11	60	22,2	5	ACEITE

12	15	22,2	1	ACEITE
20	45	22,2	5	ACEITE

Tabla 11. Coeficiente de fricción en medio lubricado para pin 15,9 mm y 22,2 mm

Se puede observar que las probetas que más deslizan para un medio lubricado en pin de 15,9 mm son aquellas que fueron sometidas a carga con ángulos de 60° (EXP 4) debido a que su coeficiente de rozamiento tiende a cero a medida que aumenta la presión de contacto. Además, estas mismas probetas presentan una fuerza de fricción menor a las demás por la misma razón. También se puede observar que la probeta con coeficientes de rozamiento mayores es la que fue sometida a un ángulo de inclinación de 45° (EXP 3 y EXP 9). En cuanto a la fuerza de fricción presente, el estudio muestra un comportamiento estable de 2400 a 3500 N para las probetas sometidas a un ángulo de contacto de 15° (EXP 6 y EXP 18). (Ver figuras 32 y 33)

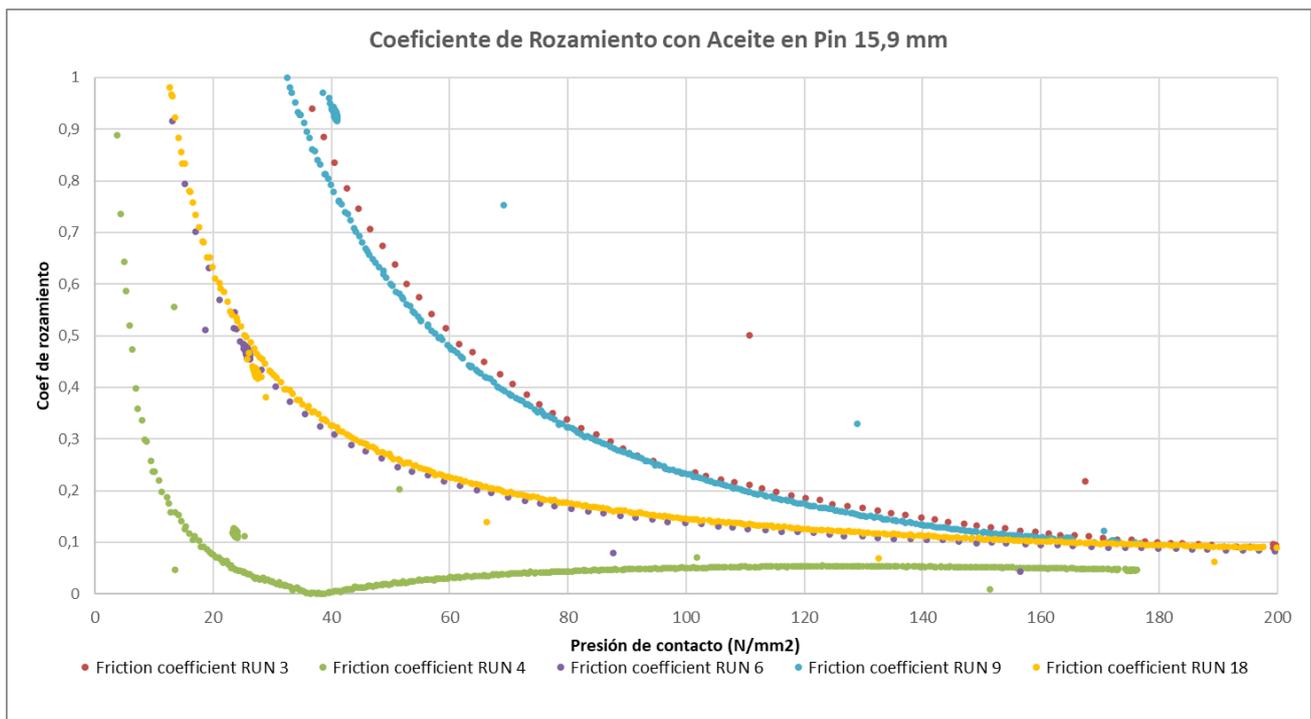


Figura 32. Coeficiente de rozamiento en medio lubricado pin 15,9 mm

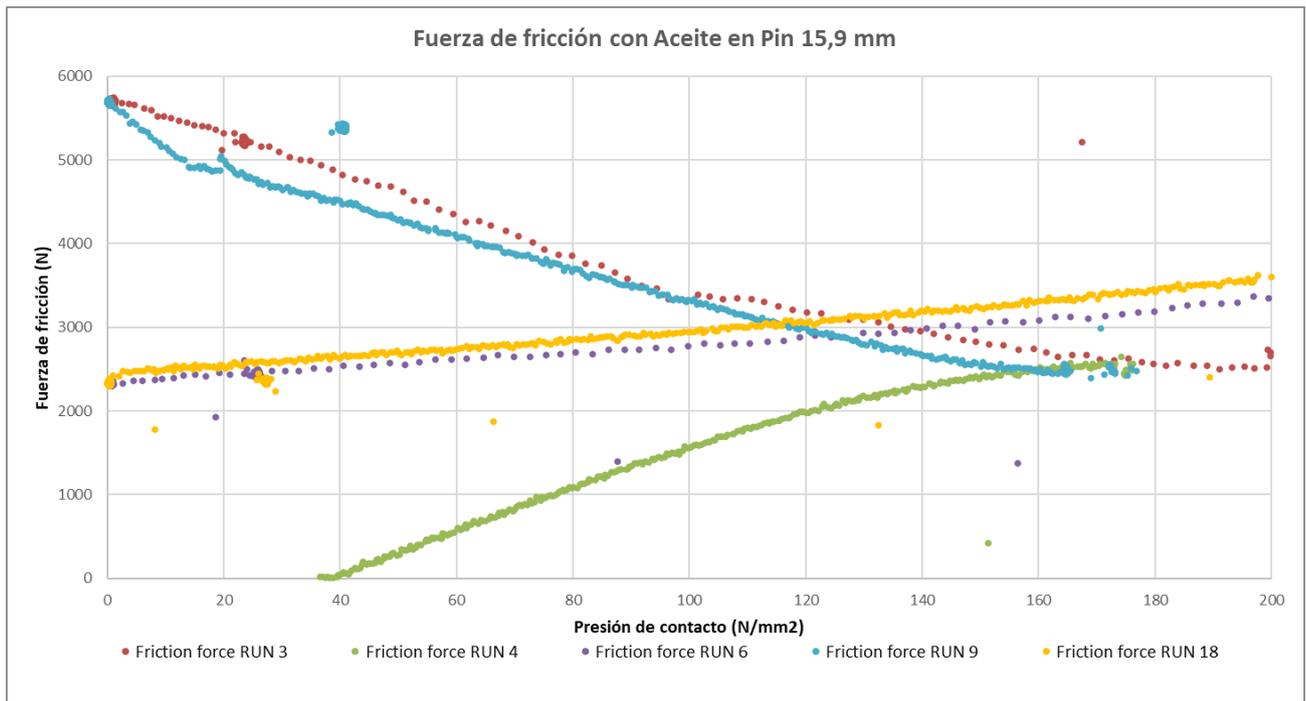
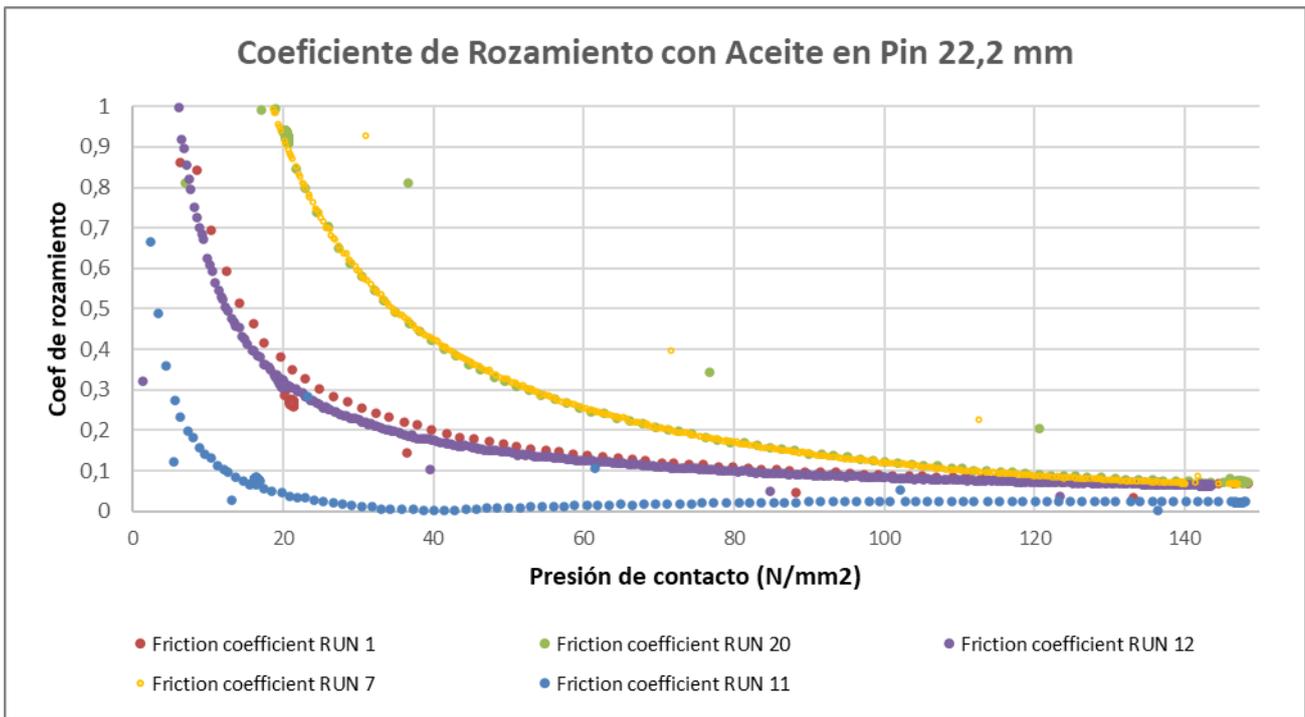
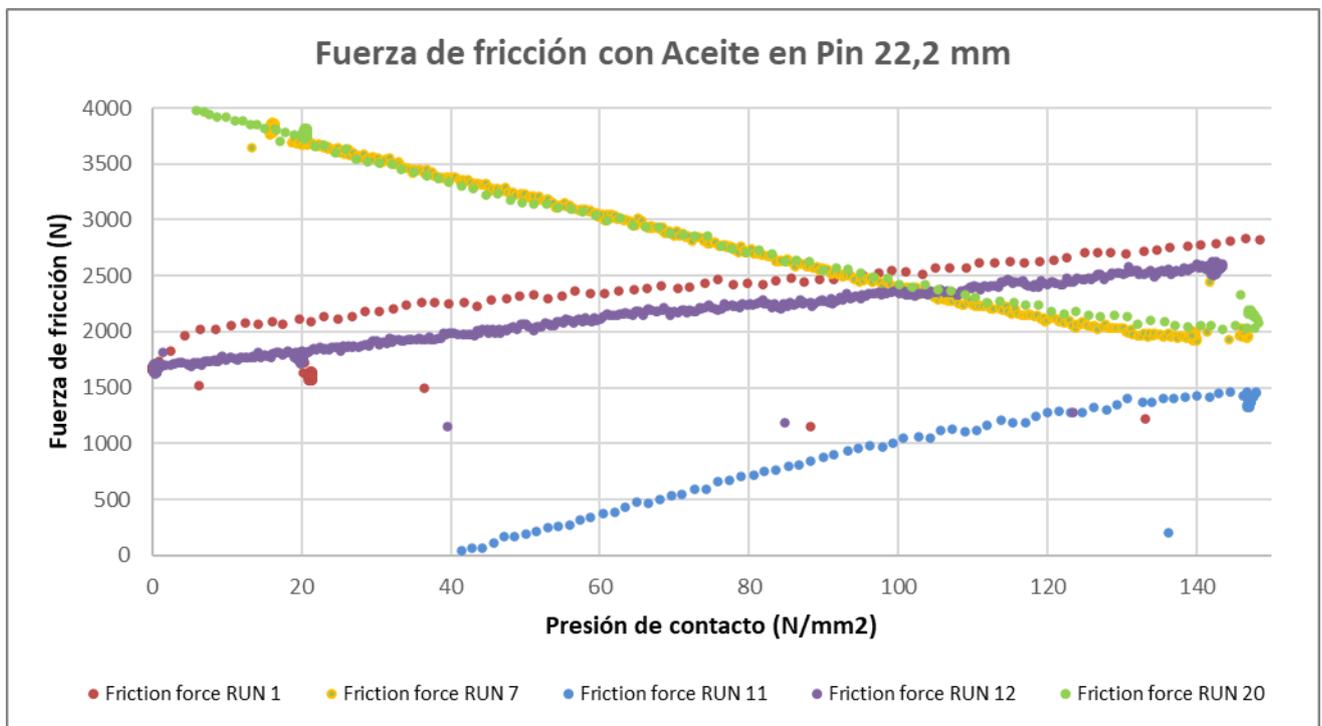


Figura 33. Fuerza de fricción en medio lubricado pin 15,9 mm

Para el caso del pin de 22,2 se puede observar que las probetas con menores coeficientes de rozamiento para un medio lubricado son aquellas que fueron sometidas a carga con ángulos de 60° (EXP 11) debido a que su coeficiente de rozamiento tiende a cero a medida que aumenta la presión de contacto. Además, estas mismas probetas presentan una fuerza de fricción menor a las demás por la misma razón. También se puede observar que la probeta con coeficientes de rozamiento mayores es la que fue sometida a un ángulo de inclinación de 45° (EXP 7 y EXP 20). En cuanto a la fuerza de fricción presente, el estudio muestra un comportamiento estable de 1700 a 2700 N para las probetas sometidas a un ángulo de contacto de 15° (EXP 1 y EXP 12). (Ver figuras 34 y 35)



*Figura 34. Coeficiente de rozamiento en medio lubricado pin 22,2 mm*



*Figura 35. Fuerza de fricción en medio lubricado pin 22,2 mm*

### IV.3.3 Coeficiente de fricción para ángulo de 60°

Una vez analizados los coeficientes de rozamiento obtenidos es importante revisar cuales son los escenarios en los que se presenta un mejor deslizamiento y también cual presenta el coeficiente de fricción más alto teniendo como base los ángulos de inclinación.

Para este análisis se utilizan las probetas mostradas a continuación:

EXP	FACTOR 1: ANGULO °	FACTOR 2: DIAMETRO PIN mm	FACTOR 3: VELOCIDAD mm/s	FACTOR 4: LUBRICANTE
2	60	15,9	5	SECO
8	60	15,9	1	SECO
4	60	15,9	1	ACEITE
11	60	22,2	5	ACEITE
15	60	22,2	1	SECO

Tabla 12. Probetas ángulo de 60° para estudio de coeficiente rozamiento

Debido a la similitud en los valores obtenidos para el ángulo de 60°, es necesario ajustar los ejes de la siguiente manera para poder apreciar de una mejor manera las curvas de cada escenario:

- Eje x: Se ajusta de 0 a 0.5 el coeficiente de fricción
- Eje y: Se ajusta de 5 a 40 N/mm<sup>2</sup>

En la siguiente grafica se puede apreciar que el escenario con el mayor deslizamiento y por ende el menor coeficiente de fricción se presenta en el EXP 11 y EXP 15, los cuales poseen un diámetro de pin de 22,2 mm de diámetro. Por otro lado, mayores coeficientes de fricción se pueden apreciar en el diámetro de 15,9 mm como por ejemplo en los EXP 2, 8 y 4.

En esta grafica también se puede apreciar como las curvas de coeficientes de rozamiento se ajustan a cero a partir de los 30 N/mm<sup>2</sup>. Lo cual sigue confirmando que necesitan menor presión de contacto para poder brindarnos un mejor comportamiento contra el deslizamiento.

El pin de 22,2 mm presenta coeficientes de fricción menores a diferencia del pin de 15,9 mm, esto es debido a que entre mayor es el área de contacto entre la curvatura del pin y la probeta, menor será la presión de contacto.

En cuanto a la velocidad del ensayo, se puede observar para este ángulo de 60° que velocidades de 1 mm/s permiten obtener coeficientes de rozamiento menores a comparación de la velocidad de 5 mm/s. Esto es debido a que la velocidad menor va a permitir que en la zona de contacto la interacción pin-probeta sea mas pausada sin oponerse tanto al rozamiento.

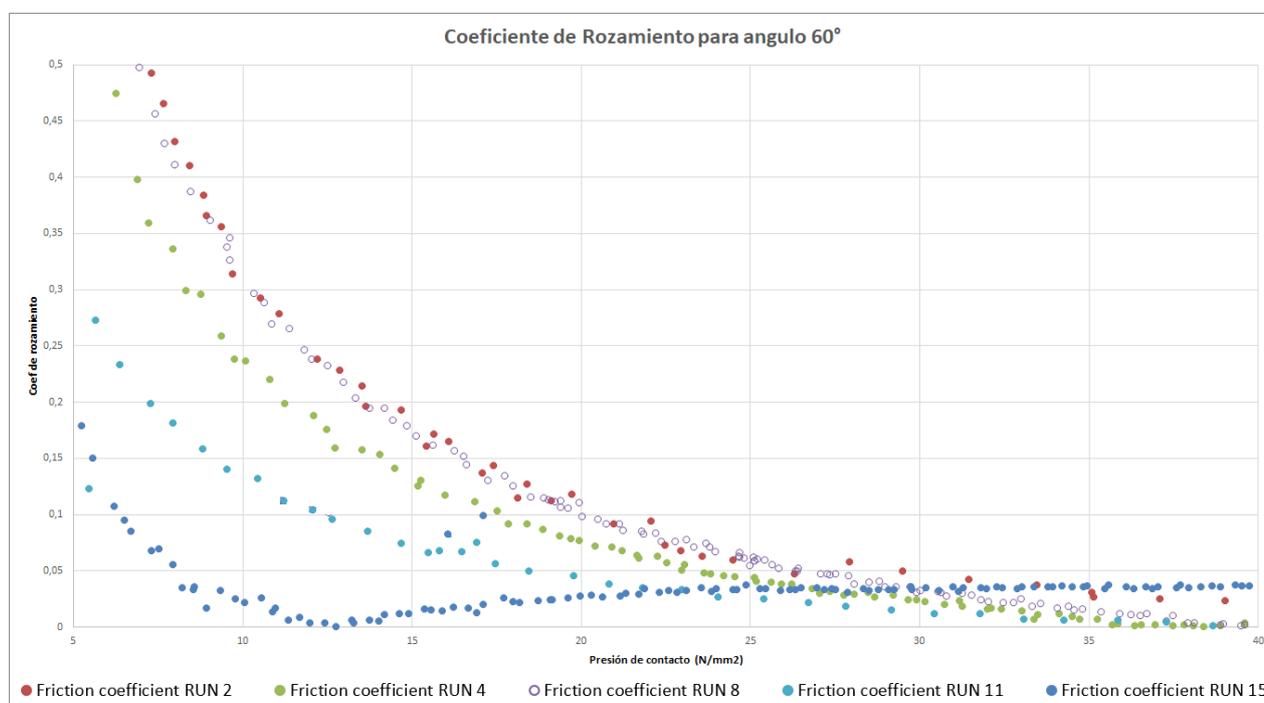


Figura 36. Coeficiente de rozamiento para ángulo 60°

#### IV.3.4 Coeficiente de fricción para ángulo de 15°

Previamente, para el ángulo de 15° se había determinado que era el ángulo de inclinación que presentaba una fuerza de fricción más constante a nivel de promedios. Su coeficiente de rozamiento permitía en algunos puntos un deslizamiento fácil y en otros puntos un deslizamiento más forzado.

Para este análisis se utilizan las probetas mostradas a continuación:

EXP	FACTOR 1: ANGULO °	FACTOR 2: DIAMETRO PIN mm	FACTOR 3: VELOCIDAD mm/s	FACTOR 4: LUBRICANTE
5	15	15,9	5	SECO
18	15	15,9	1	ACEITE
19	15	15,9	1	SECO
6	15	15,9	5	ACEITE
1	15	22,2	5	ACEITE
14	15	22,2	1	SECO
10	15	22,2	5	SECO
12	15	22,2	1	ACEITE

Tabla 13. Probetas ángulo de 15° para estudio de coeficiente rozamiento

Para poder apreciar de una mejor manera la gráfica de resultado, es necesario realizar ajustar los ejes de la siguiente manera para poder apreciar mejor las curvas de cada escenario:

- **Eje x:** Se ajusta de 0 a 0.5 el coeficiente de fricción
- **Eje y:** Se ajusta de 10 a 130 N/mm<sup>2</sup>

En la siguiente grafica se puede apreciar que el escenario con el mayor deslizamiento y por ende el menor coeficiente de fricción se presenta en el EXP 1, 14, 10 y 12, los cuales poseen un diámetro de pin de 22,2 mm de diámetro. Por otro lado, mayores coeficientes de fricción se pueden apreciar en el diámetro de 15,9 mm como por ejemplo en los EXP 5, 18, 19 y 6.

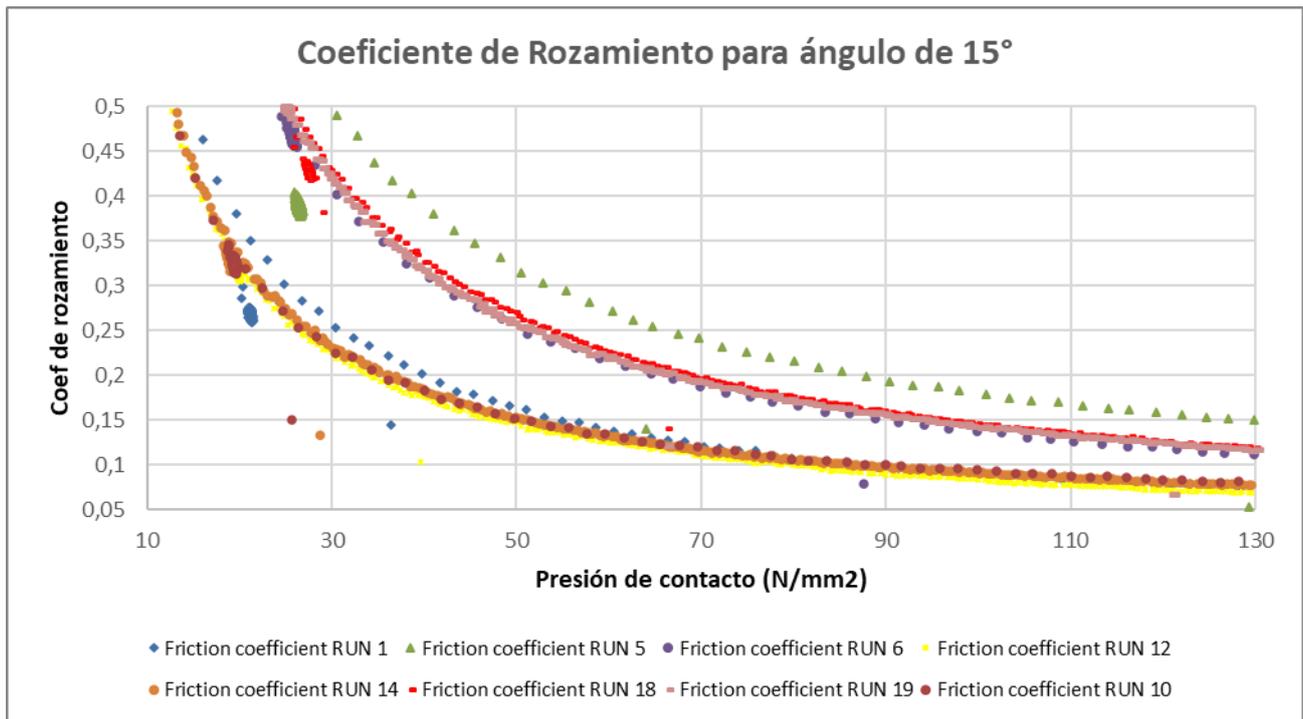


Figura 37. Coeficiente de rozamiento para ángulo 15°

### IV.3.5 Coeficiente de fricción para ángulo de 45°

Previamente, para el ángulo de 45° se había determinado que era el ángulo de inclinación que presentaba un mayor coeficiente de rozamiento y por ende presentaba una mayor resistencia a ser deslizado con otra superficie.

Para este análisis se utilizan las probetas mostradas a continuación:

EXP	FACTOR 1: ANGULO °	FACTOR 2: DIAMETRO PIN mm	FACTOR 3: VELOCIDAD mm/s	FACTOR 4: LUBRICANTE
13	45	15,9	5	ACEITE
3	45	22,2	1	ACEITE
9	45	15,9	1	ACEITE
20	45	22,2	5	ACEITE
17	45	15,9	5	SECO
7	45	22,2	1	SECO
16	45	22,2	5	SECO

Tabla 14. Probetas ángulo de 45° para estudio de coeficiente rozamiento

Se realiza el mismo ajuste de los ejes x e y para poder apreciar mejor las curvas de rozamiento para cada escenario:

- Eje x: Se ajusta de 0 a 0.75 el coeficiente de fricción
- Eje y: Se ajusta de 20 a 155 N/mm<sup>2</sup>

En la siguiente grafica se puede apreciar que el escenario con el mayor coeficiente de rozamiento se presenta en el EXP 13, 9 y 9. Por otro lado, menores coeficientes de fricción se pueden apreciar en los EXP 20, 17, 7 y 6.

En esta grafica también se puede apreciar como las curvas de coeficientes de rozamiento se van aproximando a cero a partir de los 155 N/mm<sup>2</sup>, lo cual sigue confirmándonos que necesitan mayor presión de contacto para poder brindarnos un mayor deslizamiento.

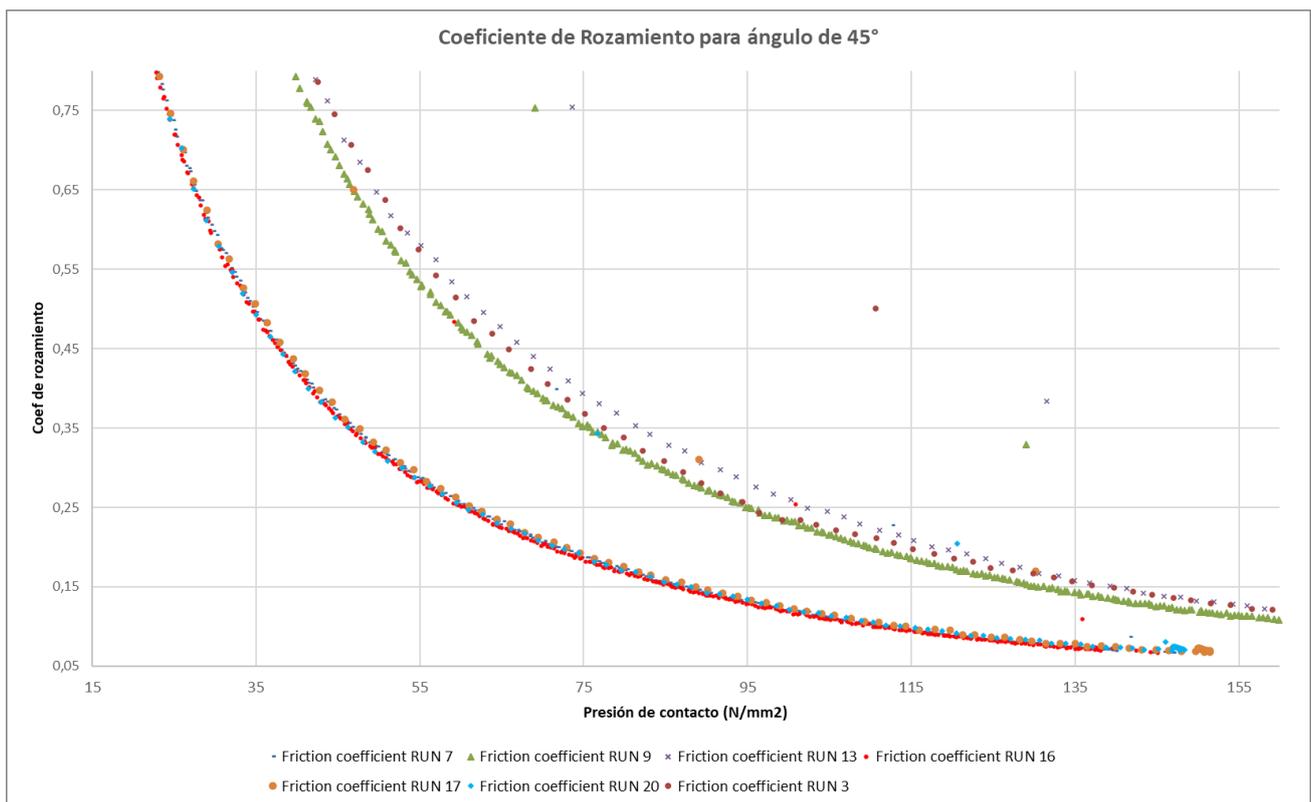


Figura 38. Coeficiente de rozamiento para ángulo 45°

## IV.4. Resultados análisis de varianza

Para tener una relación más precisa al momento de comparar las variables de entrada con las de salida es necesario realizar un ANOVA.

Las variables de **entrada** son las mencionadas en el diseño de experimentos, sin embargo, se vuelven a enumerar:

1. ANGULO (°)
2. DIAMETRO PIN (mm)
3. VELOCIDAD CILINDRO 2 (mm/s)
4. LUBRICANTE

Las variables de **salida** que se desean analizar son las siguientes:

1. FUERZA MAX CILINDRO 1 (kN): Fuerza máxima captada por el sensor del cilindro 1.
2. FUERZA MAX CILINDRO 2 (kN): Fuerza máxima captada por el sensor del cilindro 2.
3. DESPLAZAMIENTO MAX CILINDRO 2 (mm): Desplazamiento máximo del cilindro móvil ya que el cilindro 2 el desplazamiento es cero.
4. DIFERENCIA MAX ENTRE FUERZA CIL 1 Y CIL 2 (kN): Diferencia máxima entre el cilindro 1 y el cilindro 2 en cada instante de tiempo.
5. EXTERIOR LONG Ra (micras): Promedio de rugosidad obtenida en la parte exterior del punto de contacto con el pin en la dirección longitudinal.
6. EXTERIOR TRANSV Ra (micras): Promedio de rugosidad obtenida en la parte exterior del punto de contacto con el pin en la dirección transversal.
7. INTERIOR TRANSV Ra (micras): Promedio de rugosidad obtenida en la parte interior del punto de contacto con el pin en la dirección transversal.
8. INTERIOR LONG Ra (micras): Promedio de rugosidad obtenida en la parte interior del punto de contacto con el pin en la dirección longitudinal.
9. PROMEDIO PRESIÓN DE CONTACTO (MPa): Promedio de las presiones de contacto obtenidas entre el punto de contacto de la probeta con el pin en los diferentes instantes de tiempo.
10. PROMEDIO COEF ROZAMIENTO: Promedio de los coeficientes de rozamiento obtenidos en los diferentes instantes de tiempo.
11. FUERZA DE FRICCIÓN (N): Promedio de las fuerzas de fricción obtenidas en el punto de contacto.

#### IV.4.1 ANOVA variable salida 1 - Fuerza máxima cilindro 1 (kN)

##### Análisis de Varianza para V1 - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Ángulo (°)	21,1651	2	10,5825	49,81	0,0000
B: Diámetro pin (mm)	6,85913	1	6,85913	32,29	0,0001
C: Velocidad cilindro 2 (mm/s)	3,65545	1	3,65545	17,21	0,0011
INTERACCIONES					
AB	4,01298	2	2,00649	9,44	0,0029
RESIDUOS	2,76184	13	0,212449		
TOTAL (CORREGIDO)	42,0452	19			

Tabla 15. Análisis de varianza para V1

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

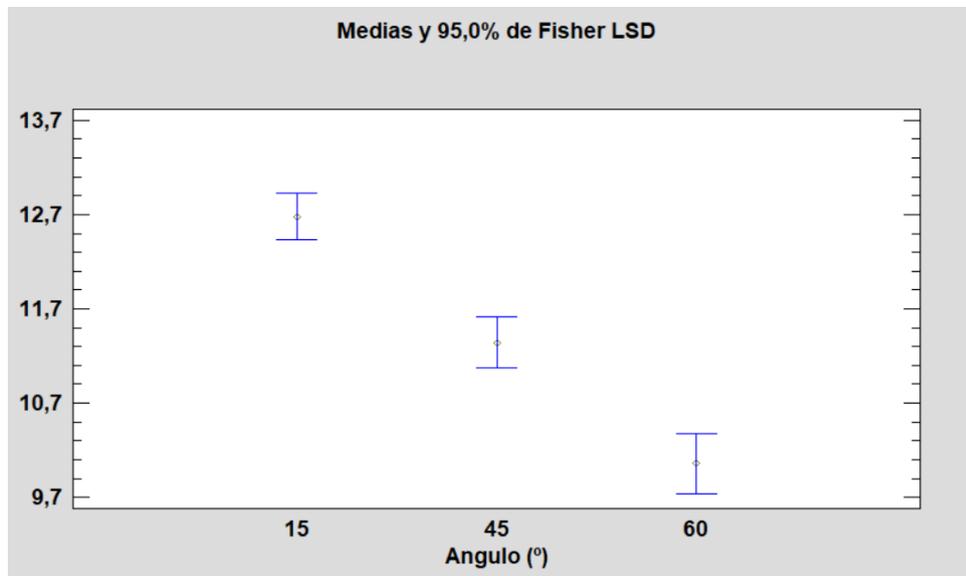


Figura 39. Medias ángulo vs fuerza máxima cilindro 1

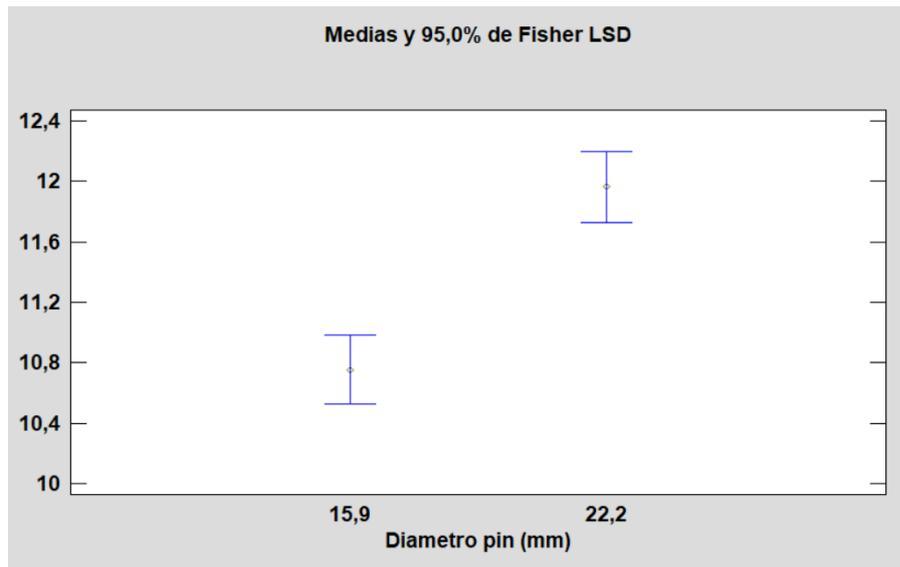


Figura 40. Medias diámetro vs fuerza máxima cilindro 1

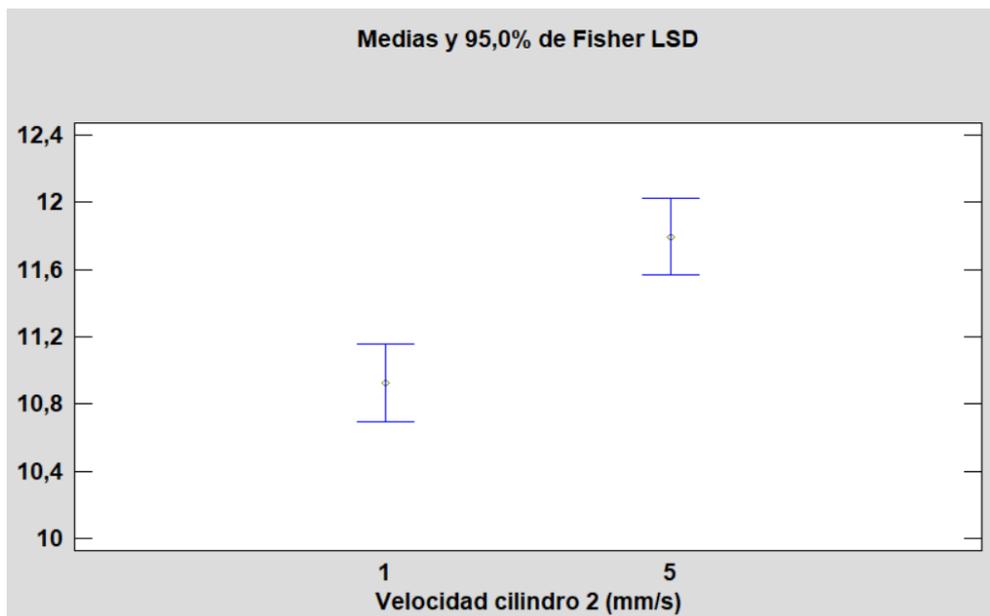


Figura 41. Medias velocidad cilindro 2 vs fuerza máxima cilindro 1

- Las variables de entrada ángulo, diámetro pin y velocidad de cilindro 2 son significativas al momento de relacionarse con la fuerza máxima cilindro 1.
- Se presentan fuerzas máximas de cilindro 1 mayores en el ángulo de 15 grados seguido por el de 45 y 60 respectivamente.
- Para el diámetro de pin de 22,2 mm se presentan valores de fuerza máxima cilindro 1 mayores.
- Para la velocidad del cilindro 2 de 5mm/s se presentan valores mayores de fuerza máxima cilindro 1.

#### IV.4.2 ANOVA variable salida 2 – Fuerza máxima cilindro 2 (kN)

##### Análisis de Varianza para V2 - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Ángulo (°)	4,27051	2	2,13525	21,17	0,0001
B: Diámetro pin (mm)	2,60961	1	2,60961	25,88	0,0003
C: Velocidad cilindro 2 (mm/s)	4,3008	1	4,3008	42,64	0,0000
INTERACCIONES					
AB	4,00167	2	2,00083	19,84	0,0002
RESIDUOS	1,21025	12	0,100854		
TOTAL (CORREGIDO)	15,0757	18			

Tabla 16. Análisis de varianza para V2

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

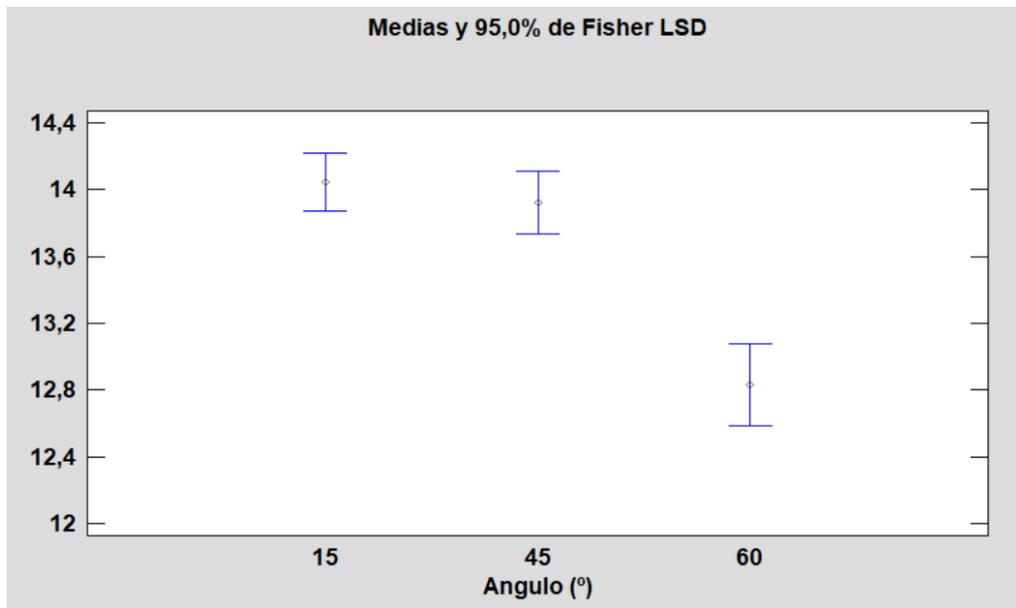


Figura 42. Medias ángulo vs fuerza máxima cilindro 2

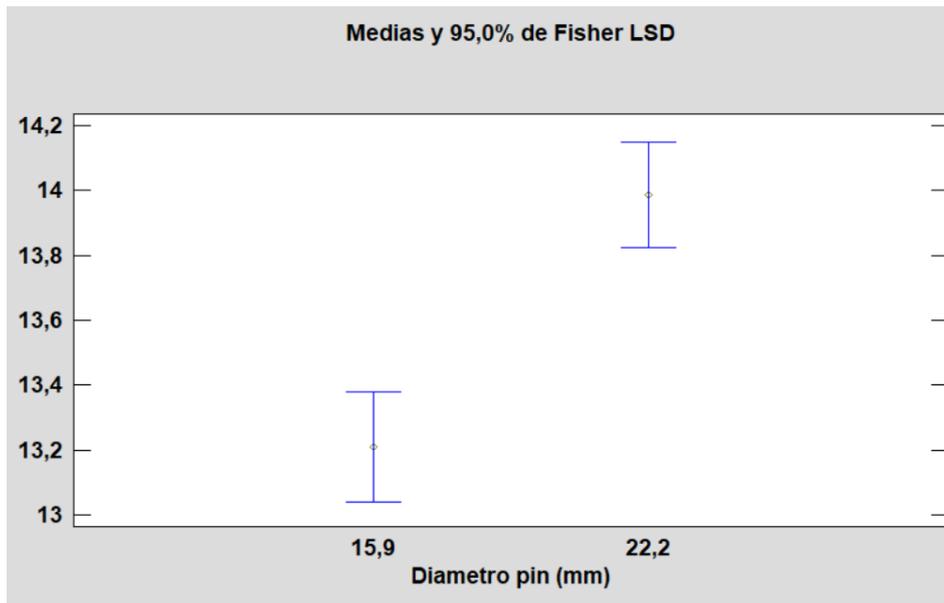


Figura 43. Medias diámetro pin vs fuerza máxima cilindro 2

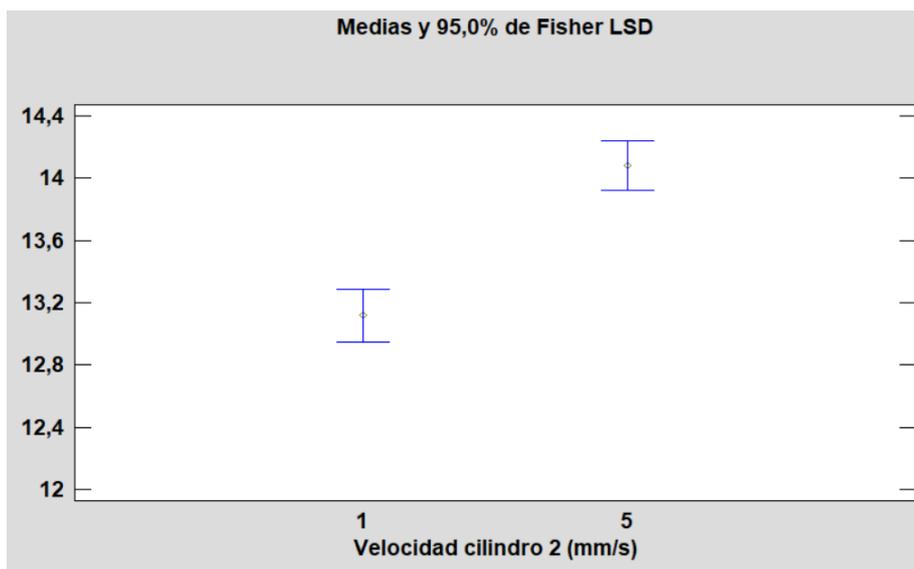


Figura 44. Medias velocidad cilindro 2 vs fuerza máxima cilindro 2

- Las variables de entrada ángulo, diámetro pin y velocidad de cilindro 2 son significativas al momento de relacionarse con la fuerza máxima cilindro 2.
- Se presentan fuerzas máximas de cilindro 2 mayores en el ángulo de 15 y 45 grados seguido por el de 60.
- Para el diámetro de pin de 22,2 mm se presentan valores de fuerza máxima cilindro 2 mayores.
- Para la velocidad del cilindro 2 de 5mm/s se presentan valores mayores de fuerza máxima cilindro 2.

#### IV.4.3 ANOVA variable salida 3 - Desplazamiento máximo cilindro 2 (mm)

**Análisis de Varianza para V3 - Suma de Cuadrados Tipo III**

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Ángulo (°)	10,8537	2	5,42683	11,96	0,0007
B: Velocidad cilindro 2 (mm/s)	2,4522	1	2,4522	5,40	0,0336
INTERACCIONES					
RESIDUOS	7,25934	16	0,453709		
TOTAL (CORREGIDO)	20,8658	19			

Tabla 17. Análisis de varianza para V3

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

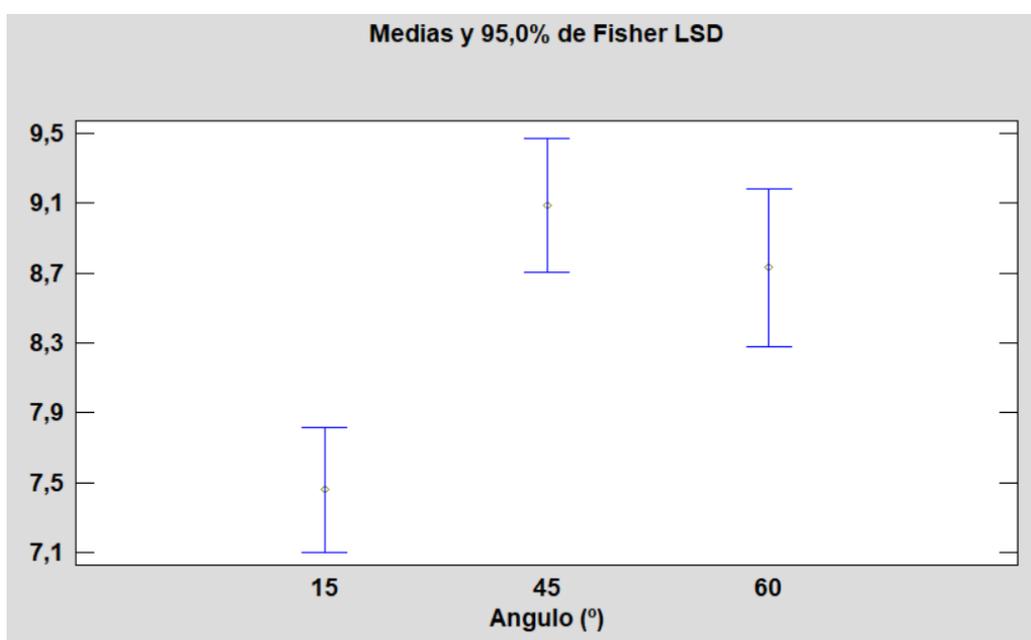


Figura 45. Medias ángulo vs desplazamiento máximo cilindro 2

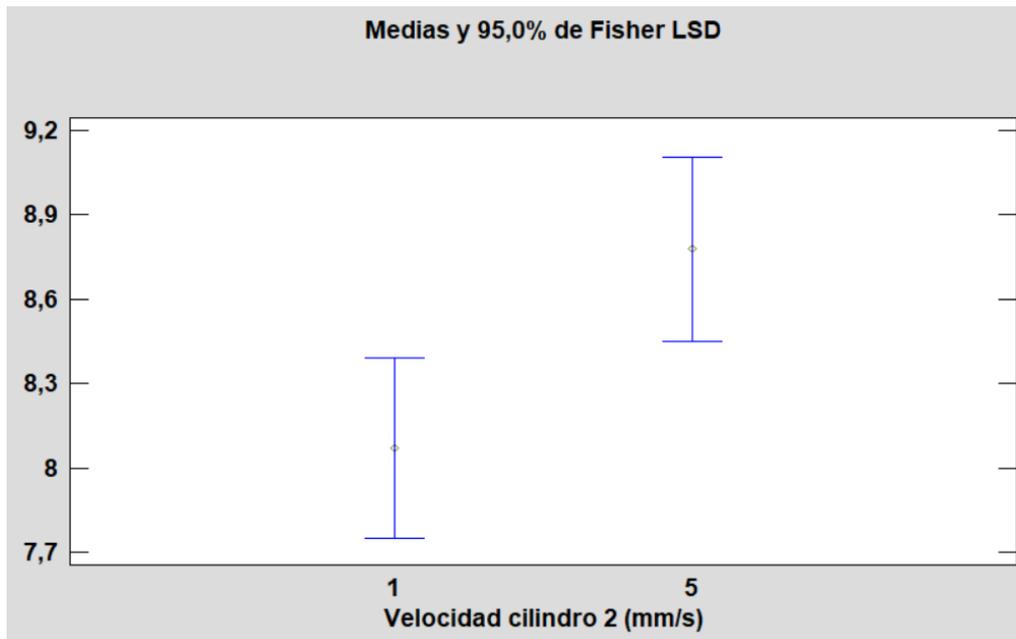


Figura 46. Medias velocidad cilindro 2 vs desplazamiento máximo cilindro 2

- Las variables de entrada ángulo y velocidad de cilindro 2 son significativas al momento de relacionarse con el desplazamiento máximo cilindro 2.
- Se presentan desplazamientos máximos en el cilindro 2 mayores en los ángulos de 45 y 60 grados debido a la deformación plástica a la que es sometida la probeta.
- Se presentan desplazamientos máximos en el cilindro 2 mayores en las velocidades de cilindro 2 de 5 mm/s.

#### IV.4.4 ANOVA variable salida 4 - Diferencia máxima fuerza cil 1 y cil 2 (kN)

##### Análisis de Varianza para V4 - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Ángulo (°)	10,6875	2	5,34377	32,79	0,0000
B: Diámetro pin (mm)	2,04078	1	2,04078	12,52	0,0027
INTERACCIONES					
RESIDUOS	2,60727	16	0,162954		
TOTAL (CORREGIDO)	15,6961	19			

Tabla 18. Análisis de varianza para V4

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

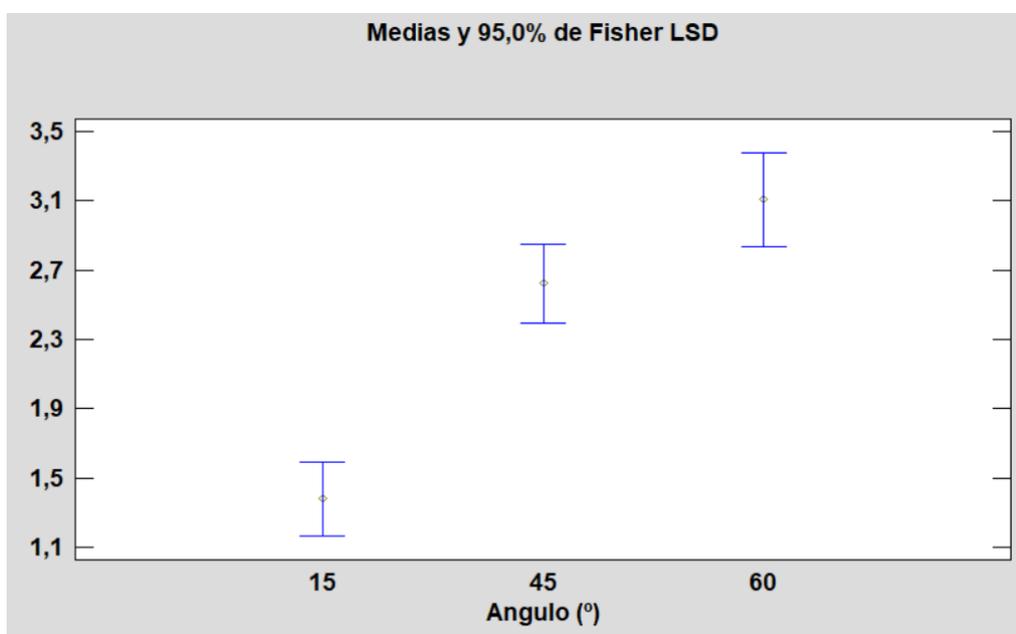


Figura 47. Medias ángulo vs diferencia máxima fuerza cil 1 y cil 2

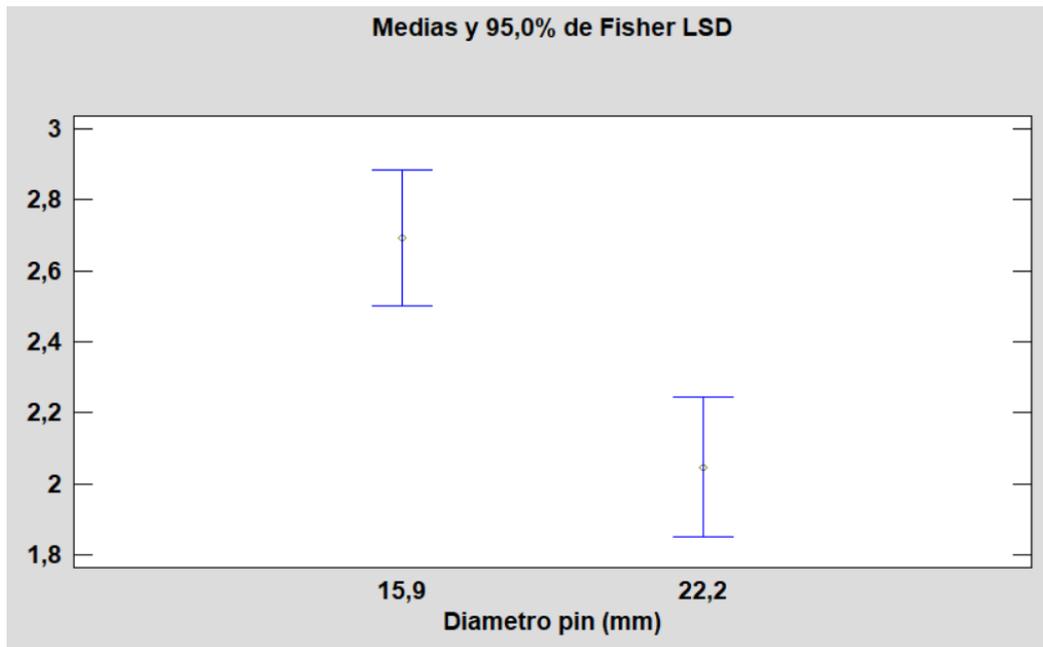


Figura 48. Medias diámetro pin vs diferencia máxima fuerza cil 1 y cil 2

- Las variables de entrada ángulo y diámetro pin son significativas al momento de relacionarse con la diferencia máxima fuerza cil 1 y cil 2.
- Se presenta una diferencia máxima entre fuerzas de cilindros mayores en el ángulo de 60 grados
- Se presenta una diferencia máxima entre fuerzas de cilindros mayores en el diámetro de pin de 15,9 mm.

#### IV.4.5 ANOVA variable salida 5 – Exterior long Ra (micras)

##### Análisis de Varianza para V5 - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Ángulo (°)	0,316444	2	0,158222	4,01	0,0389
B: Diámetro pin (mm)	0,201864	1	0,201864	5,11	0,0381
INTERACCIONES					
RESIDUOS	0,631966	16	0,0394979		
TOTAL (CORREGIDO)	1,18386	19			

Tabla 19. Análisis de varianza para V5

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

- No existe relación alguna entre las variables de entrada y la rugosidad exterior longitudinal

#### IV.4.6 ANOVA variable salida 6 – Exterior transv Ra (micras)

##### Análisis de Varianza para V6 - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Lubricante	0,0146007	1	0,0146007	0,32	0,5944
B: Velocidad cilindro 2 (mm/s)	0,110556	1	0,110556	2,45	0,1787
C: Diámetro pin (mm)	0,0180007	1	0,0180007	0,40	0,5558
D: Ángulo (°)	0,0488316	2	0,0244158	0,54	0,6133
INTERACCIONES					
AB	0,0203062	1	0,0203062	0,45	0,5325
AC	0,273006	1	0,273006	6,04	0,0574
AD	0,0118371	2	0,00591856	0,13	0,8802
BC	0,00600625	1	0,00600625	0,13	0,7304
BD	0,263458	2	0,131729	2,91	0,1449
CD	0,229321	2	0,114661	2,54	0,1737
RESIDUOS	0,226081	5	0,0452163		
TOTAL (CORREGIDO)	1,36622	19			

Tabla 20. Análisis de varianza para V6

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

- No existe relación alguna entre las variables de entrada y la rugosidad exterior transversal

#### IV.4.7 ANOVA variable salida 7 – Interior transv Ra (micras)

##### Análisis de Varianza para V7 - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Ángulo (°)	0,104149	2	0,0520743	3,34	0,0650
B: Velocidad cilindro 2 (mm/s)	0,0509511	1	0,0509511	3,27	0,0920
INTERACCIONES					
AB	0,134328	2	0,0671639	4,31	0,0347
RESIDUOS	0,218058	14	0,0155756		
TOTAL (CORREGIDO)	0,48618	19			

Tabla 21. Análisis de varianza para V7

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

- No existe relación alguna entre las variables de entrada y la rugosidad interior transversal

#### IV.4.8 ANOVA variable salida 8 – Interior long Ra (micras)

##### Análisis de Varianza para V8 - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Ángulo (°)	0,0191515	2	0,00957577	0,09	0,9180
B: Diámetro pin (mm)	0,003025	1	0,003025	0,03	0,8748
C: Velocidad cilindro 2 (mm/s)	0,0009	1	0,0009	0,01	0,9314
D: Lubricante	0,00000277778	1	0,00000277778	0,00	0,9962
INTERACCIONES					
AB	0,0094697	2	0,00473485	0,04	0,9582
AC	0,176785	2	0,0883925	0,80	0,4981
AD	0,00784545	2	0,00392273	0,04	0,9652
BC	0,004225	1	0,004225	0,04	0,8523
BD	0,0144	1	0,0144	0,13	0,7322
CD	0,093025	1	0,093025	0,85	0,3999
RESIDUOS	0,54985	5	0,10997		
TOTAL (CORREGIDO)	0,872775	19			

Tabla 22. Análisis de varianza para V8

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

- No existe relación alguna entre las variables de entrada y la rugosidad interior longitudinal

#### IV.4.9 ANOVA variable salida 9 - Promedio presión de contacto (MPa)

##### Análisis de Varianza para V9 - Suma de Cuadrados Tipo III

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Ángulo (°)	11666,0	2	5832,99	18,99	0,0001
B: Diámetro pin (mm)	1402,48	1	1402,48	4,57	0,0495
INTERACCIONES					
RESIDUOS	4607,16	15	307,144		
TOTAL (CORREGIDO)	17415,3	18			

Tabla 23. Análisis de varianza para V9

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

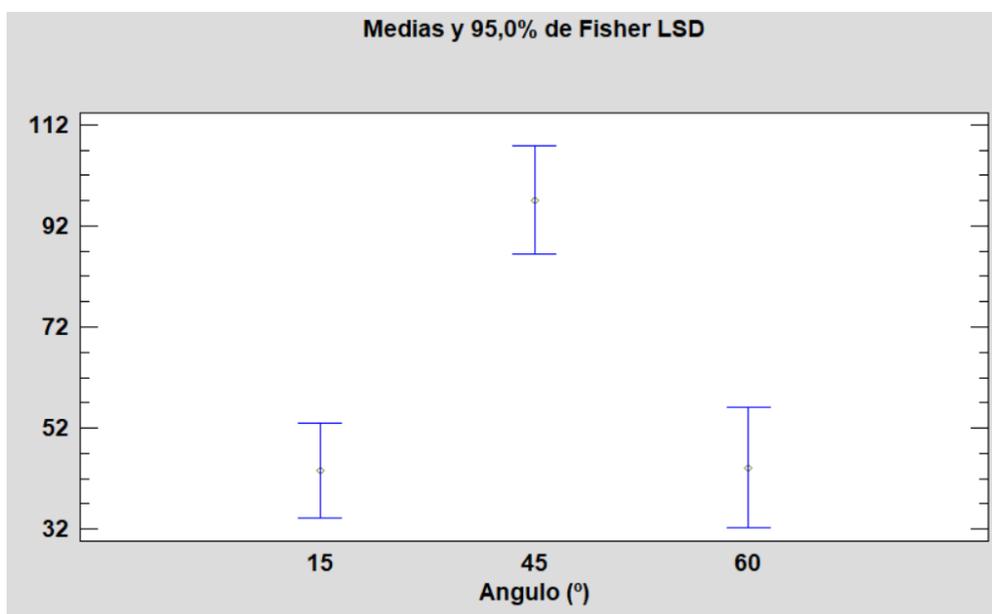


Figura 49. Medias ángulo vs promedio presión de contacto

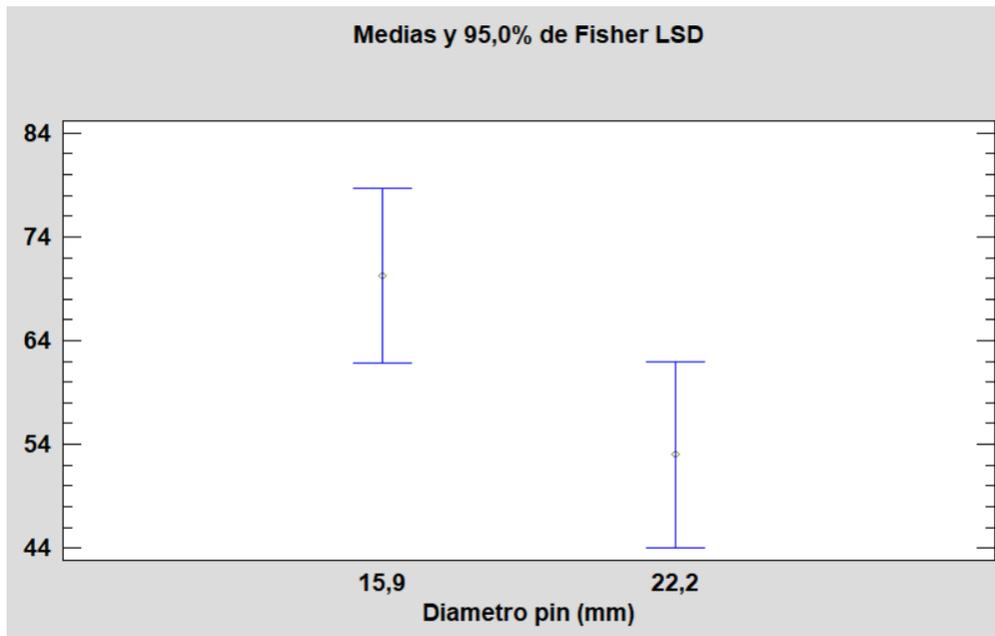


Figura 50. Medias diámetro pin vs promedio presión de contacto

- Las variables de entrada ángulo y diámetro pin son significativas al momento de relacionarse con el promedio de presión de contacto.
- Se presenta una presión de contacto mayor en el ángulo de 45°.
- Se presenta una presión de contacto mayor en el diámetro de 15,9 mm.

#### IV.4.10 ANOVA variable salida 10 - Promedio coef rozamiento

**Análisis de Varianza para V10 - Suma de Cuadrados Tipo III**

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Ángulo (°)	0,239346	2	0,119673	10,20	0,0014
RESIDUOS	0,187717	16	0,0117323		
TOTAL (CORREGIDO)	0,427063	18			

Tabla 24. Análisis de varianza para V10

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

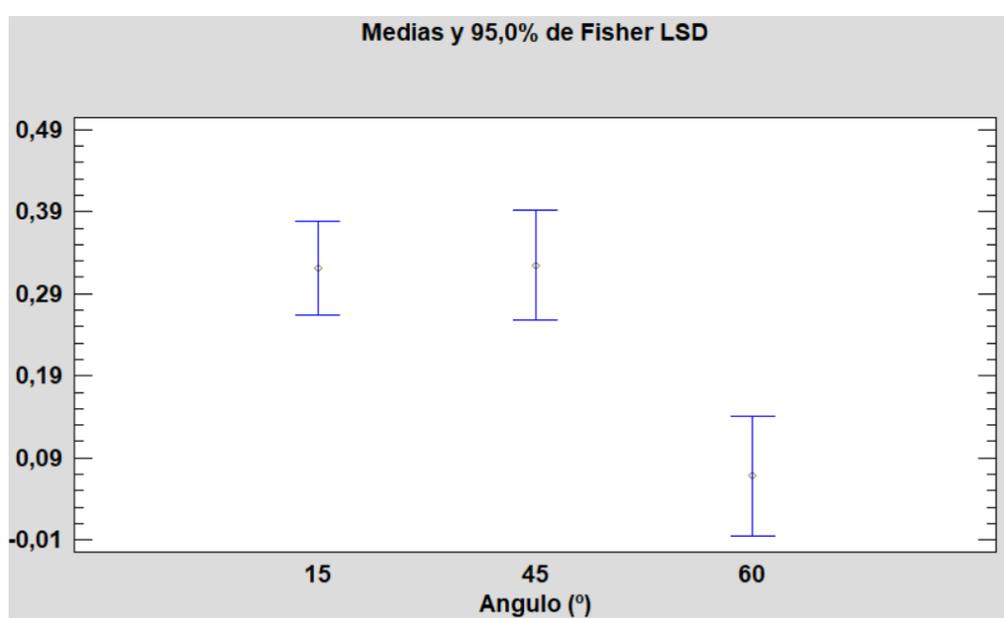


Figura 51. Medias ángulo vs promedio coeficiente de rozamiento

- La variable de entrada ángulo es significativa al momento de relacionarse con el promedio del coeficiente de rozamiento
- Se presenta un promedio de coeficiente de fricción mayor en los ángulos de 15 y 45°.

#### IV.4.11 ANOVA variable salida 11 - Fuerza de fricción (N)

**Análisis de Varianza para V11 - Suma de Cuadrados Tipo III**

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A: Ángulo (°)	2,81651E7	2	1,40825E7	202,63	0,0000
B: Diámetro pin (mm)	1,03796E6	1	1,03796E6	14,94	0,0015
INTERACCIONES					
RESIDUOS	1,04247E6	15	69498,1		
TOTAL (CORREGIDO)	2,92077E7	18			

Tabla 25. Análisis de varianza para V11

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

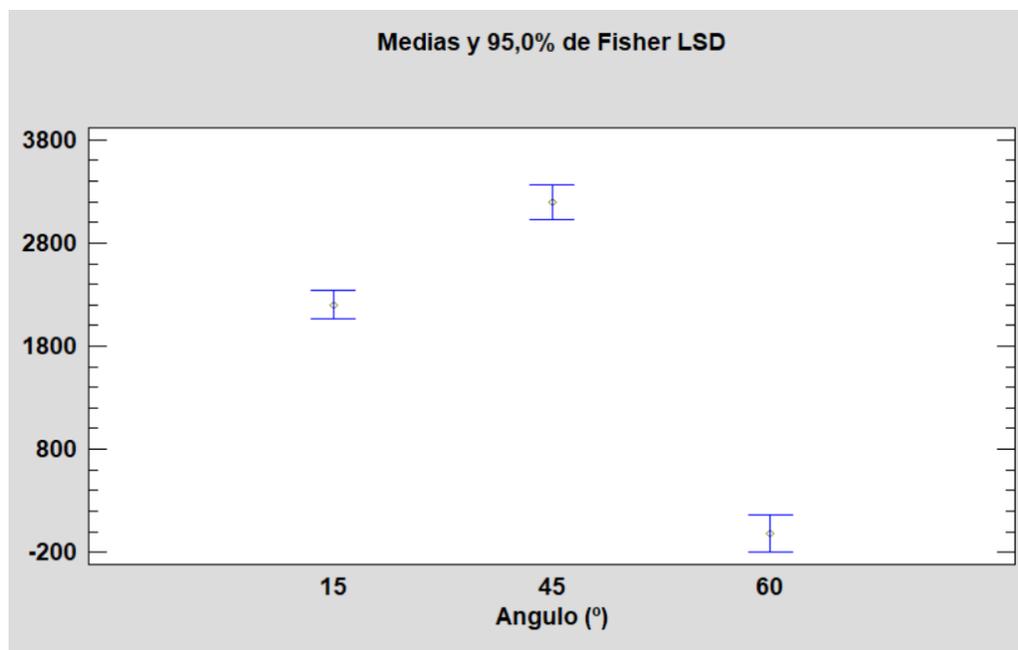


Figura 52. Medias ángulo vs fuerza de fricción

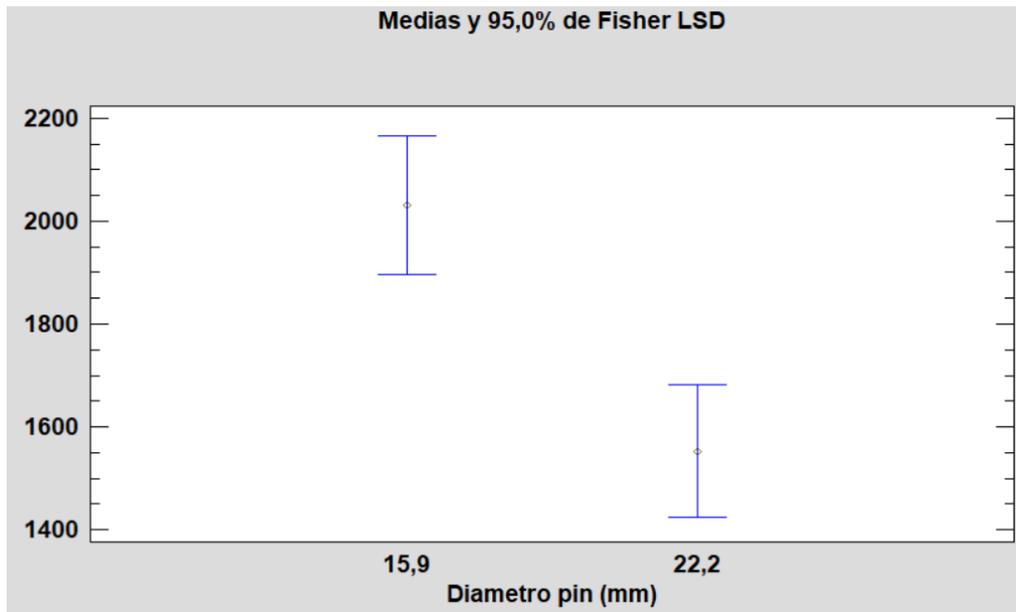


Figura 53. Medias diámetro pin vs fuerza fricción

- Las variables de entrada ángulo y diámetro pin son significativas al momento de relacionarse con la fuerza de fricción.
- Se presenta una fuerza de fricción mayor en el ángulo de 45°.
- Se presenta una fuerza de fricción mayor en el diámetro de pin 15,9 mm.

## V. CONCLUSIONES

# CONCLUSIONES

## V. Conclusiones y líneas futuras

---

# V.1. Conclusiones

Luego de analizar los resultados obtenidos, se pueden determinar las siguientes conclusiones que nos permiten resumir todos los ensayos realizados.

### V.1.1 Conclusiones ensayo de tensión

- La aleación de titanio SP-700 es un material de excelentes prestaciones mecánicas debido a su alto límite elástico de 994,95 MPa y su resistencia a la tracción de 1009,3 MPa.
- El módulo de elasticidad de este material es de 7707,8 MPa y se necesitaron 20187 kN de fuerza para lograr su rotura.
- Estos datos fueron fundamentales para poder trabajar en el análisis del coeficiente de fricción ya que las fórmulas usadas en los apartados anteriores necesitan de esta información.

### V.1.2 Conclusiones medida de rugosidad

- La medida inicial de la rugosidad antes de la deformación para las 20 probetas es la misma
- La rugosidad aumenta luego de someter cada probeta a una carga externa que provoca deformación del material
- la medida de rugosidad transversal tanto para el interior como el exterior, en la mayoría de casos es superior a la medida en la dirección longitudinal, esto es debido a que las marcas del material luego de su proceso de laminación permiten que quede con cierto acabado que, al momento de someterlo a una carga para deformarlo, estas líneas se prolonguen en la misma dirección y permita obtener estos resultados.
- para las 20 probetas se podía apreciar que las marcas formadas por la laminación se encontraban situadas longitudinalmente en la probeta
- Para el caso de los pines usados para el ensayo en el SFBT se puede apreciar que las medidas de rugosidad aumentan tanto longitudinal como transversalmente al momento de ser sometido a una carga de presión.

### V.1.3 Conclusiones medición de coeficientes de rozamiento

- Tanto para el medio seco como para el medio lubricado, las probetas que presentan un menor coeficiente de rozamiento son las ensayadas con ángulo de inclinación de 60°, seguidas por las ensayadas a 15° y finalmente se presenta un coeficiente de fricción más alto en las ensayadas a 45°
- La fuerza de fricción en las probetas sometidas a deformación con Angulo de 60° es menor que para los ángulos de 15 y 45°.
- En las probetas ensayadas a 15° se pueden observar valores de fuerza de fricción en rangos entre los 2000 y 4000 N.

## V. Conclusiones y líneas futuras

---

- Para las curvas de coeficientes de rozamiento de ensayos a 60° se puede apreciar que el escenario con el mayor deslizamiento y por ende el menor coeficiente de fricción se presenta en el EXP 11 y EXP 15, los cuales poseen un diámetro de pin de 22,2 mm de diámetro. Por otro lado, mayores coeficientes de fricción se pueden apreciar en el diámetro de 15,9 mm como por ejemplo en los EXP 2, 8 y 4. Además, se pueden apreciar también que los coeficientes de rozamiento se ajustan a cero a partir de los 30 N/mm<sup>2</sup>.
- El pin de 22,2 mm presenta coeficientes de fricción menores a diferencia del pin de 15,9 mm, esto es debido a que entre mayor es el área de contacto entre la curvatura del pin y la probeta, menor será la presión de contacto.
- En cuanto a la velocidad del ensayo, se puede observar para el ángulo de 60° que velocidades de 1 mm/s permiten obtener coeficientes de rozamiento menores a comparación de la velocidad de 5 mm/s. Esto es debido a que la velocidad menor va a permitir que en la zona de contacto la interacción pin-probeta sea más pausada sin oponerse tanto al rozamiento.
- Para las curvas de coeficientes de rozamiento de ensayos a 15° se puede apreciar que el escenario con el mayor deslizamiento y por ende el menor coeficiente de fricción se presenta en el EXP 1, 14, 10 y 12, los cuales poseen un diámetro de pin de 22,2 mm de diámetro. Por otro lado, mayores coeficientes de fricción se pueden apreciar en el diámetro de 15,9 mm como por ejemplo en los EXP 5, 18, 19 y 6.
- Para las curvas con mayor coeficiente de rozamiento a los 45° se puede apreciar que el escenario con el mayor coeficiente de rozamiento se presenta en el EXP 13, 9 y 9. Por otro lado, menores coeficientes de fricción se pueden apreciar en los EXP 20, 17, 7 y 6.
- Se puede apreciar como las curvas de coeficientes de rozamiento se van aproximando a cero a partir de los 155 N/mm<sup>2</sup>, lo cual sigue confirmándonos que necesitan mayor presión de contacto para poder brindarnos un mayor deslizamiento a 45°.

### V.1.3 Conclusiones análisis de varianza

- Para esta investigación la variable de entrada denominada “lubricante” no tiene ninguna relación con las variables de salida, lo cual quiere decir que es insignificante la aplicación o no de este aceite para fuerzas alrededor de los 10 kN.
- La variable de entrada que más tiene relación con las variables de respuesta es la denominada “ángulo” ya que la posición de cada probeta afecta en cierta medida cada una de las variables estudiadas, especialmente la presión de contacto, coeficiente de rozamiento y fuerza de fricción.
- La rugosidad medida en la parte exterior e interior del punto de contacto antes y después de cada experimento no es significativa para nuestro estudio y más aún cuando el desgaste en los pines es mínimo ya que estaban recién mecanizados.
- Se presenta una fuerza de fricción mayor en el ángulo de 45°. Esto es debido a que la superficie de la probeta se reparte equitativamente en cada extremo del contacto con el pin.

## V. Conclusiones y líneas futuras

---

- Se presenta una fuerza de fricción mayor en el diámetro de pin 15,9 mm. Esto es debido a que al ser menor el punto de contacto la probeta presenta una fuerza de fricción mayor para oponerse a su deslizamiento.
- Se presenta un promedio de coeficiente de fricción menor en el ángulo de 60°.

## V.2. Líneas futuras

Al finalizar este trabajo de investigación, es importante mencionar que a partir de los resultados y conclusiones obtenidas se pueden desarrollar nuevos estudios para este material. A continuación, se presentan varias propuestas para poder continuar obteniendo información para el análisis:

- Mediante los datos de la cámara usada en el SFBT, se pueden obtener distancias, velocidades y aceleraciones entre puntos que para este trabajo no fue posible incluirlo, debido a que nos podíamos desviar un poco de nuestro objetivo de investigación el cual era el estudio de la tribología del SP-700.
- Se pueden realizar ensayos utilizando varios lubricantes y caracterizar los coeficientes de rozamiento para cada tipo de lubricante utilizado a cargas mayores a los 10 kN.
- Para poder obtener mas información se pueden implementar varios ángulos de inclinación diferentes a los usados en nuestro estudio (30, 90, 180°).
- Se pueden implementar otros diámetros de pin para comparar la incidencia del punto de contacto con la presión de contacto.
- En cuanto a la medida de rugosidad se podrían realizar estudios mas enfocados a obtener resultados esperados ya que en nuestro estudio no logramos que la variable rugosidad fuera tan influyente para cada uno de los 20 escenarios planteados.
- Se puede caracterizar con otras pruebas este material, impacto, dureza, metalografía lo cual no se pudo realizar en este caso debido a que no teníamos suficientes probetas para analizar.

**REFERENCIAS**

REFERENCIAS

# BIBLIOGRAFÍA

- Corzo, M., Casals, O., Alcalá, J., Mateo, A., & Anglada, M. (2014). Evaluación mecánica mediante técnicas de indentación de soldaduras por fricción lineal en aleaciones de titanio. Barcelona, Catalunya, España: Universidad politecnica de catalunya.
- García, J., Guette, A., Medrano, A., Labrugere, C., Rico, M., Lahaye, M., . . . Rodriguez, R. (2000). Modificación del comportamiento tribológico de zirconio y titanio mediante implantación de nitrógeno. España: Boletín de la sociedad española de ceramica y vidrio.
- Guan, X., Numakura, H., Koiwa, M., Hasegawa, M., & Ouchi, C. (1999). Low-frequency internal friction of alpha + betta titanium alloy SP-700. Japan: Materials science and engineering, Elsevier Science.
- Holguín, G., Cano, M., Ruden, A., Gonzales, J., Jurado, P., & Sequeda, F. (2013). Estudio de las propiedades mecánicas, tribologicas y superficiales de recubrimientos duros basados en titanio. Pereira, Colombia: Revista LatinAM. Metal. Mat.
- Hossein, A., Morakkabati, M., & Mahdi, S. (12 de July de 2019). Constitutive modeling for hot working behavior of SP-700 Titanium Alloy. Journal of materials engineering and performance.
- Ishikawa, M., Kuboyama, O., Niikura, M., & Ouchi, C. (1993). Advanced Technology Research Center NKK Corporation. *Microstructure and Mechanical Properties Relationship of Ti SP-700*. Japón: F.H. Froes an I. Caplan.
- JFE Steel. (Mar de 2005). JFE Technical Report No. 5. *Advantages of High-Formability SP-700 Titanium Alloy and Its Applications*.
- JFE Steel. (Junio de 2008). JFE Technical Report No. 11. *A Highly Rigid Titanium Alloy for Golf Club Faces SP-700HM*.

## Material suplementario

---

- Kim, Y., Murakami, T., Narushima, T., & Ouchi, C. (2 de November de 2007). Evaluation of sliding wear resistant property of C.P. titanium and SP-700 titanium alloy surface - hardened by Ar-5%CO Gas. ISIJ International.
- Ninomi, M., Akiyama, S., Ikeda, M., Hagiwara, M., & Maruyama, K. (2007). The Japan Institute of Metals. Singapore: School of mechanical & Aerospace Engineering.
- Ortega, R. (Julio de 2018). Influencia de la rugosidad del sustrato AISI H13 en la adhesión y desempeño tribológico de recubrimientos delgados de nitruro de titanio. México: Tecnológico nacional de México.
- Pla, R. (Diciembre de 2015). Investigación de las condiciones tribológicas en el conformado de elementos estructurales de Aceros Avanzados de Alta Resistencia en vehículos. Alcoy, Alicante, España: UPV.
- Qiu, A., Pardo, C., & Túnez, C. (Febrero de 2015). El titanio y sus aleaciones. Ciudad de México, Ciudad de México, México.
- Ruden, A., Gonzales, J., Calderon, W., Falleiros, N., & Sequeda, F. (2011). Análisis de corrosión y tribológico de capas delgadas metálicas de Ti y aleación titanio-circonio, depositadas por DC magnetron sputtering no reactivo sobre acero inoxidable de aplicación médica. *Informe técnico (Colombia) edición 75*, 5-10.
- Sheikhali, A., Morakbati, M., & Mahdi, S. (2018). Hot torsion behavior of SP-700 near beta titanium alloy in single and dual phase regions. Tehran, Iran: Metallic materials research center (MMRC).
- Tabatabaei, H., Okuyama, C., Nishihara, T., & Ohashi, T. (2018). Friction stir processing trials of SP-700 Titanium Alloy. Switzerland: Trans tech publications.
- Tobe, H., Matsuki, Y., Takeuchi, S., & Sato, E. (2020). Deployable rocket nozzle utilizing superealistic titanium alloy sheet. Japan: The japan institute of metals and materials.