

Caracterización termofísica y tribológica de lubricantes

Urko Regueiro Ramos^{a,*}

^a*Universidad de Santiago de Compostela*

Abstract

En este estudio se han caracterizado diferentes propiedades termofísicas de lubricantes tales como: densidad y viscosidad a diferentes presiones y temperaturas, conductividad térmica y el coeficiente de fricción lubricando un contacto acero-acero.

Keywords: densidad ρ , viscosidad η , conductividad térmica σ , coeficiente de fricción μ

1. Introducción y procedimiento experimental

Caracterizar y determinar las propiedades de lubricantes cobra especial importancia a la hora de implementar este tipo de líquidos en el uso a nivel industrial. Es por ello que en el presente trabajo obtendremos, a través del análisis de los datos tomados en el laboratorio, los siguientes valores de interés para un aceite del grupo I:

1. Viscosidad y densidad a presión atmosférica

Para la determinación de estas propiedades se ha utilizado un densímetro-viscosímetro Anton Paar Stabinger SVM 3000 con un barrido en temperaturas a intervalos de 5[°C] de 5[°C] a 100[°C].

Las medidas de densidad se basan en el principio de tubo vibrante en U y el rango de medida que alcanza el equipo es de $0.65 \frac{g}{cm^3}$ a $3.0 \frac{g}{cm^3}$.

En cuanto a las medidas de viscosidad se obtienen con un viscosímetro Couette rotacional con geometría cilíndrica y el rango de medida que alcanza es de $0.2[mPa \cdot s]$ a $20000[mPa \cdot s]$

Se obtendrán también, a partir del análisis de datos de dichas propiedades, los siguientes valores de interés:

- Temperatura de transición vítrea
- Coeficiente de expansión térmica

*Autor correspondiente

Email address: urko.regueiro@rai.usc.es (Urko Regueiro Ramos)

2. Densidades a alta presión

En esta sección del estudio se ha empleado, para medir la densidad, un densímetro de tubo vibrante Anton Paar HPM con un rango de operación en temperaturas de $278.15[K]$ a $398.15[K]$ y de presiones de hasta $120[MPa]$.

La temperatura se ha medido utilizando un sonda Pt100 y la presión un transductor HBM Digibar II K-PE3000, ambos conectados a una unidad de adquisición de datos Agilent 34970A.

Se obtendrán también, a partir del análisis de datos de dichas propiedades, los siguientes valores de interés:

- Compresibilidad isotérmica
- Coeficiente de expansión térmica

3. Conductividad térmica

Para la determinación de la conductividad en nuestro estudio hemos utilizado un medidor TEMPOS provisto de un sensor KS-3, con un rango de temperaturas entre $223.15[K]$ a $423.15[K]$ con un tiempo de lectura que podremos variar según necesidad.

4. Ensayos de fricción y desgaste

Por último se ha simulado la fricción y el desgaste, mediante la técnica ball-on-plate, que pueden tener elementos mecánicos en maquinaria industrial utilizando una placa metálica de acero inoxidable AISI 420 sobre la que se hace deslizar, después de aplicar unas gotas del aceite, una bola de acero 100Cr6 y dureza 848 HV sometida a una carga. Este proceso se realiza con un Tribómetro CSM Stardard a temperatura ambiente y condiciones de humedad controlada, obteniendo al finalizar el ensayo la evolución temporal del coeficiente de fricción μ .

2. **Análisis de datos experimentales**

En esta sección se analizarán los resultados obtenidos en el laboratorio para la obtención de los valores descritos en el apartado anterior.

El **tratamiento de datos** realizado puede seguirse en mi **perfil de GitHub** donde se podrán encontrar a su vez los datos recogidos en el laboratorio.

Mencionar que las incertidumbres han tomado los valores proporcionados en los guiones, dados por:

- Para la densidad a altas presiones hemos tomado $s(\rho) = 0.7 \left[\frac{Kg}{m^3}\right]$ si $T \leq 373.15 [K]$ y $s(\rho) = 3 \left[\frac{Kg}{m^3}\right]$ si $T \geq 373.15 [K]$.

- Para el resto de datos de densidad se toma $s(\rho) = 5 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$.
- Para la viscosidad se ha tomado $s(\eta) = 0.01 \cdot \eta$.
- Para la presión se escoge $s(p) = 0.02 \text{ [MPa]}$.
- Para la temperatura se toma $s(T) = 0.2 \text{ [K]}$.

Habiendo utilizado el tratamiento de propagación de incertidumbres en los casos que corresponde como puede verse en el perfil de GitHub.

2.1. Viscosidad y temperatura de transición vítrea

A partir de los datos obtenidos y teniendo en cuenta que nuestro líquido es frágil hemos ajustado la viscosidad η y la temperatura T a la ecuación de Vogel-Fulcher-Tammann 1

$$\ln(\eta) = A + \frac{B}{T - C} \quad (1)$$

analizando posteriormente las desviaciones que presentan nuestras series de datos.

El análisis realizado arroja los resultados mostrados en la Figura 1.

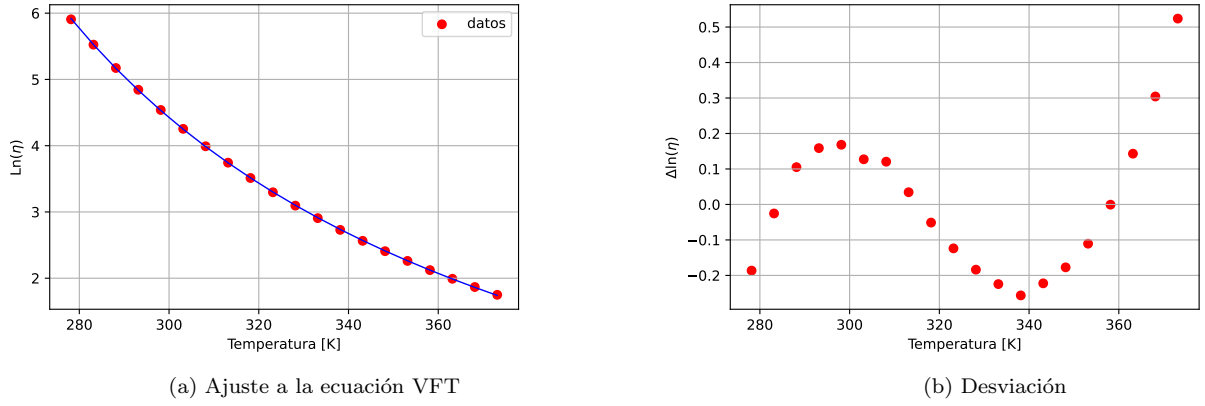


Figure 1: Resultados para $\ln(\eta(T))$ y estadística

Donde los valores para el ajuste han sido:

$$A = -3.098(44)$$

$$B = 992(13)[K]$$

$$C = 168.12(97)[K]$$

Para las desviaciones hemos obtenido:

$$ADD = 0.16\%$$

$$Bias = 0.0062\%$$

$$DMax = 0.52\%$$

A partir de los resultados obtenidos hemos podido estimar la temperatura de transición vítrea(T_g) a partir de la Ecuación 2, utilizando que para esta la viscosidad se toma el valor dado por $\eta_g = 1 \cdot 10^{15} [mPa \cdot s]$:

$$T_g = C + \frac{B}{\ln(\eta_g) - A} \quad (2)$$

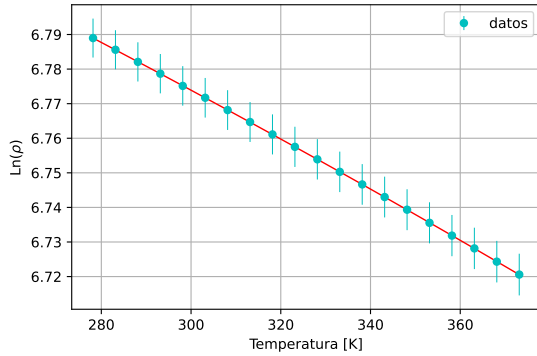
$$T_g = 194.48(1.03)[K]$$

2.2. Densidad y coeficiente de expansión térmica

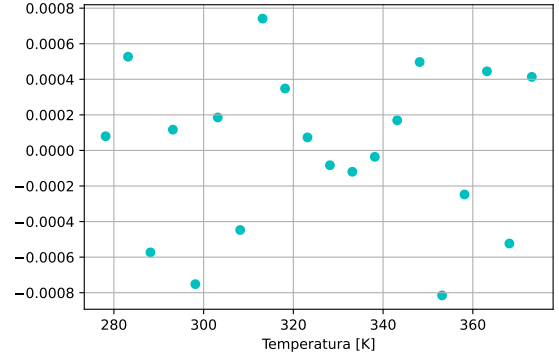
La toma de medidas recogidas para este apartado han sido la densidad y la temperatura que se han ajustado al polinomio de la Ecuación 3

$$\ln(\rho) = A + B \cdot T + C \cdot T^2 + D \cdot T^3 \quad (3)$$

y donde posteriormente se han analizado las desviaciones de los datos, obteniendo los resultados de la Figura 2



(a) Ajuste al polinomio de orden 3



(b) Desviación

Figure 2: Resultados para $\ln(\rho(T))$ y estadística

Donde los valores para el ajuste han sido:

$$A = 6.95(1) \quad B = -5.06(1.25) \cdot 10^{-4}[K^{-1}] \quad C = -2.36(3.86) \cdot 10^{-7}[K^{-2}]$$

$$D = -1.90(3.95) \cdot 10^{-10}[K^{-3}]$$

Para las desviaciones hemos obtenido:

$$ADD = 0.00036\% \quad Bias = -1.84 \cdot 10^{-9}\% \quad DMax = 0.00081\%$$

Por último determinamos el coeficiente de expansión térmica a partir de los resultados del ajuste anterior y la Ecuación 4

$$\alpha_p = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p \quad (4)$$

obteniendo una representación en función de la temperatura como se muestra claramente en la Figura 3

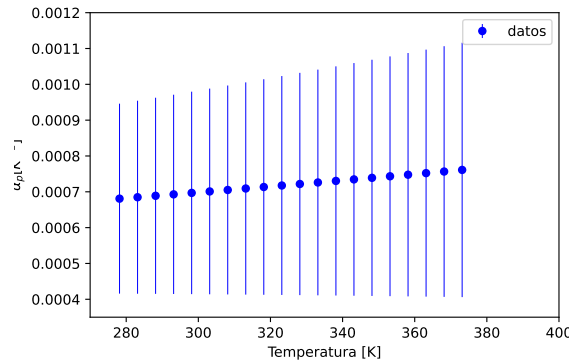


Figure 3: Comportamiento de α_p con la temperatura

2.3. Densidades a alta presión

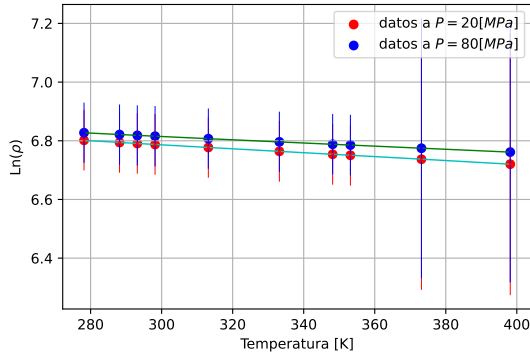
Se han recogido los datos de las densidades experimentales y se procede a un análisis mediante un ajuste a dos isobaras y dos isotermas.

2.3.1. Isobaras y coeficiente de expansión térmica

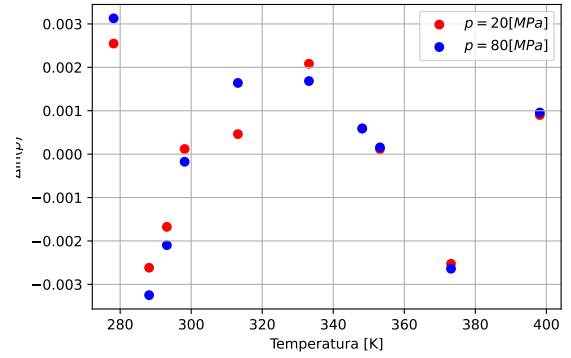
Se presentan en la Tabla 1 los resultados obtenidos, tanto para el ajuste a la Ecuación 3 como las desviaciones, para la variación de la densidad con la temperatura del aceite utilizado para dos presiones fijas así como su representación gráfica en la Figura 4.

Presión 20[MPa]				Presión 80[MPa]			
Parametros ajuste							
A	B[K ⁻¹]	C[K ⁻²]	D[K ⁻³]	A	B[K ⁻¹]	C[K ⁻²]	D[K ⁻³]
7.15(4)	-2.14(4) · 10 ⁻³	4.31(1.18) · 10 ⁻⁶	-4.18(1.16) · 10 ⁻⁹	7.09(5)	-1.47(47) · 10 ⁻³	2.51(1.39) · 10 ⁻⁶	-2.34(1.36) · 10 ⁻⁹
Desviaciones							
ADD	Bias	DMax		ADD	Bias	DMax	
0.0014%	-2.8 · 10 ⁻⁸ %	0.0026%		0.0016%	-3.85 · 10 ⁻⁸ %	0.0032%	

Table 1: Resultados para los ajustes y desviaciones.



(a) Ajuste para cada una de las isobaras



(b) Desviación

Figure 4: Resultados para $\ln(\rho(T))$ y estadística

A partir de los datos de densidad y temperatura se ha calculado, utilizando la Ecuación 4, el coeficiente de expansión térmica para cada una de las presiones como se representa en la Figura 5

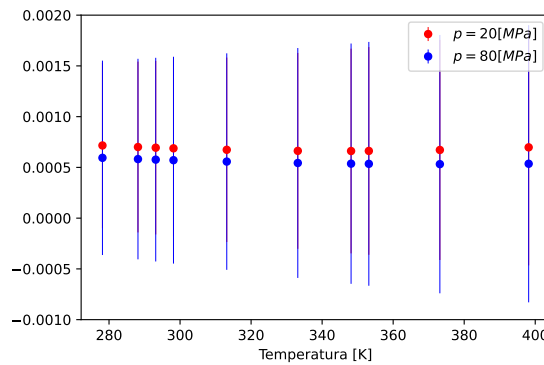


Figure 5: Comportamiento de α_p con la temperatura para cada una de las presiones utilizadas.

2.3.2. Isotermas y compresibilidad isotérmica

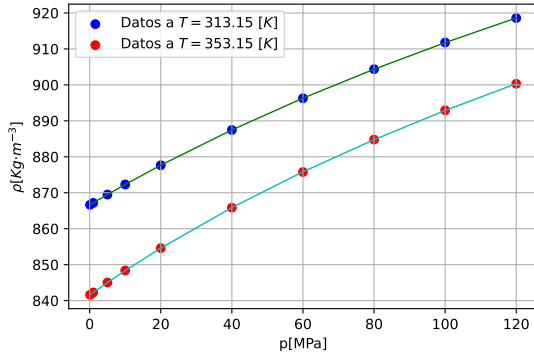
Se presentan en la Tabla 2 los resultados obtenidos, tanto para el ajuste a la Ecuación 5 como las desviaciones, para la variación de la densidad con la presión del aceite utilizado para dos temperaturas fijas así como su representación gráfica en la Figura 6.

Se ha utilizado para el ajuste una ecuación tipo Tammann-Tait que nos correlaciona los datos obtenidos:

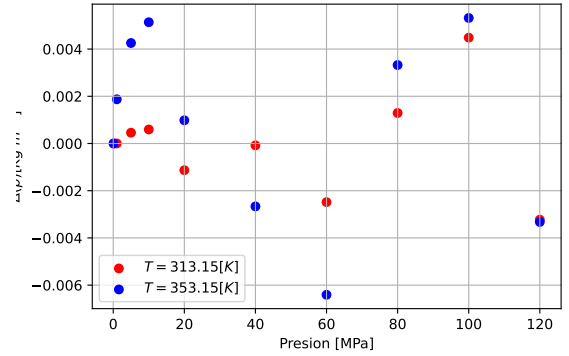
$$\rho(T, p) = \frac{\rho(T, p_{ref})}{1 - C \cdot \ln\left(\frac{B+p}{B+p_{ref}}\right)} \quad (5)$$

Temperatura 313.15[K]			Temperatura 353.15[K]		
Parámetros ajuste					
B[MPa]	C		B[MPa]	C	
119.15(55)	$81.28(28) \cdot 10^{-3}$		95.04(63)	$79.98(39) \cdot 10^{-3}$	
Desviaciones					
ADD	Bias	DMax	ADD	Bias	DMax
0.0014%	$-9.16 \cdot 10^{-6}\%$	0.0045%	0.0033%	0.0008%	0.0045%

Table 2: Resultados para los ajustes y desviaciones.



(a) Ajuste para cada una de las isotermas



(b) Desviación

Figure 6: Resultados para $\rho(T, p)$ y estadística

Conocidos los parámetros de la Ecuación 5 hemos calculado el coeficiente de compresibilidad isotérmico a partir de la Ecuación 6, donde simplemente se ha tomado la derivada de la ecuación tipo Tammann-Tait descrita. Los resultados obtenidos se han representado en la Figura 7

$$\kappa_T = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_T \quad (6)$$

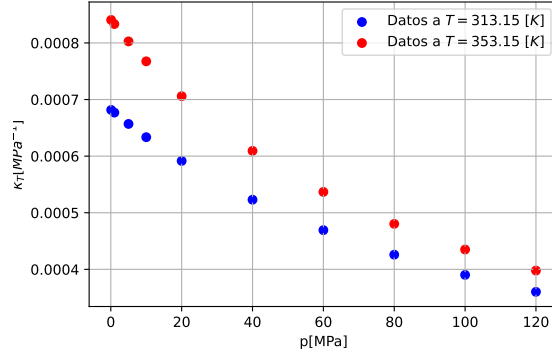


Figure 7: Comportamiento de κ_T con la presión para cada una de las temperaturas utilizadas.

2.4. Conductividad térmica

Se ha configurado la toma de medidas para una temperatura de 293.15[K], realizando posteriormente un estudio estadístico con los datos de la conductividad térmica obtenida, habiendo utilizado para el intervalo de confianza unas dos desviaciones típicas para afinar el valor medio de la conductividad térmica tenemos que

$$\sigma = 0.128(13) \left[\frac{W}{mK} \right]$$

2.5. Ensayos de fricción y desgaste

Para la realización de esta simulación se ha configurado el experimento con las condiciones mostradas en la Tabla 3,

habiendo obtenido siete ensayos que se han tratado estadísticamente a partir del instante 1000[s] para determinar el coeficiente de fricción medio como se muestra en la Tabla 4

Se muestra a su vez en la Figura 8 la evolución temporal del coeficiente de fricción para cada ensayo

Table 3: Condiciones de operación utilizadas en el tribómetro

Parámetro	Valor
Configuración	ball-on-plate
Movimiento	reciprocante
Velocidad lineal máxima	$10[cm \cdot s^{-1}]$
Carga	$5[N]$
Distancia	$100[m]$
Amplitud	$1[cm]$
Relación adquisición de datos	$100[Hz]$

Table 4: Coeficientes de fricción medio para cada ensayo

$\bar{\mu}_1$	$\bar{\mu}_2$	$\bar{\mu}_3$	$\bar{\mu}_4$	$\bar{\mu}_5$	$\bar{\mu}_6$	$\bar{\mu}_7$	$\bar{\mu}_8$
0.079(2)	0.061(3)	0.063(2)	0.093(4)	0.075(4)	0.067(4)	0.051(2)	0.042(2)

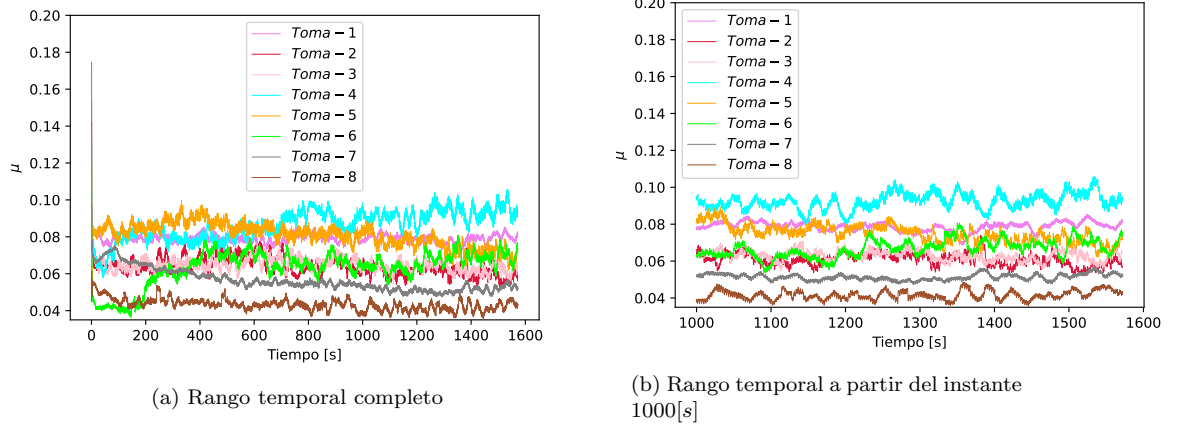


Figure 8: Evolución temporal para el coeficiente de fricción

A continuación se ha realizado una estadística, teniendo en cuenta todos los ensayos, para determinar tanto el valor medio del coeficiente de fricción

$$\bar{\mu} = 0.066(1)$$

como su desviación en este análisis

$$ADD = 19.8\%$$

$$Bias = -5.62\%$$

$$DMax = 58.35\%$$

y cuya representación se muestra en la Figura 9.

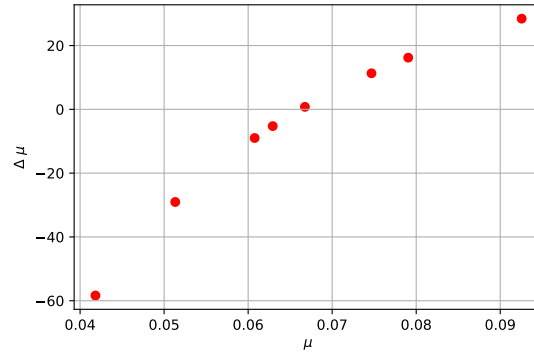


Figure 9: Desviación de los datos del coeficiente de fricción μ

Por último se ha estudiado el desgaste en la placa de acero inoxidable AISI 420 con el perfilómetro óptico S NEOX 3D Optical Profiler, obteniendo las imágenes que se muestran en la Figura 10 y las dimensiones de la zona afectada tabuladas en la Tabla 5

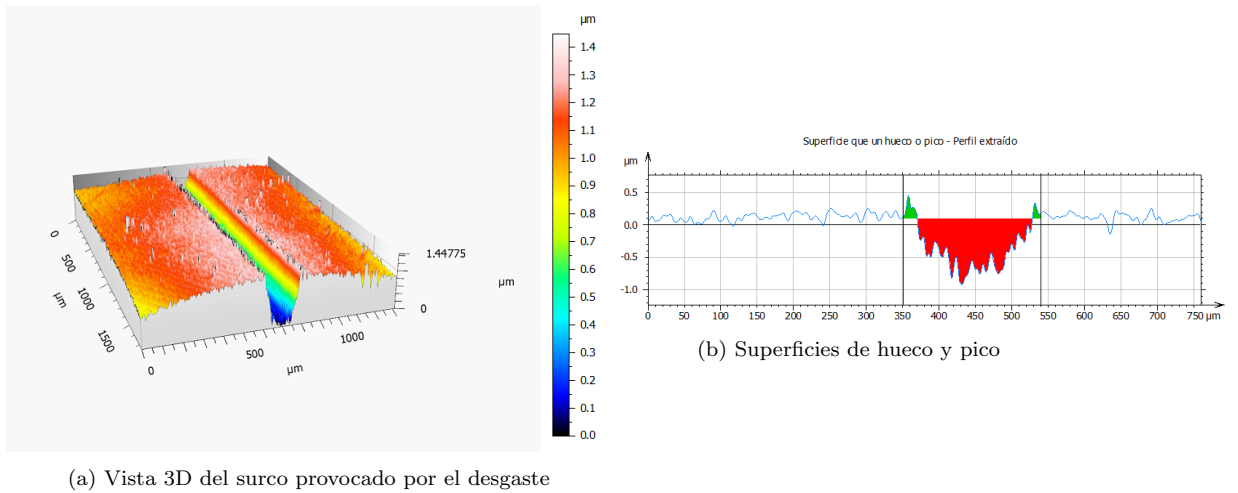


Figure 10: Resultados extraídos del perfilómetro óptico S NEOX 3D

Parámetros	Valor obtenido	Unidad
<i>Profundidad máxima</i>	1.03734	μm
<i>Área zona roja</i>	94.9902	μm^2
<i>Altura máxima</i>	0.337752	μm
<i>Área zona verde</i>	4.08759	μm^2

Table 5: Dimensiones de la zona desgastada.

3. Conclusiones

En cuanto a los resultados obtenidos para la viscosidad en la Sección 2.1 podemos comentar que en vista a las desviaciones mostradas en la Figura 1b se ve claramente que en torno al valor cero se distribuyen nuestros datos de forma aproximadamente simétrica, lo que nos indica un buen ajuste de nuestros datos al modelo dado por la Ecuación 1. Partiendo de este nivel de confianza de nuestros datos se ha obtenido un valor para la temperatura de transición vítrea de $194.48(1.03)[K]$.

Para los datos de densidad analizados, en la Sección 2.2, se puede observar en la Figura 2b como estos presentan una menor dispersión en torno al cero asegurando un buen ajuste a la Ecuación 3. Con respecto al comportamiento del coeficiente de expansión térmica podemos observar en la Figura 3 como este sigue un comportamiento lineal aparentemente, aumentando ligeramente con la temperatura, por lo que el término cuadrático en α_p derivado de la Ecuación 3 no contribuye significativamente al valor de α_p .

Se obtiene de igual manera, en la Sección 2.3.1, para el modelo de la Ecuación 3 en ambas presiones fijas un buen ajuste, siendo reflejado esto en la Figura 4b para las desviaciones obtenidas. En cuanto a los coeficientes de expansión térmica que se muestran en la Figura 5 se sigue observando un comportamiento lineal por lo que quizá sería buena aproximación tomar solamente en la Ecuación 3 hasta el término cuadrático.

En el análisis realizado para las isothermas en la Sección 2.3.2 podemos ver como las desviaciones en la Figura 6b nos informan de que el ajuste a la Ecuación 5 es fiable. En cuanto al coeficiente de compresibilidad isoterma, derivado de la ecuación de Tammann-Tait, que se muestra en la Figura 7 observamos que este disminuye al aumentar la presión y es menor cuanto más baja sea la temperatura.

Por último comentar que para el valor obtenido en la Sección 2.5 para el coeficiente de fricción, $0.066(1)$, se encuentra en un rango razonable en comparación con otros valores donde se ha utilizado acero, por ejemplo obtenemos para una muestra de acero teniendo en su superficie grafito, un valor para el coeficiente de fricción cinético de 0.058, para una muestra de acero con manteca en la superficie un valor de 0.084 y para una muestra de acero con aceite de ricino en la superficie un valor de 0.081.

4. Referencias

- <https://www.sensofar.com/metrology/industry-research/sneox/>
- Guiones de Prácticas – Métodos Experimentales Avanzados Laboratorio de Física aplicada II
- Coeficientes de fricción – https://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html
- Temperatura de transición vítrea – https://es.wikipedia.org/wiki/Temperatura_de_transici%C3%B3n_v%C3%ADtre%C3%A1#Pol%C3%ADmeros