

Refundido

Para terminar la deposición del recubrimiento se hará un refundido con llama. Cuyo objetivo principal es, homogeneizar la microestructura del recubrimiento, reduciendo los poros e incrementando la adherencia al sustrato.

Ensayos

Ensayos del tribómetro

Una vez aplicado el recubrimiento procederemos a realizar los ensayos en el tribómetro.

El tribómetro es una máquina que simula las condiciones de desgaste que se dan en un entorno real. Tiene varios parámetros a controlar, y mide el coeficiente de fricción.

Básicamente, el ensayo consiste en fijar la muestra en un brazo, aplicarle la carga con la que se quiere realizar el ensayo y hacer girar el disco, para conseguir un movimiento entre las superficies.

Existen distintos tipos y configuraciones de tribómetros, nosotros usaremos en pin on disk (Figura 7.9)

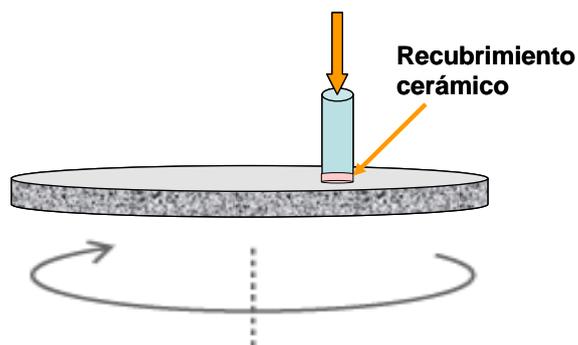


Figura 7.9

Los pasos para poner en marcha el tribómetro son los siguientes:

1. Fijar el disco y la muestra
2. Ejecutar el programa COMPEND 2000 (software con el que trabaja este tribómetro)
3. Se pone a cero el coeficiente de fricción
4. Colocar el peso e introducirlo en el programa
5. Posición del pin y la velocidad
6. Bajar el brazo y encender el motor



Figura 7.10. (a) tribómetro Pilint&Partners TE79/P y (b) detalle del disco del ensayo

Realizaremos dos tipos de ensayos: el primero, un estudio del coeficiente de fricción y el segundo un estudio de la pérdida de masa.

Para analizar el coeficiente de fricción someteremos las muestras a ensayos con diferentes velocidades, 30, 40, 50, 60 rpm por muestra, en un radio de 30 mm, para ver como evoluciona. Como parámetro fijo tendremos la carga, que será de 11 N.

Para analizar la pérdida de masa se hará un ensayo de desgaste. El ensayo se irá parando para pesar la pieza cada 100 m, por lo tanto se nos quedarán cuatro masas distintas por material: la inicial, cuando lleve 100 m, cuando lleve 200 m y cuando lleve 300 m. Como parámetros fijos tendremos una carga axial de 11 N y una velocidad de 40 rpm.

En las siguientes tablas (tabla 7.3 y 7.4) se muestra de manera más clara los ensayos que se van a realizar.

Material	Carga (N)	Radio (mm)	Velocidad (rpm)
NiCrBSi	11	30	30
			40
			60
			80
NiCrBSi + 1% Al ₂ O ₃			30
			40
			60
			80
NiCrBSi + 2% Al ₂ O ₃			30
			40
			60
			80
NiCrBSi + 1% Zr ₂ O ₃			30
			40
			60
			80
NiCrBSi + 2% Zr ₂ O ₃	30		
	40		
	60		
	80		

Tabla 7.3. Ensayos a realizar para el coeficiente de rozamiento

Material	Carga (N)	Radio (mm)	Velocidad (rpm)	Distancia (m)
NiCrBSi	11	30	40	100
				200
				300
NiCrBSi + 1% Al ₂ O ₃				100
				200
				300
NiCrBSi + 2% Al ₂ O ₃				100
				200
				300
NiCrBSi + 1% Zr ₂ O ₃				100
				200
				300
NiCrBSi + 2% Zr ₂ O ₃				100
				200
				300

Tabla 7.4. Ensayos a realizar para evaluar el desgaste

8. Análisis de resultados

A continuación se analizarán los resultados obtenidos en los ensayos; se hará mediante tablas de datos, gráficas y fórmulas. Se estudiarán los recubrimientos desde varios aspectos diferentes con la intención de que la elección del recubrimiento sea el más adecuado.

Como se ha dicho anteriormente se han realizado dos tipos de ensayos: de desgaste y de coeficiente de rozamiento.

Ensayos de desgaste

NiCrBSi (V= 40 rpm y C =11N)				
Distancia (m)	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Pérdida de masa (g)	% Pérdida de masa
100	7,5460	7,5459	0,001	0,0132
200	7,5459	7,5459	0,001	0,0132
300	7,5459	7,5457	0,003	0,0397

Tabla 8.1. Resultados ensayo de desgaste NiCrBSi

NiCrBSi + 1% Al₂O₃ (V= 40 rpm y C =11N)				
Distancia (m)	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Pérdida de masa (g)	% Pérdida de masa
100	7,4498	7,4487	0,002	0,0268
200	7,4487	7,4484	0,005	0,0671
300	7,4484	7,4479	0,010	0,1342

Tabla 8.2. Resultados ensayo de desgaste NiCrBSi + 1% Al₂O₃

NiCrBSi + 2% Al₂O₃ (V= 40 rpm y C =11N)				
Distancia (m)	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Pérdida de masa (g)	% Pérdida de masa
100	7,5142	7,5133	0,009	0,1197
200	7,5133	7,5131	0,011	0,1464
300	7,5131	7,5130	0,012	0,1597

Tabla 8.3. Resultados ensayo de desgaste NiCrBSi + 2% Al₂O₃

NiCrBSi + 1% Zr₂O₃ (V= 40 rpm y C =11N)				
Distancia (m)	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Pérdida de masa (g)	% Pérdida de masa
100	7,2532	7,2519	0,013	0,1792
200	7,2519	7,2519	0,017	0,2344
300	7,2519	7,2512	0,020	0,2757

Tabla 8.4. Resultados ensayo de desgaste NiCrBSi + 1% Zr₂O₃

NiCrBSi + 1% Zr₂O₃ (V= 40 rpm y C =11N)				
Distancia (m)	Masa inicial (g)	Masa final (g)	Pérdida de masa (g)	% Pérdida de masa
100	7,3939	7,3931	0,008	0,1082
200	7,3931	7,3928	0,011	0,1488
300	7,3928	7,3926	0,013	0,1758

Tabla 8.5. Resultados ensayo de desgaste NiCrBSi + 1% Zr₂O₃

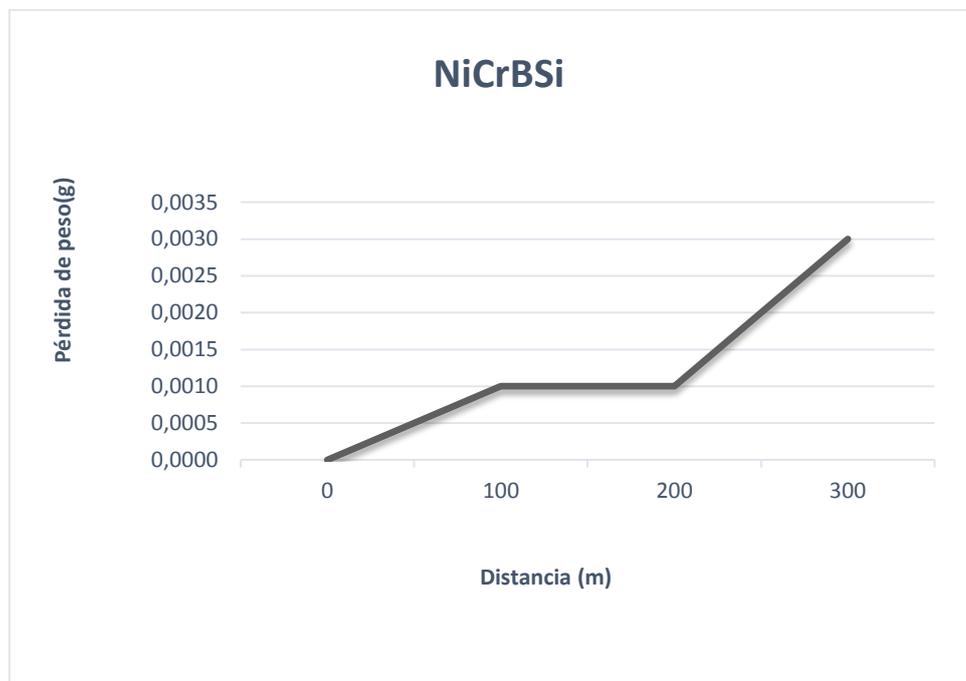


Figura 8.1 Pérdida de peso – distancia. NiCrBSi

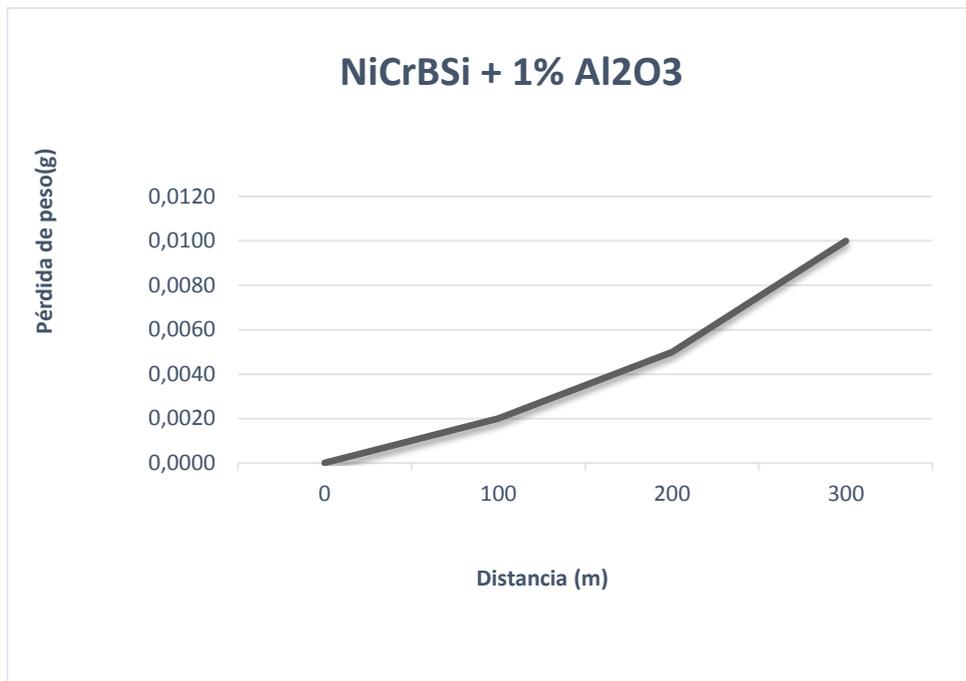


Figura 8.2. Pérdida de peso – distancia. NiCrBSi + 1% Al₂O₃

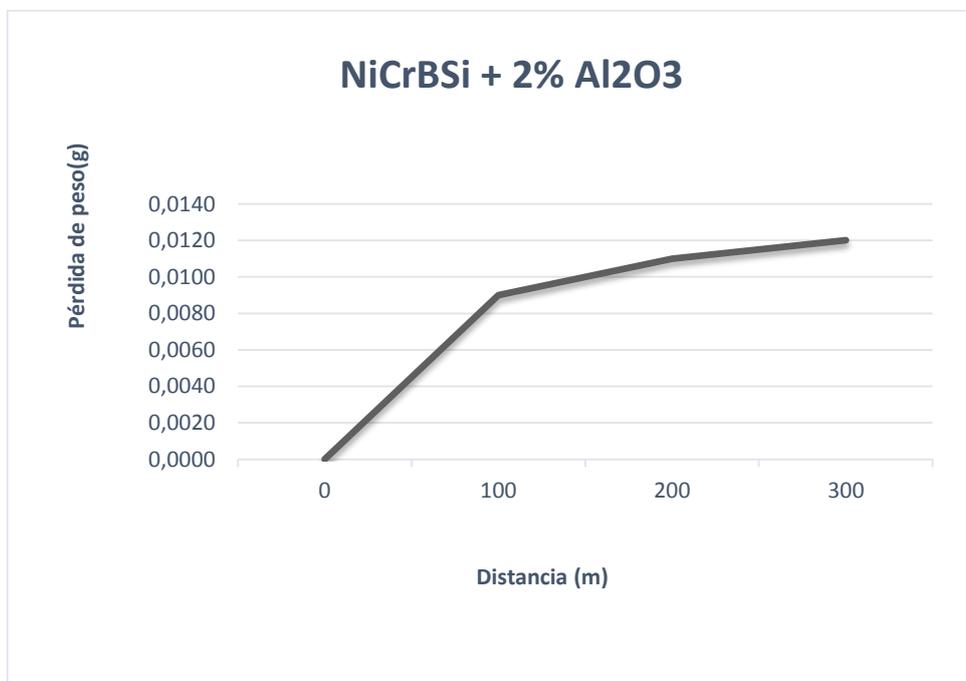


Figura 8.3. Pérdida de peso – distancia. NiCrBSi + 2% Al₂O₃

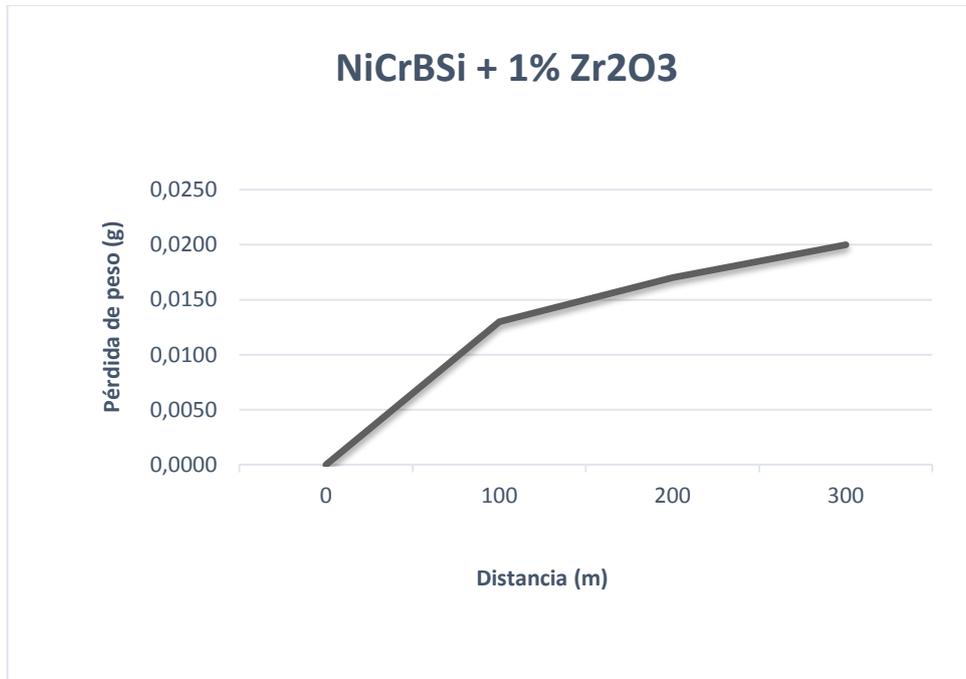


Figura 8.4. Pérdida de peso – distancia. NiCrBSi + 1% Zr₂O₃

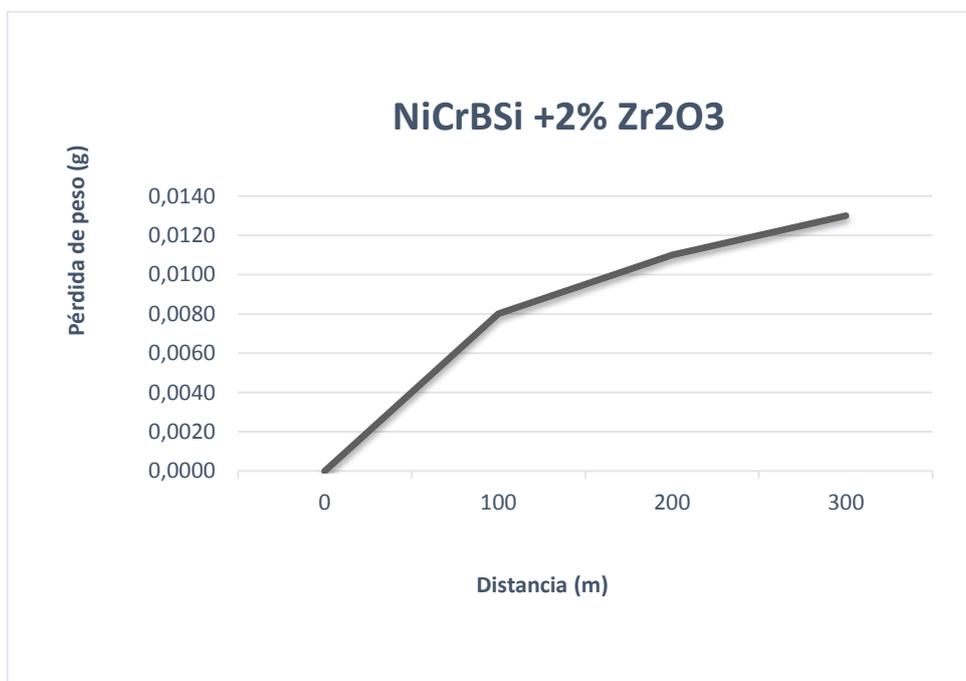


Figura 8.5. Pérdida de peso – distancia. NiCrBSi + 2% Zr₂O₃

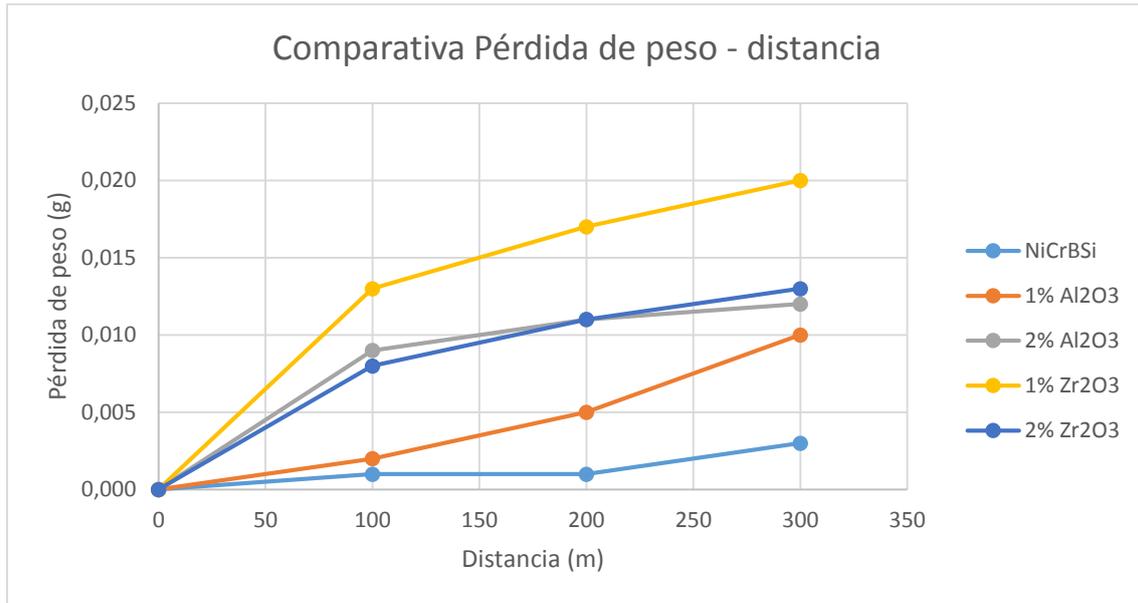


Figura 8.6 Comparativo de tendencia de desgaste

Pendiente	
NiCrBSi	0,000020
NiCrBSi + 1% Al ₂ O ₃	0,000040
NiCrBSi + 2% Al ₂ O ₃	0,000015
NiCrBSi + 1% Zr ₂ O ₃	0,000035
NiCrBSi + 2% Zr ₂ O ₃	0,000025

Tabla 8.6. Pendiente de la gráfica

En las tablas y gráficas anteriores, se relaciona la pérdida de masa con la distancia recorrida por las muestras. Como se observa en las gráficas, y como es normal, a mayor distancia recorrida mayor será la pérdida de masa.

Lo importante de estos gráficos es ver la tendencia de desgaste que tienen, y a partir de ahí comparar cual es el material con mejor comportamiento. En la tabla 8.6, se han calculado las pendientes correspondientes a cada material. Ordenamos los materiales de menor a mayor pendiente, por lo tanto se nos queda como:

- NiCrBSi + 2% Al₂O₃
- NiCrBSi
- NiCrBSi + 2% Zr₂O₃
- NiCrBSi + 1% Zr₂O₃
- NiCrBSi + 1% Al₂O₃

A la vista de estos resultados, podemos concluir que, el material con mejor comportamiento de desgaste será el material con un 2% Al_2O_3

Ensayos de coeficiente de rozamiento

NiCrBSi	
Velocidad (rpm)	Coefficiente de fricción (μ)
30	0,117
40	0,115
60	0,099
80	0,090

Tabla 8.7. Coef. de fricción NiCrBSi

NiCrBSi + 1% Al_2O_3	
Velocidad (rpm)	Coefficiente de fricción (μ)
30	0,114
40	0,104
60	0,090
80	0,084

Tabla 8.8. Coef. de fricción 1% Al_2O_3

NiCrBSi + 2% Al_2O_3	
Velocidad (rpm)	Coefficiente de fricción (μ)
30	0,129
40	0,119
60	0,113
80	0,104

Tabla 8.9. Coef. de fricción 2% Al_2O_3

NiCrBSi + 1% Zr_2O_3	
Velocidad (rpm)	Coefficiente de fricción (μ)
30	0,551
40	0,449
60	0,461
80	0,444

Tabla 8.10. Coef. de fricción 1% Zr_2O_3

NiCrBSi + 2% Zr_2O_3	
Velocidad (rpm)	Coefficiente de fricción (μ)
30	0,440
40	0,444
60	0,442
80	0,450

Tabla 8.11. Coef. de fricción 2% Zr_2O_3

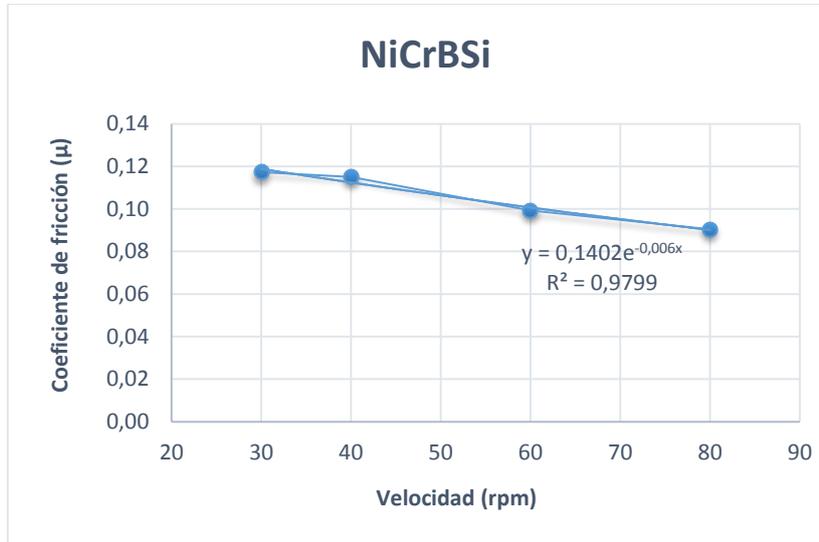


Figura 8.7. Coeficiente de fricción - velocidad. NiCrBSi

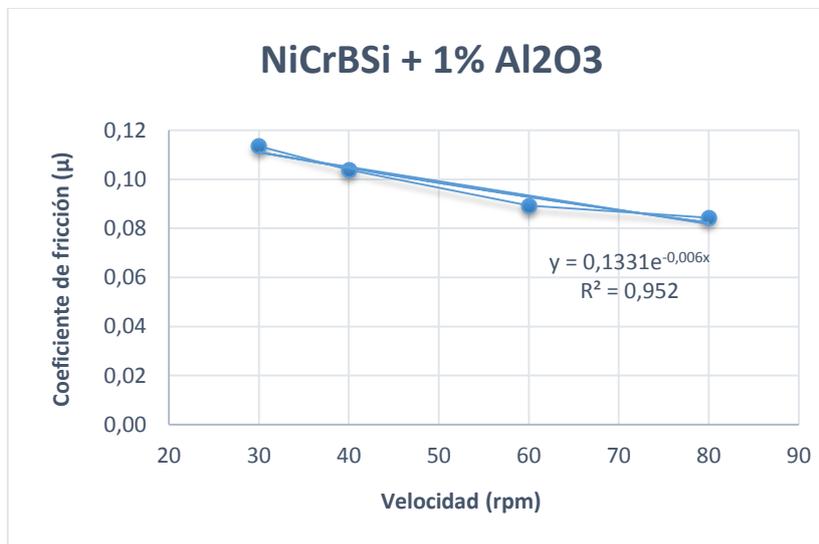


Figura 8.8. Coeficiente de fricción - velocidad. 1% Al₂O₃

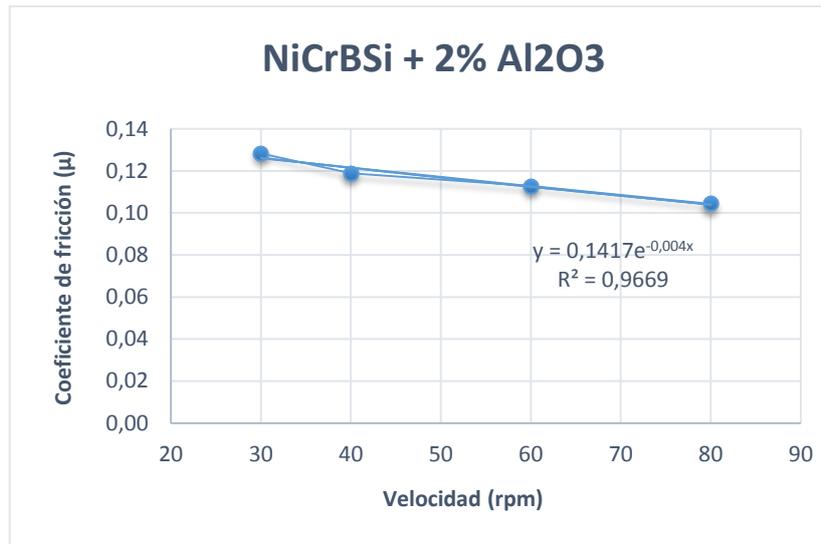


Figura 8.9. Coeficiente de fricción - velocidad. 2% Al₂O₃

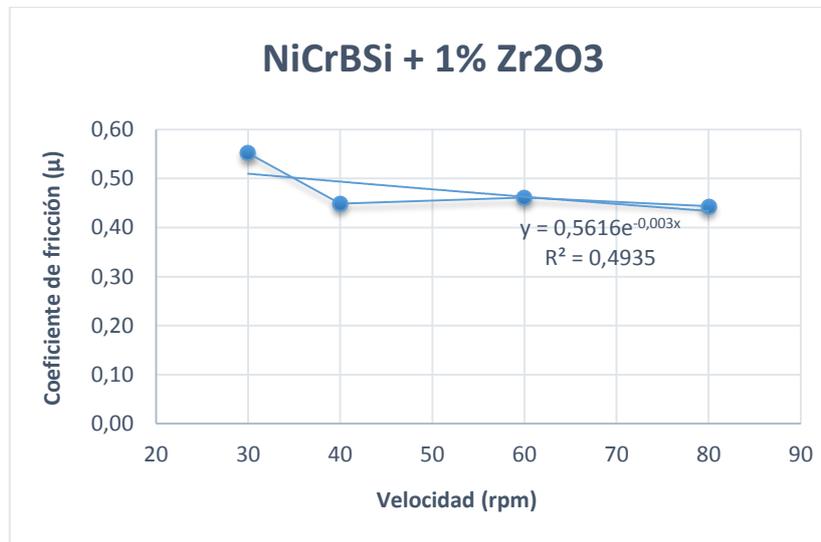


Figura 8.10. Coeficiente de fricción - velocidad 1% Zr₂O₃

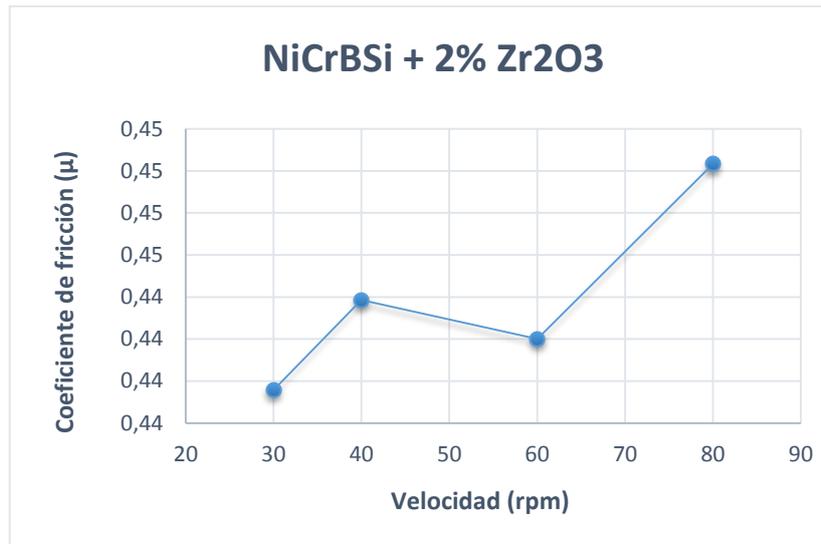


Figura 8.11. Coeficiente de fricción - velocidad 2% Zr_2O_3

En las tablas y gráficos anteriores, tenemos la relación entre el coeficiente de fricción y la velocidad. Se puede observar, excepto en el 2% Zr_2O_3 , como a medida que sube la velocidad el coeficiente de fricción disminuye, esto se explicó en el punto 2.2.1 de antecedentes.

Los gráficos tienen una tendencia exponencial, en cada gráfico se ha puesto la R^2 , que indica el ajuste de la gráfica exponencial en los datos, en el caso del NiCrBSi, NiCrBSi + 1% Al_2O_3 y NiCrBSi + 2% Al_2O_3 el ajuste es bastante alto.

Mediante unas fórmulas vamos a analizar:

- La influencia de la velocidad en el coeficiente de rozamiento
- Evolución de la temperatura en las superficies de fricción
- El coeficiente de rozamiento cohesivo

INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE DESLIZAMIENTO EN EL COEFICIENTE DE ROZAMIENTO

Como ya explicó en el punto de antecedentes (2.2.1), el coeficiente de rozamiento respecto a la velocidad tiene un comportamiento exponencial, al principio el coeficiente baja considerablemente pero poco a poco tiende a ser constante. Con la ayuda de la fórmula que esta a continuación vamos a ajustar los datos a dicha exponencial.

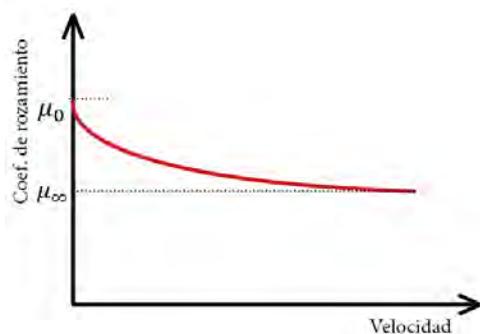


Figura 8.12. Gráfica coeficiente de rozamiento - velocidad

$$\mu = \mu_{\infty} + (\mu_0 - \mu_{\infty}) * e^{-k_p * v}$$

Kp	
NiCrBSi	5,92
NiCrBSi + 1% Al ₂ O ₃	9,53
NiCrBSi + 2% Al ₂ O ₃	5,45
NiCrBSi + 1% Zr ₂ O ₃	9,65
NiCrBSi + 2% Zr ₂ O ₃	

Tabla 8.12. Pendiente

- Como NiCrBSi + 2% Zr₂O₃ no tiene un comportamiento exponencial no aplicaremos la fórmula.

La correlación entre el coeficiente de rozamiento y la velocidad, responde a un modelo matemático de acuerdo con la ecuación anterior.

NiCrBSi	$\mu = 0,090 + 0,027 * e^{-5,92v}$
NiCrBSi + 1% Al ₂ O ₃	$\mu = 0,084 + 0,030 * e^{-9,53*v}$
NiCrBSi + 2% Al ₂ O ₃	$\mu = 0,104 + 0,025 * e^{-5,45*v}$
NiCrBSi + 1% Zr ₂ O ₃	$\mu = 0,444 + 0,107 * e^{-9,65*v}$
NiCrBSi + 2% Zr ₂ O ₃	

EVALUACIÓN DE LA TEMPERATURA EN LAS SUPERFICIES DE FRICCIÓN

En todo contacto de dos superficies con contacto existe una fricción, que hace que aumente la temperatura. Esta temperatura, conlleva una pérdida de las características resistentes de los materiales.

$$\theta = \frac{\mu * v * N}{8 * \alpha * a}$$

Donde:

θ → Incremento de temperatura en las superficies rozantes

μ → Coeficiente de rozamiento

N → Carga aplicada (N)

α → Conductividad térmica ($\frac{W}{K*m}$)

a → Área de la superficie (m²)

	30	40	60	80
NiCrBSi	5,7745	7,5657	9,7681	11,8449
NiCrBSi + 1% Al ₂ O ₃	5,6018	6,8344	8,8012	11,1079
NiCrBSi + 2% Al ₂ O ₃	6,3273	7,8145	11,1297	13,7269
NiCrBSi + 1% Zr ₂ O ₃	27,209	29,5043	45,4696	58,3428
NiCrBSi + 2% Zr ₂ O ₃	21,9654	29,1996	43,6114	59,2684

Tabla 8.13. Incremento de la temperatura en la superficie.