



UNIVERSITAT JAUME I
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA I CIÈNCIES EXPERIMENTALS
MÀSTER UNIVERSITARI EN ENGINYERIA INDUSTRIAL

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO TRIBOLÓGICO Y
CONSUMO ENERGÉTICO DE RECUBRIMIENTOS NICRBSI CON
ADICIÓN DE ALÚMINA DEPOSITADOS MEDIANTE PROYECCIÓN
TÉRMICA POR OXY-FUEL**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

AUTOR

Mohammad Husam

Alsaqqa Duwairi

DIRECTOR

Kudama Habib Ameen

Castellón, Julio 2021

ÍNDICE GENERAL

1. MEMORIA	8
2. ANEXOS.....	119
3. PLIEGO DE CONDICIONES	132
4. PRESUPUESTO.....	140

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evolución de la fuerza y coeficiente de rozamiento con la velocidad.....	17
Figura 2. Rugosidad en función de los mecanismos de rozamiento	18
Figura 3. Etapas del desgaste	19
Figura 4. Desgaste abrasivo	20
Figura 5. Modelo cálculo desgaste abrasivo	20
Figura 6. Ejemplo desgaste adhesivo.....	22
Figura 7. Mecanismos de desgaste por fatiga superficial.....	24
Figura 8. Fases del desgaste por fretting con corrosión.....	25
Figura 9. Fases del desgaste por corrosión.....	26
Figura 10. Desgaste por erosión.....	27
Figura 11. Desgaste por cavitación.....	27
Figura 12. Hélice de bomba con desgaste por cavitación.....	28
Figura 13. Tribómetro.....	30
Figura 14. Curva de Stribeck.....	33
Figura 15. Régimen de lubricación límite: ausencia de capa de lubricante continua....	35
Figura 16. Régimen de lubricación mixta. Capa de lubricante parcialmente continua.	35
Figura 17. Régimen de lubricación hidrodinámico. Capa de lubricante continua y separación total de las superficies.	36
Figura 18. Capa de lubricante continua como fenómeno de la lubricación eslastohidrodinámica.	36
Figura 19. Aplicación de la lubricación hidrostática	37
Figura 20. Variación de la viscosidad con respecto la temperatura para aceites con diferentes IV.	39
Figura 21. Defectos en los recubrimientos obtenidos por proyección térmica.....	51
Figura 22. Representación de la proyección térmica por llama de hilo.....	52
Figura 23. Representación de la proyección térmica por HVOF	53
Figura 24. Representación de la royección térmica por arco eléctrico.....	54
Figura 25. Representación de la proyección térmica por plasma.....	55
Figura 26. Configuración del tipo Pin on Disk.....	56
Figura 27. Tribómetro TE 79 y módulo TE 79/P Indexing Pin on Disc Module.....	58
Figura 28. Interfaz software COMPEND 2000	59
Figura 29. Aceite CUT-MAX 7-26	60
Figura 30. Par tribológico: Disco de acero AISI 304 (izquierda) y pin de acero AISI 304 (derecha).....	62
Figura 31. Pins cortados	64
Figura 32. Tronzadora de disco Buehler modelo Abrasimet 2.....	64
Figura 33. Granalladora MEGA 4.....	65
Figura 34. Equipo de limpieza por ultrasonidos Branson 2210.....	66
Figura 35. Mezclador rotacional WAB Turbula	67
Figura 36. Pistola de proyección térmica Castodyn DS 8000.....	68
Figura 37. Operación de proyección térmica oxy-fuel	69
Figura 38. Válvula caudal gases	69
Figura 39 . Palanca de cierre rápido.....	72
Figura 40. Pin con recubrimiento de NiCrBSi tras la proyección por oxy-fuel	70
Figura 41. Refusión por llama oxiacetilénica.....	71

Figura 42. Izquierda: Pins con recubrimiento de NiCrBSi tras la refusión.	
Derecha:Pins con recubrimiento de NiCrBSi+alúmina tras la refusión	71
Figura 43. Desbastadora Metaserv 2000.....	72
Figura 44. Pulidora Buehler Metaserv.....	73
Figura 45. Pulidora Buehler Metaser.....	73
Figura 46. Muestra de NiCrBSi (izquierda) y muestra de NiCrBSi+alúmina pulida (derecha).....	73
Figura 47. Ensayo de fricción en medios lubricados.	75
Figura 48. Báscula de precisión usada.....	76
Figura 49. Operación de corte por disco Buehler ISOMET.....	77
Figura 50. Equipo de embutición Buehler Metaserv.....	77
Figura 51. Muestra embutida en metacrilato	78
Figura 52. Representación indentador	80
Figura 53. Microdureómetro Vickers Micromet 1.....	80
Figura 54. Microscopio electrónico de barrido SEM ubicado en el edificio de investigación del Campus del Río Seco de la Universitat Jaume I.....	81
Figura 55. Imagen SEM a 35 aumentos del recubrimiento de NiCrBSi de la muestra R.83	
Figura 56. Imagen SEM a 1.000 aumentos del recubrimiento de NiCrBSi de la muestra R.....	83
Figura 57. Imagen SEM a 7.500 aumentos del recubrimiento de NiCrBSi de la muestra R.....	85
Figura 58. Espectros EDAX del recubrimiento R.....	85
Figura 59. Imagen SEM a 35 aumentos del recubrimiento de NiCrBSi de la muestra R'.	
.....	87
Figura 60. Imagen SEM a 1000 aumentos del recubrimiento de NiCrBSi de la muestra R'.....	87
Figura 61. Imagen SEM a 1.000 aumentos del recubrimiento de NiCrBSi de la muestra R'.....	89
Figura 62. Espectros EDAX del recubrimiento R.....	89
Figura 63. Detalle de micrografía a 1.0000 aumentos del recubrimiento de NiCrBSi de la muestra R'	90
Figura 64. Mapping. Presencia de níquel, cromo y silicio.	90
Figura 65. Mapping. Presencia de aluminio y oxígeno.....	91
Figura 66. Presencia de carbono, cromo y silicio.	91
Figura 67. Perfiles de microdurezas Vickers de la sección transversal de los recubrimientos muestras R y R'	92
Figura 68. Representación del coeficiente de rozamiento obtenido para la muestra R en función de la variación de la velocidad.	95
Figura 69. Representación del coeficiente de rozamiento obtenido para la muestra R' en función de la variación de la velocidad.	95
Figura 70. Comparativas entre los valores del coeficiente de rozamiento de las muestras R y R' en función de la velocidad.....	96
Figura 71. Representación del coeficiente de rozamiento obtenido para la muestra R en función de la variación de la carga.	97
Figura 72. Representación del coeficiente de rozamiento obtenido para la muestra R' en función de la variación de la carga.....	98

Figura 73. Comparativas entre los valores del coeficiente de rozamiento de las muestras R y R' en función de la carfa	99
Figura 74. Curva de Stribeck a partir del parámetro de Hersey para la muestra R.	101
Figura 75. Curva de Stribeck a partir del parámetro de Hersey para la muestra R'....	101
Figura 76. Comparativa entre las curvas de Stribeck de las muestra R y R'.....	103
Figura 77. Correlación lineal μ -H _s en función de las cargas para R.	104
Figura 78. Correlación lineal μ -H _s en función de las cargas para R'....	104
Figura 79. Correlación entre los términos independientes μ_0 y las presiones aparentes Pa para la muestra R.....	105
Figura 80. Correlación entr los términos independientes μ_0 y las presiones aparentes Pa para la muestra R'.....	105
Figura 81. Correlación m y Pa en las curvas de lubricación mixta para la muestra R..	106
Figura 82. Correlación m y Pa en las curvas de lubricación mixta para la muestra R'.	107
Figura 83. Correlación entre ($\mu-\mu_0$) y el parámetro compuesto de H _s y Pa ^{nm} para la muestra R.....	108
Figura 84. Correlación entre ($\mu-\mu_0$) y el parámetro compuesto de H _s y Pa ^{nm} para la muestra R'.....	108
Figura 85. Comparativa entre la zona de lubricación mixta de las muestras R y R'....	109
Figura 86. Comparativa entre CEF máximos y acumulados totales de las muestras R y R'.....	112
Figura 87. Evolución del CEF acumulado por carga para la muestra R.	113
Figura 88. Evolución del CEF acumulado por carga para la muestra R'.....	113

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de lubricantes según escala ISO VG	40
Tabla 2. Propiedades alúmina	50
Tabla 3. Parámetros de operación del tribómetro TE 79	59
Tabla 4. Parámetros de operación del módulo TE 79/P Indexing Pin on Disc Module .	59
Tabla 5. Propiedades aceite CUT-MAX 7-26.....	60
Tabla 6. Composición química acero inoxidable AISI 304 (%).	62
Tabla 7. Propiedades físicas acero inoxidable AISI 304.....	62
Tabla 8. Propiedades mecánicas acero inoxidable AISI 304.....	63
Tabla 9. Composición química recubrimiento NiCrBSi(10,1% Cr)	63
Tabla 10. Composición química recubrimiento NiCrBSi(10,1% Cr)+ Al ₂ O ₃	63
Tabla 11. Componentes pistola de proyección térmica Castodyn DS 8000.....	68
Tabla 12. Parámetros de proyección térmica por llama.	70
Tabla 13. Parámetros de operación en ensayo de rozamiento	74
Tabla 14. Análisis semicuantitativo EDAX de la estequiometria del recubrimiento R ...	85
Tabla 15. Análisis semicuantitativo EDAX de la estequiometria del recubrimiento R' ...	89
Tabla 16. Perfiles de microdurezas Vickers de las muestras R y R'	92
Tabla 17. Valores de coeficiente de rozamiento de la muestra R.....	93
Tabla 18 . Valores de coeficiente de rozamiento de la muestra R'	94
Tabla 19. Parámetros que afectan a la cohesión.	103
Tabla 20. Parámetros K _{μo} , n _{μo} , K _m y n _m para R y R'.....	107
Tabla 21. Valores pérdidas energéticas por fricción para la muestra R.....	110
Tabla 22. Valores pérdidas energéticas por fricción para la muestra R'	111
Tabla 23. Valores de v medidos en m/s.....	121
Tabla 24. Presiones aparentes medidas en kg/m ²	122
Tabla 25. Valores parámetro de Hersey para la combinación de las velocidades y cargas.....	122
Tabla 26. Valores CEF para la muestra R	124
Tabla 27. Valores CEF para la muestra R'	124
Tabla 28. Composición química recubrimiento NiCrBSi(10,1% Cr)	137
Tabla 29. Composición química acero inoxidable AISI 304 (%).	138
Tabla 30. Propiedades físicas acero inoxidable AISI 304.....	138
Tabla 31. Propiedades mecánicas acero inoxidable AISI 304.....	138
Tabla 32. Coste personal.	142
Tabla 33. Coste material.....	142
Tabla 34. Coste equipos.....	143
Tabla 35. Coste total proyecto.	143

1. Memoria

Índice Memoria

1.1. Antecedentes	11
1.2. Objeto del proyecto.....	12
1.3. Estado del arte	13
1.3.1. Tribología	13
1.3.1.1. Fundamentos de la tribología.....	13
1.3.1.2 Fricción.....	14
1.3.1.3 Desgaste.....	18
1.3.1.4 Lubricación.....	31
1.3.2 Recubrimientos	46
1.3.2.1 Aleaciones base Níquel	46
1.3.3 Proyección térmica	50
1.4 Parte experimental.....	56
1.4.1 Equipos principales.....	56
1.4.1.1 Tribómetro Plint&Partners TE 79	56
1.4.2 Materiales	60
1.4.2.1 Lubricante. Aceite CUT-MAX 7-26	60
1.4.2.2 Pin base y pista de rodadura.....	61
1.4.2.3 Recubrimiento NiCrBSi-Alúmina	63
1.4.3 Procedimiento experimental	64
1.4.3.1 Preparación de las muestras.....	64
1.4.3.2 Proyección térmica	66
1.4.3.3 Desbaste y pulido.....	71
1.4.3.4 Ensayo de rozamiento en medio lubricado	73
1.4.3.5 Ensayo de microdureza.....	76
1.4.3.6 Análisis de la microestructura	80
1.5 Resultados.....	82
1.5.1 Caracterización de la microestructura.....	82
1.5.1.1 Caracterización de la microestructura, muestra R	82
1.5.1.2 Caracterización de la microestructura, muestra R'	86
1.5.2 Análisis de durezas	92
1.5.3 Ensayo de rozamiento en medios lubricados.	93

1.5.3.1	Influencia de la velocidad	94
1.5.3.2	Influencia de la carga	97
1.5.4	Modelización del comportamiento tribológico. Curva de Stribeck	100
1.5.5	Análisis de pérdidas energéticas.....	110
1.6	Conclusiones.....	114
1.7	Bibliografía	117

1.1. Antecedentes

La tribología es un campo que tiene un alto impacto sobre la economía mundial ya que más de un tercio de la energía que se genera se pierde como consecuencia de la fricción. La gran mayoría de las máquinas tienen componentes en movimiento en donde se dan fuerzas de fricción debido al contacto de los elementos entre sí, lo que se traduce en pérdidas de energía y desgaste de los elementos. Además, la mayor causa de perdida de rendimiento mecánico y pérdida de material es el desgaste, que está causado por el rozamiento. Reduciendo el rozamiento podría significar grandes ahorros en materiales y energía perdida.

En la actualidad, la industria demanda, cada vez más, materiales de mayor resistencia y características más exigentes que les permitan ser usados en aplicaciones cuyas condiciones operativas son más severas como, por ejemplo, ambientes corrosivos o temperaturas elevadas. Por otra parte, es de gran interés para la industria obtener materiales que permitan reducir el consumo energético de las máquinas, de forma que se incrementaría el rendimiento dichas máquinas, suponiendo grandes ahorros de dinero.

Una vía de obtener materiales con propiedades que satisfagan los requerimientos de la industria anteriormente citados, es la aplicación de tratamientos superficiales que modifiquen las propiedades superficiales de los materiales. Los tratamientos superficiales permiten mejorar las propiedades mecánicas, mejorar la resistencia al desgaste, a la corrosión y a la oxidación, confieren aislamiento eléctrico y térmico y más mejoras. Dentro de los tratamientos superficiales se encuentran los recubrimientos, que permiten modificar las superficies de los materiales, confiriéndoles a estas mejores propiedades, sin cambiar las propiedades internas de los elementos. En este trabajo nos centraremos concretamente en los recubrimientos de NiCrBSi. Estos recubrimientos poseen una combinación única de propiedades que les permite ser utilizados en una variedad de aplicaciones de propósito especial. Poseen una gran resistencia al desgaste adhesivo, desgaste abrasivo y a la corrosión a temperatura ambiente y a altas temperaturas.

1.2. Objeto del proyecto

En el presente proyecto se va a modificar la composición de un recubrimiento de NiCrBSi para mejorar el comportamiento tribológico, así como disminuir el consumo energético de los pares rozantes que poseen elementos que han sido rociados con este recubrimiento modificado. Para ello, se añadirá alúmina micrométrica en un recubrimiento comercial de NiCrBSi (10%Cr) en una proporción del 10% del peso total del recubrimiento de forma que se analizará el efecto que tiene la incorporación de la alúmina sobre los dos aspectos anteriormente citados, el comportamiento tribológico y el consumo energético por fricción.

Por una parte, se estudiará como ha afectado la alúmina en el comportamiento tribológico de superficies en contacto con movimiento relativo entre sí, por lo que se analizará la variación del coeficiente de rozamiento en dos pares rozantes, uno con el recubrimiento NiCrBSi comercial y otro con el de NiCrBSi+alúmina. La mejora del comportamiento tribológico se refleja en una disminución del rozamiento de los elementos en contacto, lo que permite prolongar la vida de las piezas al reducir el desgaste de estos. Con estos datos se llevará a cabo la modelización de la curva de Stribeck de cada uno de los pares rozantes, lo que permite definir el comportamiento tribológico de dichos pares rozantes y así poder identificar las mejoras que produce la modificación del recubrimiento. Un mejor comportamiento tribológico implica obtener elementos con mayor vida útil y de menor mantenimiento.

Además, con el fin de relacionar el comportamiento tribológico de las muestras analizadas con la composición de sus recubrimientos se realizará un análisis de la microestructura de los recubrimientos. Analizar la microestructura de ambos recubrimientos permite la identificación de las fases formadas en la microestructura, tamaño, morfología, distribución de precipitados duros sobre la matriz blanda de Ni-Cr y concentración de los constituyentes de las fases formadas. De esta forma será posible comprender los valores de dureza y rozamiento de los recubrimientos, relacionándolos con la microestructura de cada muestra.

Por otra parte se ha llevado un estudio de consumo energético para analizar la influencia de la incorporación de la alúmina sobre este parámetro. Menores pérdidas por fricción supone obtener máquinas más eficientes y de menor impacto medioambiental.

1.3. Estado del arte

1.3.1. Tribología

1.3.1.1. Fundamentos de la tribología

La tribología es la ciencia que estudia el rozamiento, desgaste y lubricación de superficies en contacto con movimiento relativo entre sí. Aunque tradicionalmente, lo más típico dentro del campo de la tribología ha sido el estudio de elementos mecánicos tales como los rodamientos, engranajes, cojinetes..., sin embargo, esta ciencia abarca todas aquellas situaciones en la que se da una interacción entre dos o más elementos, que pueden ser de diferentes materiales o estar en diferentes estados. Visto desde un punto de vista riguroso, la tribología abarca cada simple movimiento que se produce en el universo, desde el andar de las personas hasta el funcionamiento de un cohete espacial.

La tribología es un campo que tiene un alto impacto sobre la economía ya que alrededor de un tercio de los flujos energéticos necesitan superar la energía de fricción de alguna forma. Además, la mayor causa de perdida de rendimiento mecánico y pérdida de material es el desgaste. Al mismo tiempo, el desgaste está causado por el rozamiento. Reduciendo el rozamiento podría significar grandes ahorros en materiales, así como, se reduciría la energía perdida por rozamiento. Una correcta lubricación se traduciría en un sistema de control que permitiría reducir el rozamiento y consecuentemente el desgaste [1].

Todas las superficies, por tan lisas que sean, presentan una rugosidad superficial, que muchas veces es imperceptible a simple vista, pero observable por medio de microscopía. Cuando dos superficies entran en contacto, los picos de rugosidad de las superficies chocan entre sí, produciéndose la fricción y según las condiciones en las que se producen dicho contacto puede producirse desgaste en dichas superficies. En la mayoría de los casos, el reducir dicha interacción entre las asperezas de las superficies es el objetivo de la tribología, por ejemplo en uniones de pares rozantes como puede ser un rodamiento, engranajes o cojinetes. Mediante una correcta lubricación de las superficies en contacto se puede conseguir una separación entre estas al existir una capa de lubricante que las separa, o al menos que minimice el contacto entre las asperezas para disminuir el desgaste y la pérdida energética lo máximo posible. Sin embargo, existen casos en los que el contacto o desgaste entre superficies es un hecho deseable.

El comportamiento tribológico depende de varios factores entre los cuales destacan:

- El material de las superficies: Rugosidad, dureza, coeficiente de fricción, etc.
- Condiciones de entorno: Temperatura, humedad relativa, etc.
- Condiciones de operación: Carga, velocidad de deslizamiento, etc.
- Condiciones de lubricación: viscosidad, aditivos, etc.

Como bien se ha dicho, en la mayoría de las aplicaciones, el fin último de la tribología es el de minimizar el rozamiento entre componentes de forma que se consigue reducir el desgaste de estos. Al reducir el desgaste, la vida útil de los elementos de alarga lo que permite ahorrar en mantenimiento y en repuestos.

El ámbito de la tribología es muy amplio, pero hablando en términos industriales, esta ciencia se aplica principalmente en rodamientos, engranajes, cojinetes, uniones deslizantes, bulones, cadenas, anillos de pistones, etc. La mayoría de estos elementos están hechos diferentes metales entre los que destacan el acero inoxidable, acero aleado, etc.

La correcta aplicación de la tribología, además de que permite reducir grandes pérdidas económicas en los diferentes sectores industriales, también contribuye a la protección del medioambiente. Al mejorar la condición tribológica de los pares rozantes, se obtienen elementos más confiables y duraderos, que permiten la reducción del uso de recambios y por consiguiente fabricar menos piezas [1].

1.3.1.2 Fricción

Por muy pulidas que estén las superficies de cualquier elemento, a escala microscópica presentan una rugosidad muy elevada. Estas rugosidades son las que representan el área real de contacto que es menor al área aparente, la que se estima a simple vista. Esta área de contacto puede verse alterada por las condiciones operativas como por ejemplo la presión. A mayor presión entre las superficies aumenta el área los picos de la rugosidad se deforman, permitiendo así que más proporción de superficie entre en contacto con lo que aumenta el área real de contacto [2].

Cuando dos superficies entran en contacto, entre ellas aparecen fuerzas tangenciales debido a la aparición de fuerzas normales como resultado de dicho contacto. Estas fuerzas se oponen al movimiento relativo entre dichas superficies. Se pueden distinguir dos situaciones en el movimiento entre superficies: cuando la fuerza de rozamiento es mayor a la fuerza que provoca el movimiento entre superficies, no

habrá movimiento relativo entre estas y esta es la condición del rozamiento estático. Mientras que si la fuerza que provoca el desplazamiento entre superficies es superior a la fuerza del rozamiento, se estaría dando la condición del rozamiento dinámico.

La fuerza de rozamiento estática siempre es superior a la dinámica y alcanza su valor máximo cuando la fuerza de deslizamiento la iguala. Cuando la fuerza de deslizamiento supera a la fuerza de rozamiento estática, esta última empieza a decrecer hasta llegar a un valor estable. Como más tarde se detallará, este suceso se debe a la interacción que se produce entre las asperezas de las superficies que están en contacto [1].

La fuerza de rozamiento es directamente proporcional a la fuerza de deslizamiento, aunque no haya movimiento, y el coeficiente de rozamiento. El coeficiente de rozamiento es un coeficiente adimensional y depende de cada material, del acabado superficial de las superficies en contacto, temperatura y demás factores, por lo que nos es una propiedad intrínseca de cada material. La fuerza de deslizamiento y el coeficiente de rozamiento se relacionan de la siguiente forma:

$$F_r = F * \mu_r \quad (1)$$

Donde F_r es la fuerza de rozamiento, F es la fuerza de deslizamiento y μ_r el coeficiente de rozamiento.

Leyes clásicas del rozamiento

Históricamente, la búsqueda de leyes con el fin de definir el concepto de rozamiento fue comenzada por Da Vinci, pero no tuvo una gran repercusión. Años más tarde, en Guillaume Amontons realizó un estudio sobre deslizamiento seco entre dos superficies planas [3]. El resultado de dicho estudio fueron las siguientes conclusiones:

- La fuerza de rozamiento se opone al movimiento de un bloque que desliza sobre un plano.
- La fuerza de rozamiento es proporcional a la fuerza normal ejercida por el plano sobre el bloque.
- La fuerza de rozamiento no depende del área aparente de contacto.

Charles-Augustin de Coulomb añadiría también lo siguiente:

- Una vez empezado el movimiento, la fuerza de rozamiento es independiente de la velocidad.

Estas conclusiones dan lugar a las tres leyes del rozamiento [3]:

1. La fuerza de fricción es directamente proporcional a la carga aplicada.
(Primera ley de Amonton)
2. La fuerza de fricción es independiente del área aparente de contacto.
(Segunda ley de Amonton)
3. La fricción cinética es independiente de la velocidad de deslizamiento. (Ley de Coulomb)

Cabe destacar, que el comportamiento tribológico cambia mucho en las diferentes situaciones de un determinado sistema tribológico. Muchas de las generalidades anteriormente citadas, no son siempre aplicables, ya que el valor de los parámetros de los que depende el comportamiento tribológico puede adoptar valores en los que no se cumplen las leyes clásicas de la fricción.

Como ya se ha mencionado, el rozamiento puede ser estático o dinámico.

Rozamiento estático

Cuando dos superficies entran en contacto pero sin movimiento relativo entre sí, los picos y los valles de la rugosidad superficial de las caras en contacto tienden a incrustarse. De esta forma se forma un enlace a nivel microscópico entre las dos superficies. Por ello, cuando aparece una fuerza que pretende provocar el deslizamiento entre los elementos, aparece una fuerza opuesta debido a la incrustación de las superficies, que evita que las superficies se separan produciendo un efecto gancho. En esta situación, el coeficiente de rozamiento presenta su mayor valor, que va aumentando conforme la fuerza de deslizamiento aumenta, hasta el punto en el que se van a separar las superficies. La causa del aumento del coeficiente de rozamiento es el endurecimiento por deformación plástica que presenta los picos de las superficies además de las microsoldaduras entre los picos de ambos materiales, en caso de materiales dúctiles. En esta situación el coeficiente de rozamiento es conocido como coeficiente de rozamiento estático [2].

Rozamiento dinámico

Cuando el endurecimiento por deformación plástica alcanza su valor máximo, pero la fuerza de deslizamiento sigue aumentando, los picos de las asperezas se rompen, rompiéndose así el enlace entre las dos superficies, de forma que empieza a haber movimiento relativo entre las superficies. En este punto el coeficiente de rozamiento comienza a disminuir de valor, ya que las superficies ya no están incrustadas y presentan una superficie microscópicamente más lisa, y se estabiliza en un valor determinado. Este valor es conocido como coeficiente de rozamiento dinámico

En la figura 1 se puede observar como aumenta el coeficiente de fricción hasta llegar al valor del coeficiente de fricción estático μ_s y como empieza a disminuir hasta llegar al valor del coeficiente de rozamiento dinámico μ_k cuando empieza a haber movimiento relativo.

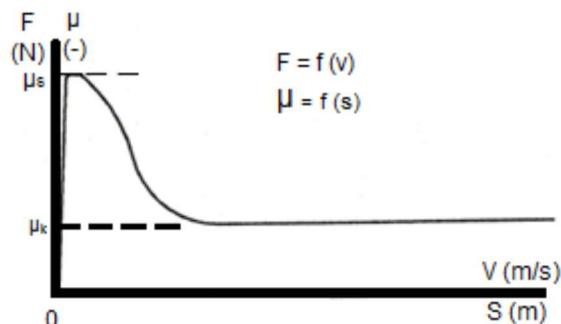


Figura 1. Evolución de la fuerza y coeficiente de rozamiento con la velocidad.

En ambas situaciones se cumple la ecuación (1), tomando el coeficiente de rozamiento en cada caso su valor correspondiente.

Coeficiente de rozamiento generalizado

Los mecanismos de fricción pueden ser descompuestos en:

- Rozamiento interferencial. Se estableció que el rozamiento se producía debido a la penetración de las ondulaciones de las superficies que estaban en contacto, de forma que el rozamiento será mayor cuanto mayor sea la rugosidad. El rozamiento interferencial tiene un coeficiente de rozamiento que puede calcularse así:

$$\mu_r = C_i * R_a^n \quad (2)$$

donde C_i es la constante de rozamiento cohesivo, R_a la rugosidad geométrica y n el exponente de rugosidad, que puede ser igual o mayor a la unidad.

- Rozamiento cohesivo. Bowden y Tabor dedujeron que en materiales dúctiles, el contacto entre superficies se producía únicamente en los picos. Esto implica que el área de contacto real sea muy pequeña y por consiguiente la presión muy elevada. Este hecho provoca soldaduras entre los puntos de contacto, es decir, microsoldaduras. Estas soldaduras se rompen y generan otras constantemente durante el deslizamiento. El rozamiento cohesivo tiene un coeficiente de rozamiento que puede calcularse así:

$$\mu_r = C_C * R_a^{-1} \quad (3)$$

donde C_C es la constante de rozamiento cohesivo y R_a la rugosidad geométrica.

Por la fórmula podemos deducir que el rozamiento cohesivo decrece con la rugosidad.

El rozamiento real es una combinación del rozamiento interferencial y cohesivo. En la Figura 2 podemos observar la evolución del coeficiente de fricción con la rugosidad superficial y además la relación de estos con los mecanismos de fricción. El coeficiente de fricción está representado por una curva en la que se suma los efectos de ambos mecanismos. El desgaste cohesivo representa una curva descendente con la rugosidad, mientras que el desgaste interferencial aumenta con la rugosidad.

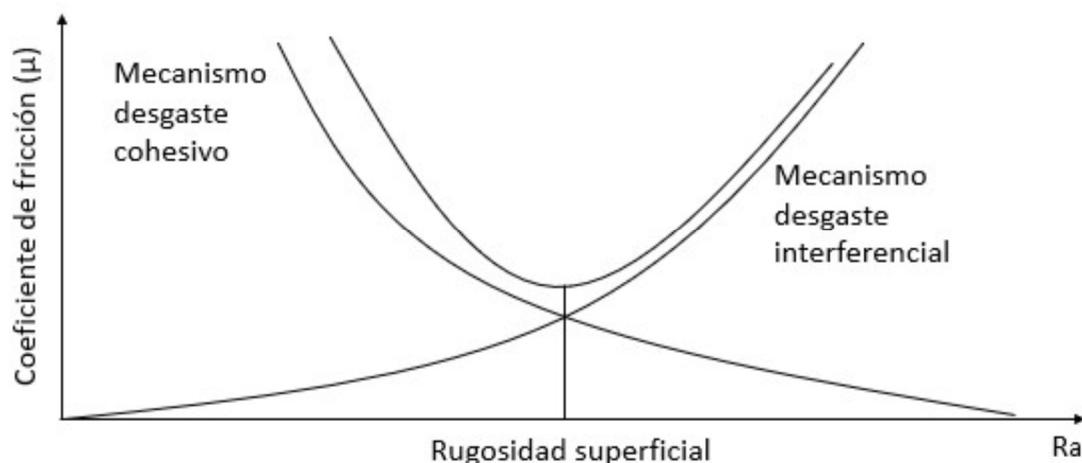


Figura 2. Rugosidad en función de los mecanismos de rozamiento

1.3.1.3 Desgaste

Como consecuencia de rozamiento entre dos superficies en contacto con movimiento relativo se produce eliminación de material de estas superficies. Como consecuencia del desgaste se producen perdidas funcionales o dimensionales que

pueden provocar la inutilización de los elementos afectados. La porción de material sustraído puede ser desprendido del contacto, lo que provocaría una pérdida de masa o bien puede ser transferido del elemento desgastado al otro en contacto con este, en cuyo caso no habría pérdida de masa. Dicha porción eliminada también podría quedar atrapada en la zona de contacto de las superficies, actuando como otro elemento de contacto en la unión tribológica. El desgaste no depende exclusivamente del rozamiento que se produce en las superficies en contacto, ya que existen interacciones de superficies en las que se generan valores de rozamiento muy elevados pero con poco desgaste y viceversa [1].

El control del desgaste resulta primordial para poder preservar la vida de los elementos de las máquinas en funcionamiento. Además de alargar la vida útil de las máquinas, también confiere de fiabilidad y disminuye el mantenimiento.

En la figura 3 podemos observar la evolución del desgaste con el tiempo de operación. Se pueden diferenciar tres etapas:

1. La primera etapa es llamada etapa de asentamiento y es la más corta. El desgaste crece rápidamente al comienzo de la fase debido a que la superficie presenta una alta rugosidad. Cuando los picos son pulidos, el desgaste decrece, presentando así el desgaste durante toda la fase un crecimiento logarítmico.
2. La segunda etapa es una etapa de crecimiento controlado y estable a una velocidad uniforme. El desgaste presenta un crecimiento lineal a lo largo de toda la etapa. Es la etapa de mayor duración.
3. Última etapa y es conocida como etapa de crecimiento descontrolado. El desgaste crece de forma exponencial acabando en el fallo.

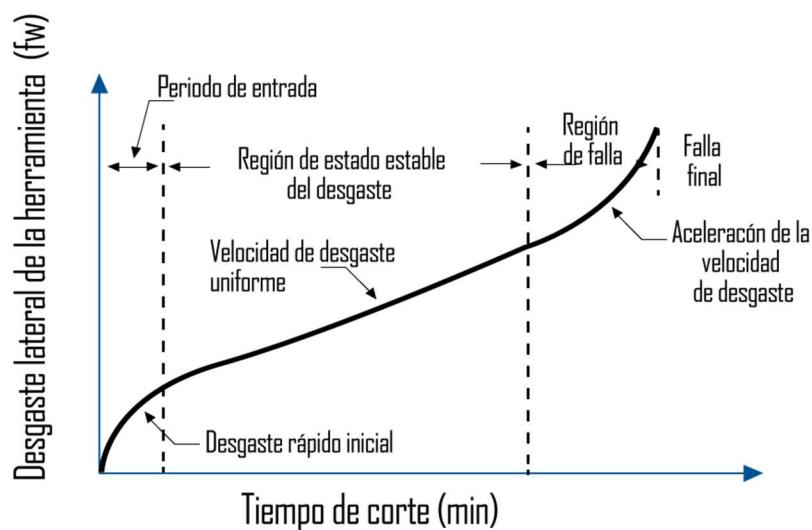


Figura 3. Etapas del desgaste

1.3.1.3.1 Tipos de desgaste

Desgaste abrasivo

Cuando existe una gran diferencia de durezas entre dos elementos en contacto entre los cuales existe movimiento relativo se tiene como resultado el desgaste abrasivo. Este tipo de desgaste se puede dar entre dos superficies de diferente dureza o cuando entre estas existe un medio abrasivo como puede ser arena, polvo, restos metálicos, etc.

Si el desgaste es producido por el contacto entre dos superficies de distintas durezas, la causa del desgaste son las protuberancias, es decir, los picos de rugosidad, que penetran entre las superficies. En el caso de la existencia de partículas abrasivas, éstas pueden provenir de restos de desgaste o de la contaminación del medio.



Figura 4. Desgaste abrasivo

Este último tipo de desgaste abrasivo puede provocar, según el tamaño de las partículas, un arañado que se traduce en surcos paralelos semejantes a un lijado o en caso de partículas pequeñas, la superficie desgastada es pulida.

En la figura 5 se muestra un modelo simplificado del volumen removido durante la acción del desgaste abrasivo, provocado por el desplazamiento de un pico con forma de cono con ángulo θ , que remueve una capa de material de profundidad h .

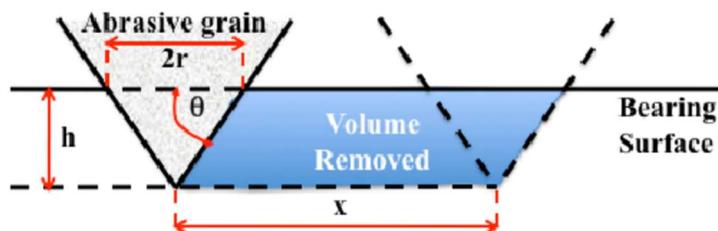


Figura 5. Modelo cálculo desgaste abrasivo

Para una longitud de deslizamiento L, el volumen de material removido se calcula con la siguiente expresión:

$$V = h^2 * \tan \theta^2 * L \quad (4)$$

Considerando que la presión en contactos con acción plástica es igual a la dureza de desgaste del material H, el área de contacto de un cono circular es igual a:

$$\pi * \frac{h}{2} * \tan \theta^2 = \frac{H}{H_v} \quad (5)$$

De esta forma, para una presión normal W, el volumen de desgaste es igual a:

$$V = \frac{2}{\pi * \tan \theta} * \frac{W * L}{H_v} \quad (6)$$

Para poder tener en consideración de los otros factores que también influyen en este tipo de desgaste como lo son la forma de contacto, la microestructura del material, la limpieza de las superficies y demás factores, se añade el factor de corrección K_{ab} a la expresión anterior. Este variable es conocida como el coeficiente de desgaste. De esta forma, el volumen desgastado se obtendría de la siguiente forma:

$$V = K_{ab} * W * \frac{L}{H} \quad (7)$$

En el desgaste abrasivo, el coeficiente de desgaste K_{ab} , depende de la ductilidad del material desgastado, de la resistencia de cizallamiento entre los contacto y de la forma de geométrica de la partícula o protuberancia abrasiva

Desgaste adhesivo

Este tipo de desgaste tiene lugar por la interacción de los picos de rugosidad entre sí de las superficies que están en contacto. En los puntos de contacto se producen presiones muy elevadas que provocan deformación plástica pudiendo provocar uniones y rupturas de las mismas, lo que provoca huecos en las superficies. Puede darse situaciones de transferencia de material entre las superficies o el desprendimiento del

material desgastado en forma de partículas que se quedan atrapadas entre la unión de las superficies. Estas partículas actúan como abrasivos que incrementan la acción de desgaste.

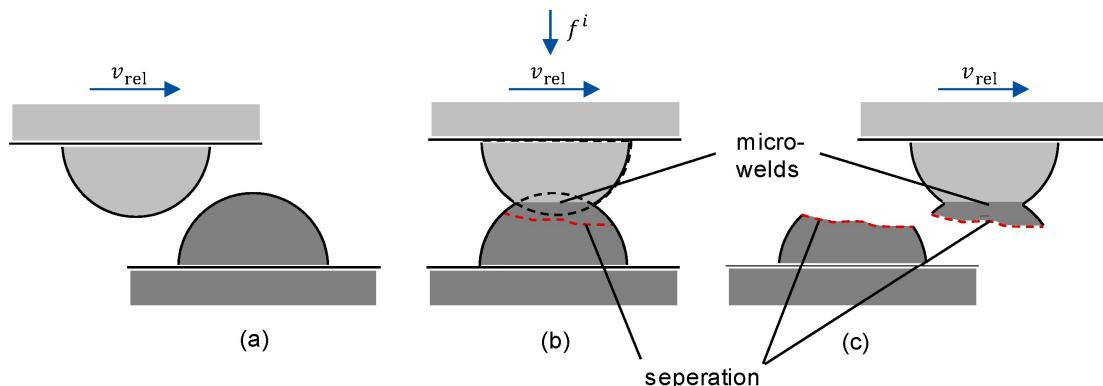


Figura 6. Ejemplo desgaste adhesivo

Diversas son las causas que provocan el desgaste adhesivo, de las cuales destacan las siguientes:

- Cargas de servicio que superan a las cargas de diseño
- Disminución de la viscosidad del lubricante debido a temperaturas de operación excesivas.
- Superficies con acabados superficiales pobres
- Altas temperaturas de contacto causadas por velocidades de deslizamiento elevadas.
- Ausencia de capa lubricante hidrodinámica debido a las bajas velocidades de operación.
- Lubricante contaminado con partículas abrasivas.
- Lubricante con viscosidad muy baja o demasiado elevada.
- Cantidad de lubricante insuficiente.
- Baja presión del aceite lubricante.

Los elementos más propensos a sufrir este tipo de desgaste son piezas como engranajes, anillos cojinete, camisas de motores, bielas y herramientas de cortes.

El cálculo del volumen provocado por este tipo de desgaste se estima asumiendo que siempre existen n puntos de contacto entre las superficies sujetas a estudio. El área de contacto se toma como un área circular de radio r y el volumen de las partículas desgastadas después de un deslizamiento de valor $2r$ es igual al volumen de media esfera, siendo esto:

$$V_{ESF} = \frac{2\pi r^3}{3} \quad (8)$$

Por lo que para un desgaste producido en n puntos a lo largo de una distancia L será igual a:

$$V = \frac{2\pi r^3}{3} * \pi * \frac{L}{2r} \quad (9)$$

Suponiendo que la presión normal en el contacto (W) se puede aproximar al valor de la dureza del material (H), el área de contacto para n puntos será igual a:

$$n - r^2 = \frac{W}{L} \quad (10)$$

Mediante estas últimas expresiones se puede representar el volumen desgastado en función de la presión de contacto W, la dureza del material H y la longitud de deslizamiento H:

$$V = \frac{1}{3} * W * \frac{L}{H} \quad (11)$$

De esta última expresión (11) se puede deducir que el volumen de material desgastado por adhesión es directamente proporcional a la presión aplicada y a la distancia de deslizamiento e inversamente proporcional a la dureza del material.

Al igual que en el caso del desgaste abrasivo, para poder tener consideración de más factores de influyen en este tipo de desgaste como lo son la forma de contacto, la microestructura del material, la limpieza de las superficies y demás factores, se añade el factor de corrección K_{ad} a la expresión anterior. Este variable es conocida como el coeficiente de desgaste. De esta forma, el volumen desgastado se obtendría de la siguiente forma:

$$V = K_{ad} * W * \frac{L}{H} \quad (12)$$

En este caso, el coeficiente de desgaste representa al volumen de material desgastado que se ve afectado por las propiedades del material y por la zona geométrica que se ve afectada por los esfuerzos cortantes y de compresión.

Desgaste por fatiga superficial

Como consecuencia de las cargas cíclicas aparece este tipo de desgaste, que aparece en forma de grietas o escamas en la superficie del material. El impacto de sólidos o líquidos, deslizamiento de estos, contactos por rodadura son las causas típicas que provocan el desgaste por fatiga superficial.

Los elementos en lo que más se muestran este desgaste suelen ser rodamientos, ruedas de ferrocarriles, engranajes, rodillos de laminación, entre otros.

Como se puede observar en la figura 7, debido a la secuencia de formación elástica/plástica, además del endurecimiento/ablandamiento causados durante la operación se produce la aparición de grietas, tanto en la superficie como en la subsuperficie, que se propagan y causan el desprendimiento de la superficie. Además de las grietas, también se forman picaduras superficiales.

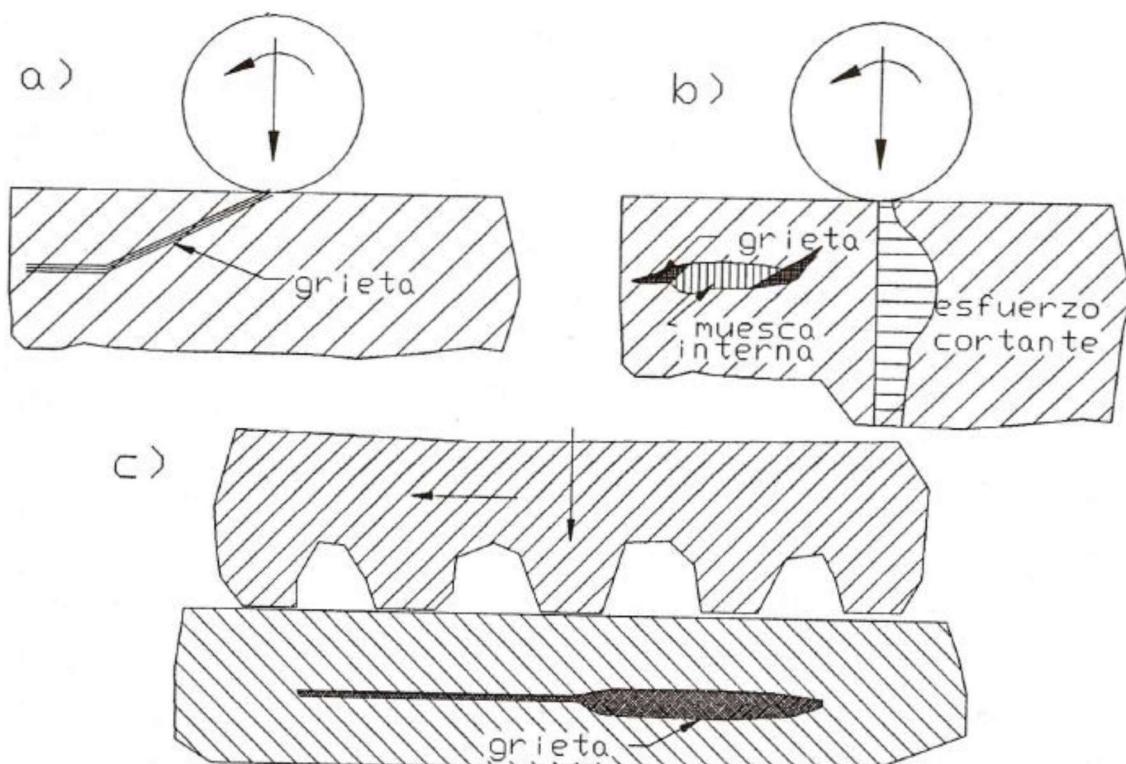


Figura 7. Mecanismos de desgaste por fatiga superficial

Desgaste por vibraciones 'Fretting'

Es un proceso de desgaste que ocurre en el área de contacto entre dos materiales sujetos a una carga que están sujetos a un movimiento relativo preciso mediante vibración o alguna otra fuerza oscilatoria. Este tipo de desgaste daña significativamente la calidad de la capa de la superficie, lo que resulta en una mayor rugosidad de la superficie y picaduras microscópicas, lo que reduce la resistencia a fatiga de los elementos.

El fretting es una combinación de desgaste abrasivo y adhesivo, donde se producen uniones adhesivas bajo carga normal aplicada, mientras que el movimiento oscilante provoca el desprendimiento del material en forma de partículas.

El fretting suele venir acompañado del desgaste por corrosión. Cuando se rompe la capa de lubricación, las superficies de los materiales, altamente reactivos entre sí, entran en contacto. Debido al continuo movimiento, las partículas desprendidas actúan como abrasivos incrementando así el desgaste, además de oxidarse entre ellas. Finalmente, debido a las cargas repetidas y los esfuerzos tangenciales, se produce una grieta por fatiga en el área de fricción y avanza hacia el interior.

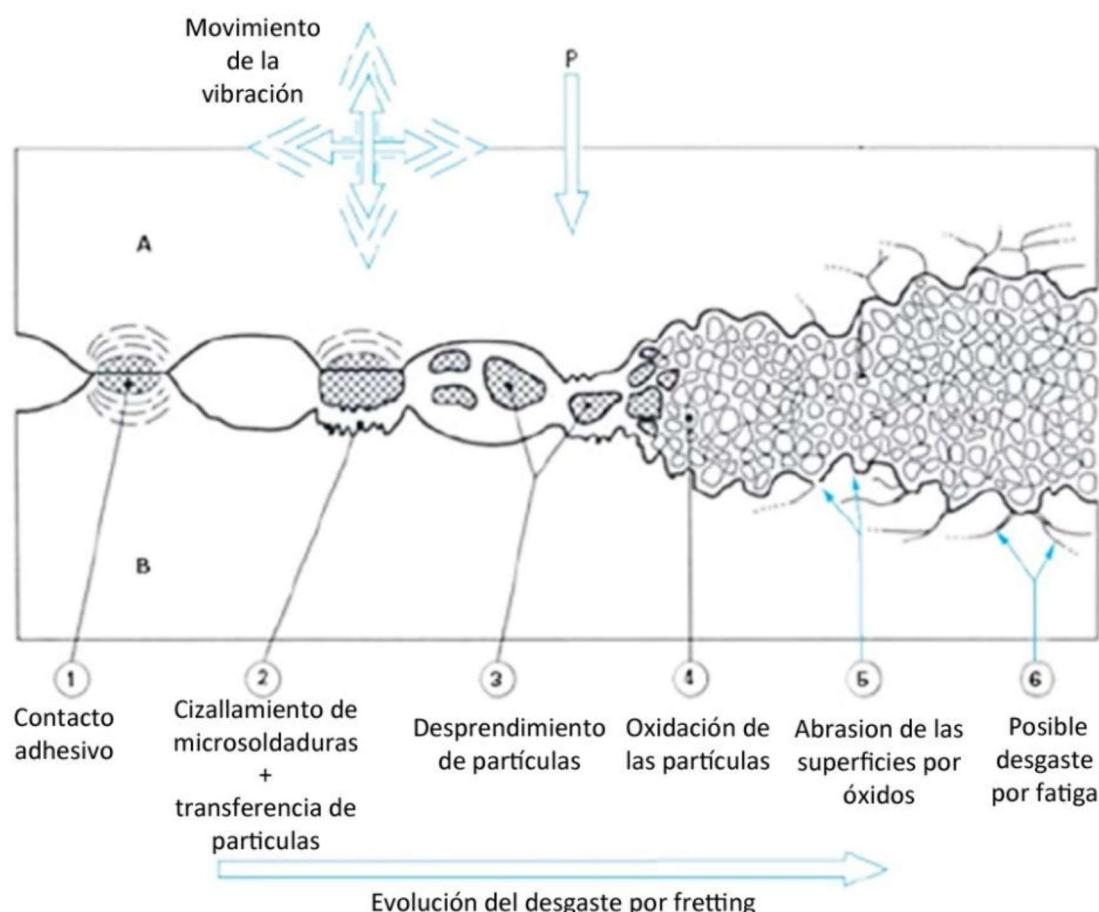


Figura 8. Fases del desgaste por fretting con corrosión.

Desgaste corrosivo

Debido a la reactividad del ambiente o de la capa lubricante con los elementos en contacto, pueden suceder reacciones químicas entre estos que provocan la aparición de óxido en la capa superficial de los elementos, que son eliminados por acciones de rozamiento causando así el desgaste.

Los elementos que son más propensos a sufrir este tipo de desgaste son las uniones remachadas, muelas, cadenas, etc.

En la figura 9 se pueden observar un ejemplo de las fases en las que se produce el desgaste por corrosión.

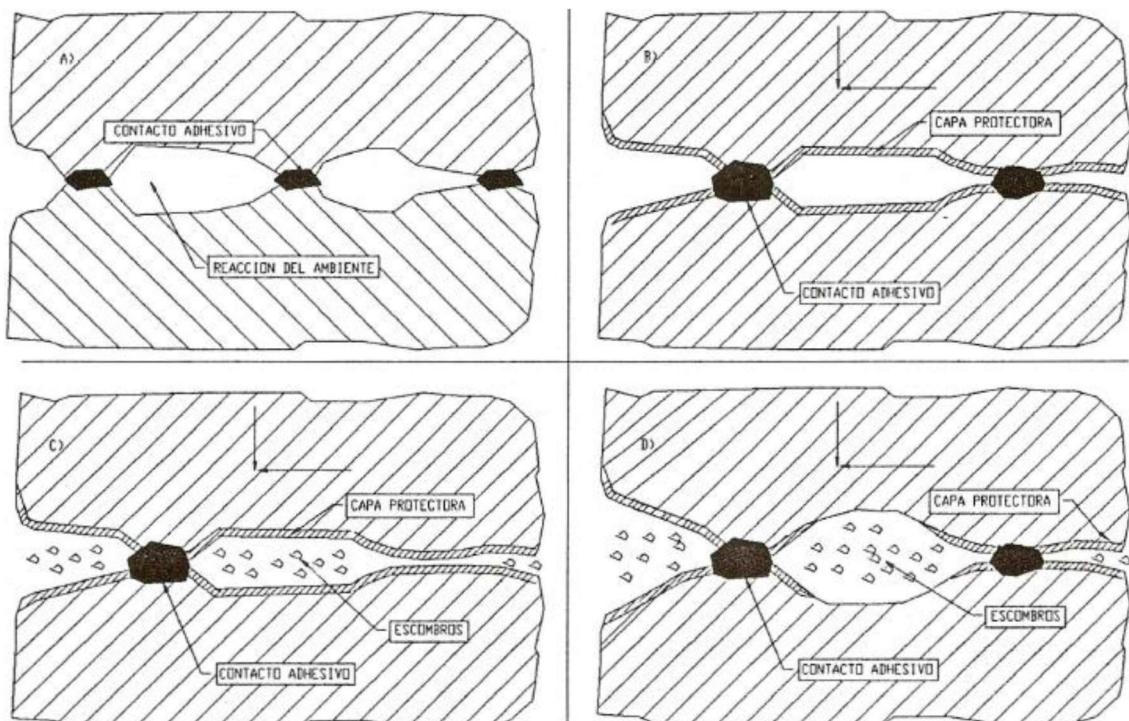


Figura 9. Fases del desgaste por corrosión.

Desgaste por erosión

Cuando un fluido que contiene en suspensión partículas abrasivas entra en contacto con una superficie, esta queda desbastada por la acción de las partículas abrasivas que provocan la aparición de impactos e hendiduras en la superficie afectada. Si las partículas se mueven de forma tangencial a la superficie que erosiona, el desgaste por erosión es abrasivo, mientras que si las partículas inciden perpendicularmente a la superficie, el desgaste por erosión es de bajo impacto.

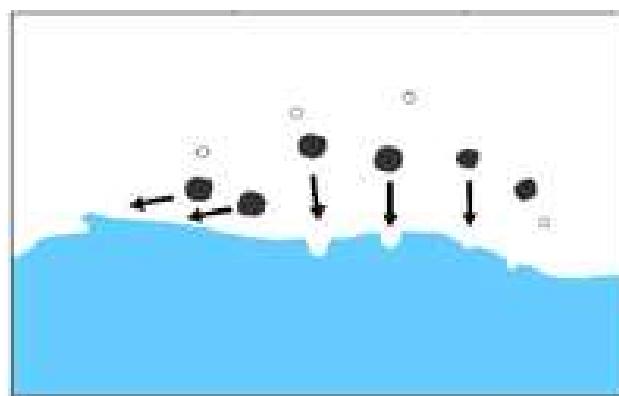


Figura 10. Desgaste por erosión.

Existe un caso particular tipo del desgaste por erosión que es conocido como desgaste por cavitación. Cuando el fluido que se encuentra en contacto con las superficies afectadas se encuentra a baja presión, debido a las condiciones de operación el fluido puede entrar en cavitación. Al implosionar, las burbujas generan ondas expansivas que provocan la debilitación de las superficies afectadas y la erosión de estas.

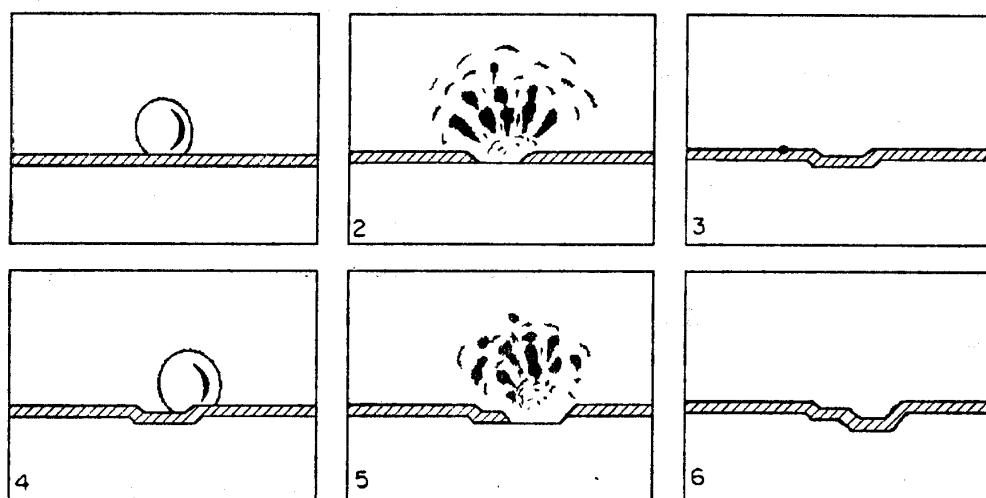


Figura 11. Desgaste por cavitación.

Los elementos más propensos a sufrir el desgaste por cavitación son las hélices de bombas, circuitos de refrigeración o de aceite.

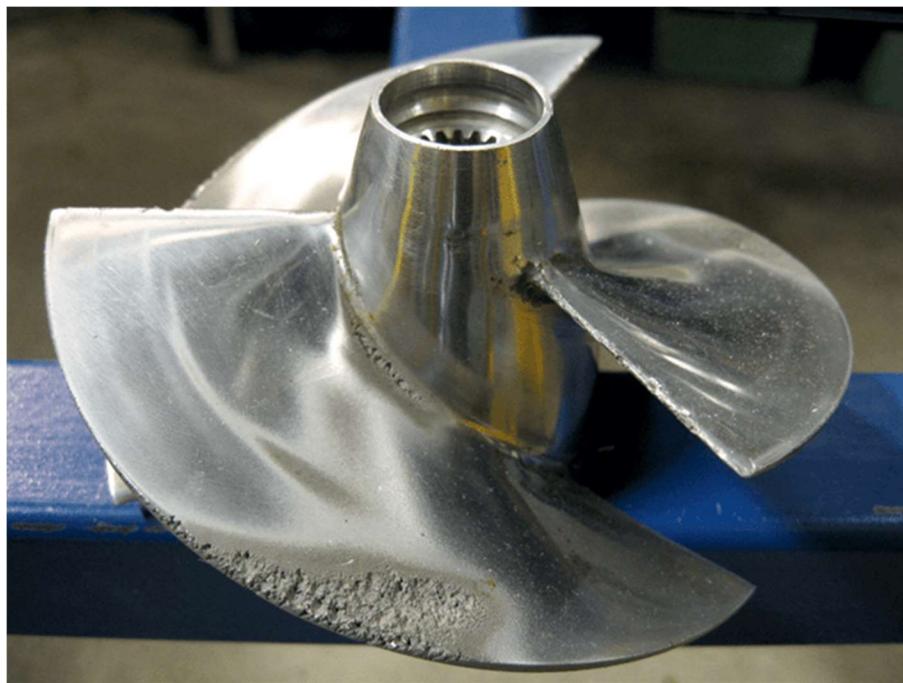


Figura 12. Hélice de bomba con desgaste por cavitación.

En la figura 12 se puede observar como la cavitación ha provocado el desgaste de las puntas de una hélice.

Desgaste Interferencial

Al poner en funcionamiento un sistema que se encuentra sometido a fricción, si las superficies no han sido preparadas a priori, se produce una pérdida de material debido a la eliminación de las crestas superficiales. Este período se conoce como rodaje. Es la parte de la vida de un elemento con mayor tasa de desgaste. Si los materiales tienen naturaleza dúctil, la mayoría de crestas se deformarán y sólo algunas se desprenderán. Por otro lado, si los materiales que entran en contacto tienen naturaleza dura, ocurrirá justo lo contrario.

1.3.1.3.2 Gasto energético por rozamiento. Pérdidas mecánicas

Además de la pérdida de material que puedan generar las fuerzas de rozamiento, otros grandes efectos que estas fuerzas tienen sobre los sistemas mecánicos son las pérdidas de energía.

Cuando los objetos intentan ponerse en movimiento o ya lo están, experimentan fuerzas tangenciales opuestas al movimiento de estos, estas son las fuerzas de rozamiento. Estas fuerzas generan pérdidas de energía ya que se oponen al movimiento de los cuerpos, por lo que si se pudieran, no eliminar por estas son necesarias para el movimiento de los cuerpos, disminuir al valor mínimo posible, supondría grandes ahorros tanto de energía como de potencia.

El gasto energético es proporcional a las fuerzas de rozamiento, que a la vez son proporcionales al coeficiente de rozamiento. Cuanto mayor sea el coeficiente de rozamiento, mas interacción habrá entre los cuerpos, por lo que mayores serán las pérdidas de energía. Estas pérdidas de energía se traducen en forma de calor como consecuencia del contacto entre los cuerpos.

Bases de cálculo energético

El coeficiente de fricción depende principalmente de tres factores:

- La lubricación y rugosidad que existe entre las superficies en contacto
- La velocidad de deslizamiento entre superficies
- La carga aplicada sobre las superficies

Uno de los objetivos de este trabajo es el de obtener un recubrimiento que permita reducir las energía perdidas por fricción, hecho que se demostrará como parte del ensayo experimental del trabajo.

El cálculo de las pérdidas energéticas se realizará sobre la probeta del ensayo. Para poder introducir la fórmula que se utilizará para estimar las pérdidas energéticas, antes es necesario explicar de forma breve el ensayo que se realiza sobre la probeta y en qué condiciones se lleva a cabo.

Con la finalidad de poder reproducir el contacto entre dos elementos con movimiento relativo, se utiliza el Tribómetro. Como se muestra en la figura 13, este equipo consta de una plato que gira de forma rotatorio y sobre este disco hay emplazado un brazo que sujetla la probeta a ensayar. La probeta se coloca a una distancia determinada del centro del disco y se aplica sobre ella una fuerza vertical determinada [4]. Además se aplicará la lubricación requerida entre el contacto y también se

determinarán las condiciones de atmósfera y humedad. Con el disco girando, el Tribómetro calcula el coeficiente de rozamiento que hay en el contacto.

Las variables que hay que tener en cuenta para el cálculo de las pérdidas energéticas son la distancia a la que está situada la probeta, es decir, el diámetro de rodadura, la velocidad de rotación de la pista respecto a la probeta y la carga aplicada sobre la probeta.

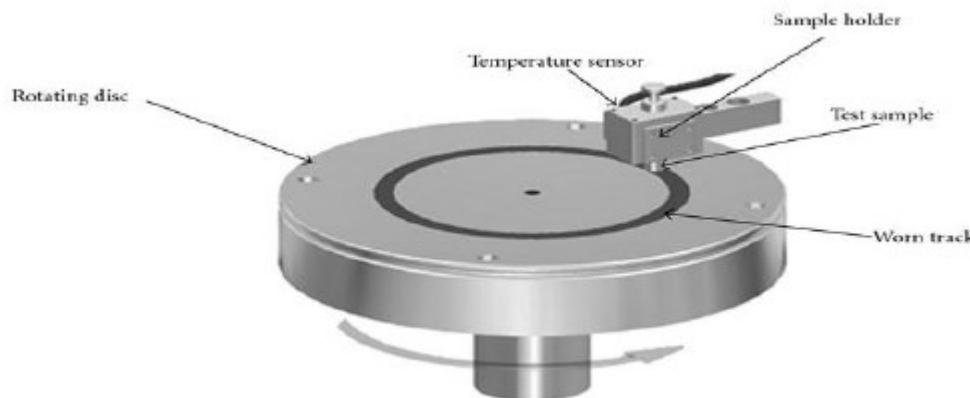


Figura 13. Tribómetro

Las pérdidas energéticas por fricción se calcularán con la siguiente expresión:

$$CEF = 0,03077 * \mu * F_N * \emptyset * N \quad (13)$$

Donde:

- μ es el coeficiente de rozamiento [\emptyset]
- F_N es la fuerza normal aplicada [kgf]
- \emptyset el diámetro de rodadura [m]
- N es la velocidad de rotación del disco [rps]

1.3.1.4 Lubricación

La lubricación es uno de los grandes bloques dentro de la ciencia de la tribología. El fin último de esta rama es el de crear una capa que sea capaz de separar las superficies de los elementos que se encuentran en contacto y que se mueven de forma relativa entre sí. La lubricación es una técnica que forma parte del mantenimiento de las máquinas. A lo largo de este apartado se presenta información sobre la lubricación extraída de [5].

Ya que la mayoría de los elementos de las máquinas se encuentran en movimiento, ya sea rodando o deslizando unos sobre otros. Si estos componentes no se encuentran bien lubricados, se verían deteriorados por el desgaste, además del consumo energético que esto supondría. Todo esto se traduciría en altos costes de reparación de las máquinas y tiempos de parada que causan una pérdida de la productividad de las fábricas.

Los entornos industriales en los que trabajan las máquinas, por la naturaleza de los trabajos que realizan las máquinas, suelen contaminarse por partículas metálicas, óxidos, silicatos y otros materiales abrasivos. En el caso de que estas partículas accedan y contaminen el espacio que existe entre dos componentes en contacto con movimiento relativo, los componentes se verían afectados sufriendo ralladuras y más defectos como consecuencia del desgaste. Un sistema de lubricación adecuado sería capaz de evitar la entrada de las partículas contaminantes, además de poder eliminarlas en caso de infiltración.

Sin embargo, la lubricación no consiste únicamente en administrar una capa que separe y proteja las superficies en contacto, si no que consiste en un proceso diseñado para seleccionar el material lubricante adecuado para una aplicación dada, en las cantidades necesarias y en los puntos de aplicación necesarios. Llevando a cabo un programa de lubricación correcto se incrementa la vida útil de los componentes afectados reduciendo así los costes de mantenimientos y las pérdidas de energía.

Las principales funciones que tiene el uso de lubricantes en la industria son los siguientes:

- Reducir la fricción y pérdida energética

Los lubricantes permiten reducir el coeficiente de rozamiento que existe entre las superficies en contacto con movimiento relativo, de forma que se reduce la fuerza de rozamiento y consecuentemente la energía que se pierde como consecuencia del rozamiento será menor.

- Reducir el desgaste

Al existir una capa que separa los elementos, los picos de rugosidad de las superficies ya no se encuentran incrustados entre sí, si no que existe una película de lubricante que se interpone al contacto. Al no haber contacto, el desgaste se ve suprimido.

- Disipar el calor

Los lubricantes también se utilizan como parte del sistema de refrigeración de los componentes. Además, la temperatura del lubricante resulta útil como indicador de la temperatura de funcionamiento de las máquinas.

- Prevención de la oxidación, corrosión y herrumbre

La capa de lubricación, al separar las superficies en contacto; evitar el contacto del metal con el agua, el aire y más agentes corrosivos; evitar la infiltración de partículas contaminantes y la eliminación de estas en caso de infiltración, consigue eliminar la mayoría de las causas de oxidación, corrosión y herrumbre.

- Prevención de la contaminación y la infiltración de partículas

La lubricación supone el sellado del espacio entre las superficies en contacto de forma que evita la entrada de partículas y demás contaminantes al interior del contacto. Además, en caso de disponer de lubricación recirculada, los contaminantes que se hayan infiltrado son eliminados por filtrado del lubricante.

- Amortiguar impacto

Cuando el lubricante atrapado en las superficies en contacto es comprimido gradualmente. Esta presión va disminuyendo a medida que el lubricante va siendo expulsado de la zona de contacto. Esto provoca que el movimiento de las superficies sea de forma más progresiva, produciendo un efecto de amortiguado entre estas.

- Amortiguar ruidos

Al suministrar lubricación a los elementos en contactos, se consigue que estos funcionen de una manera más suave evitando el contacto entre superficies, lo que elimina los ruidos causados por el rozamiento.

- Transmitir potencia

Existen sistemas de transmisión de potencia, por ejemplos los hidráulicos, que utilizan un fluido a presión como transmisor de potencia. El fluido que hace esta función suele ser un lubricante ya que sus características de prevención de la corrosión y la oxidación lo hacen ideal para ello.

1.3.1.4.1 Regímenes de lubricación. Curva de Stribeck

Como ya se ha explicado anteriormente, la lubricación consiste en proporcionar una capa separadora entre las superficies que están en contacto con movimiento relativo entre sí. Según las condiciones operativas (principalmente velocidad de deslizamiento, viscosidad del lubricante y presión) en las que se encuentre la unión tribológica, esta puede estar en diferentes estados o regímenes. Estos estados quedan representados por la curva de Stribeck.

La curva de Stribeck es una herramienta fundamental para el estudio del estado de lubricación de los fluidos ya que representa de forma global la variación del rozamiento en función de la lubricación. Como se observa en la figura 14, en la curva se pueden diferenciar tres regímenes: Lubricación seca, límite e hidrodinámica. El estado de la lubricación depende del parámetro de Hersey (H) que se obtiene mediante la siguiente expresión:

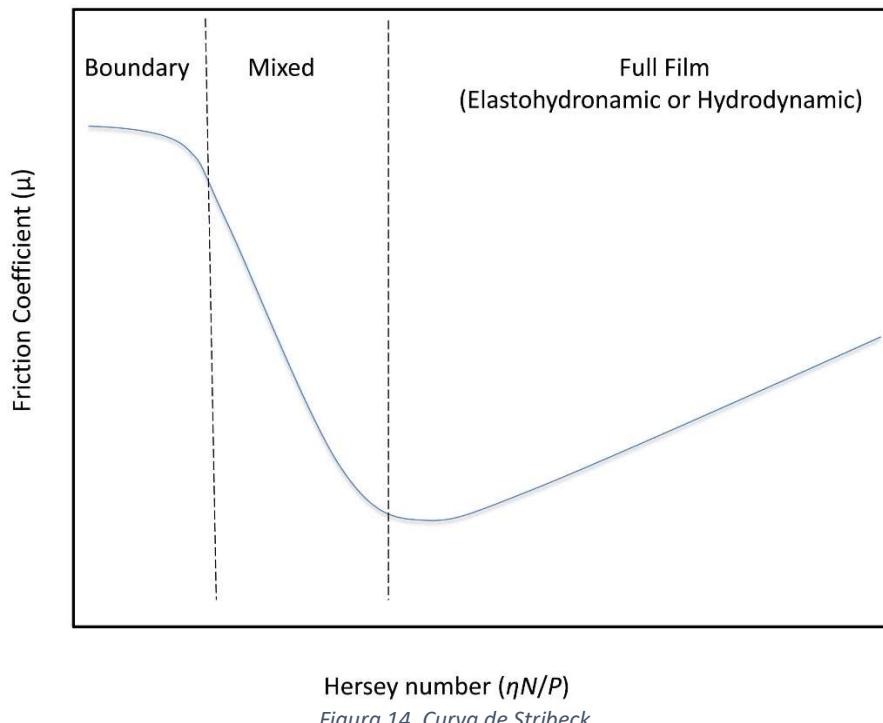
$$H = \frac{\eta * U}{P_a} \quad (14)$$

donde:

η : viscosidad dinámica, medida en $N \cdot s/m^2$.

v : velocidad, medida en m/s .

P_a : presión aparente medida en N/m^2 .



La primera zona es la llamada lubricación límite, en la que las superficies se encuentran en contacto. Como podemos observar en la curva de Stribeck, esta zona es muy horizontal, por lo que el coeficiente de rozamiento no presenta casi variación y se caracteriza por un valor del parámetro de Hersey muy bajo.

En la segunda zona, la lubricación mixta, las superficies no se encuentran totalmente separados, pero únicamente contacto en ciertos puntos, principalmente en los picos de rugosidad. En esta zona el coeficiente de rozamiento varía mucho con la variación del parámetro de Hersey. A mayor valor de dicho parámetro, es decir, a mayor velocidad de deslizamiento o viscosidad y menor presión, menor será el coeficiente de rozamiento.

La tercera zona, conocida como lubricación hidrodinámica, presenta una capa de lubricante que es capaz de aislar de las superficies de sí. Se caracteriza por valores altos del parámetro de Hersey.

A continuación se explicarán las características de los diferentes regímenes de lubricación con mayor nivel de detalle.

Lubricación límite

Cuando la velocidad de deslizamiento entre las superficies es demasiado baja y se ejercen altas presiones entre estas, el lubricante no es capaz de embeber toda el área de contacto para separar las superficies, generándose así altos valores de fricción. Generalmente, el lubrificante únicamente se encuentra en las zonas de rugosidad valle, mientras que las zonas de alta rugosidad estarán en contacto (Fig. 15). Las situaciones de lubricación límite suelen presentarse durante el arranque y la parada de las máquinas o cuando las temperaturas son elevadas, debido a la disminución de la viscosidad. La lubricación tiene como consecuencia la aparición de microsoldaduras que se rompen y regeneran debido al movimiento, lo que causa el deterioro del material.

Diversas son las causas que pueden propiciar la aparición de la lubricación límite, de las que destacan las siguientes:

- Baja velocidad relativa entre superficies
- Área de contacto insuficiente
- Carga de operación excesiva
- Incremento de la temperatura
- Cantidad de lubricante insuficiente

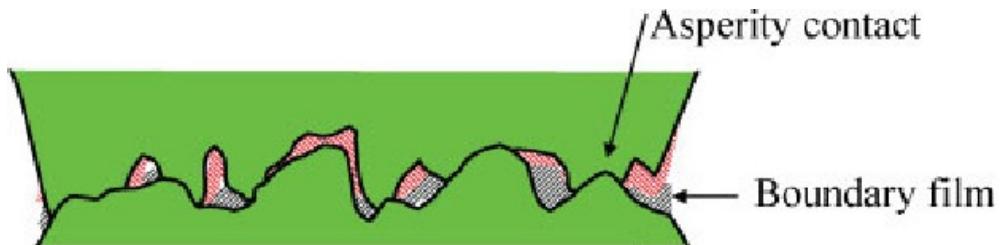


Figura 15. Régimen de lubricación límite: ausencia de capa de lubricante continua.

Lubricación mixta

Al igual que en la lubricación límite, existe contacto entre las superficies, pero este solo ocurre donde la rugosidad superficial es máxima, es decir, en los picos de rugosidad. En el resto de la unión el lubricante es capaz de formar una película que mantiene separadas las superficies (Fig. 16). Por ello el estado de lubricación se dice que es una mezcla entre la lubricación límite y la lubricación hidrodinámica, que se verá más tarde. Este estado depende principalmente pero los variables del parámetro de Hersey, la velocidad, la viscosidad y la presión.

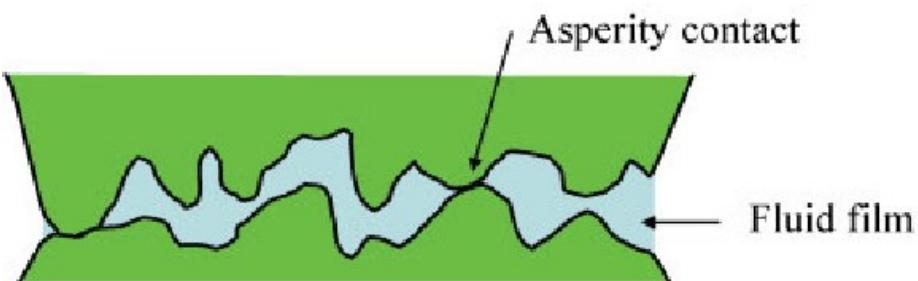


Figura 16. Régimen de lubricación mixta. Capa de lubricante parcialmente continua.

Lubricación hidrodinámica

Cuando se dan las adecuadas condiciones de velocidad de deslizamiento, viscosidad del lubricante y presión aplicada, el lubricante es capaz de crear una capa entre las superficies que las separa e impide que estas entren en contacto (Fig. 17). Como consecuencia de esto, la fricción que se produce en la unión es casi inexistente, y lo mismo pasa con el desgaste. Normalmente este estado se produce cuando la velocidad de deslizamiento es de valor elevado. Este estado es el más óptimo entre los tres vistos, ya que se reduce el rozamiento al mínimo, de forma que se protegen las superficies de los elementos, alargando así la vida útil de la máquina y además se minimiza la energía disipada por fricción.

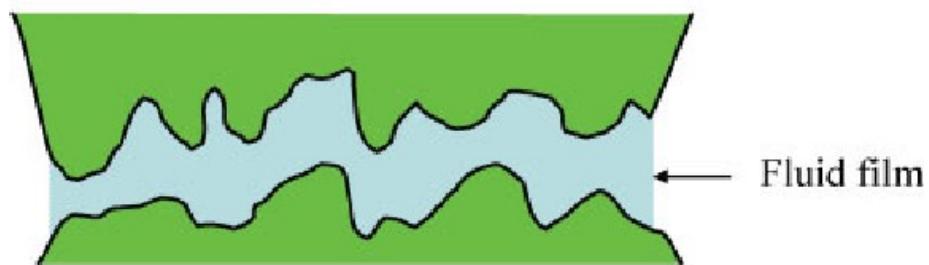


Figura 17. Régimen de lubricación hidrodinámico. Capa de lubricante continua y separación total de las superficies.

Lubricación elastohidrodinámica

Este estado es un caso especial que se encuentra dentro de la lubricación hidrodinámica y suele aparecer cuando los elementos en contacto tienen movimiento de rotación. Debido a la naturaleza del movimiento, el lubricante es expulsado de la zona de contacto, disminuyéndose así la película de lubricante. Sin embargo, esto provoca que la presión que tiene que aguantar el lubricante aumenta mucho, lo que provoca, debido a la naturaleza polimérica de los lubricantes, el aumento de la viscosidad del lubricante. De esta forma el lubricante es capaz de mantener una capa que separa las superficies evitando así el contacto metal-metal entre las superficies. La capa de lubricante presenta su espesor mínimo en este estado (Fig. 18).

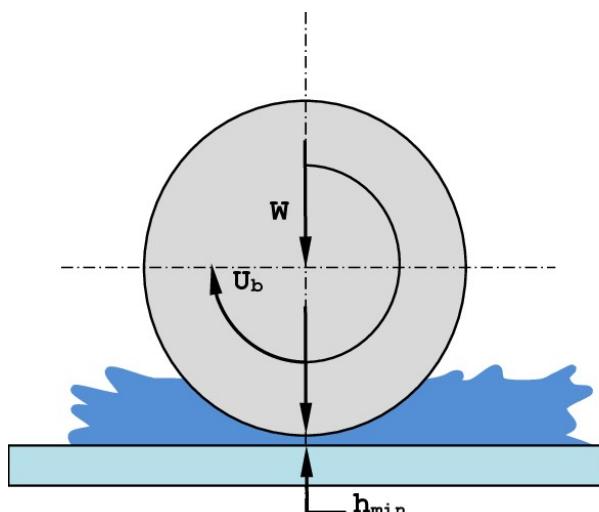


Figura 18. Capa de lubricante continua como fenómeno de la lubricación elastohidrodinámica.

Lubricación hidrostática

Esta circunstancia se da cuando el lubricante es suministrado a presión para soportar la carga entre las superficies, aun cuando no haya velocidad relativa entre el contacto. Es especialmente útil durante el arranque, cuando la velocidad relativa es muy baja. También es útil para evacuar las altas temperaturas en el contacto, ya que el lubricante es recirculado.

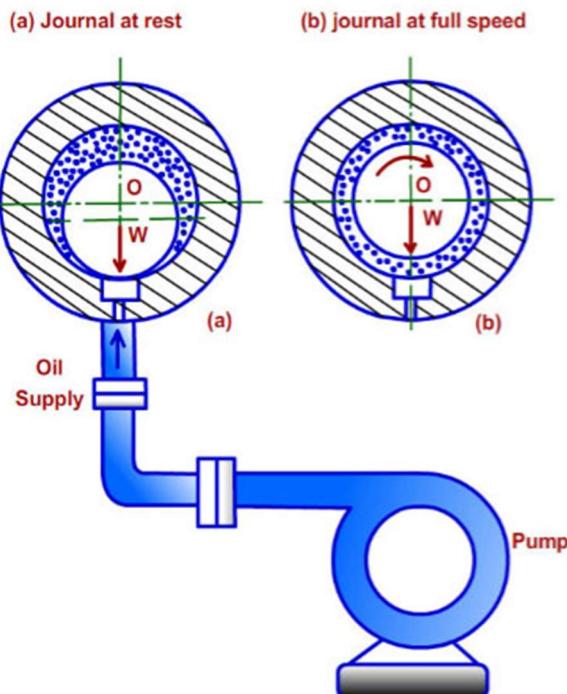


Figura 19. Aplicación de la lubricación hidrostática

En la figura 19 se muestra un ejemplo de la aplicación de la lubricación hidrostática. Cuando la velocidad es muy baja, como por ejemplo durante el arranque, el eje carece de velocidad por lo que el lubricante no es capaz de formar una lámina sustentadora. Por ello, se usa una bomba que suministra lubricante a presión garantizado así la existencia de una película que separa las superficies. Cuando se alcanzan velocidades de operación elevadas, el lubricante ya es capaz de formar la película por sí mismo, por lo que se desconecta el sistema de lubricación hidrostática.

1.3.1.4.2 Propiedades de los lubricantes

A continuación se citan las principales propiedades de los lubricantes:

Viscosidad dinámica

También llamada viscosidad absoluta, es una medida de la oposición que ejerce el lubricante a fluir. Es definido como el cociente entre la tensión tangencial y la velocidad relativa alcanzada por unidad de espesor de película de lubricante. Cuanta mayor viscosidad que posee un fluido, más lento será el flujo de este. En el SI, la viscosidad dinámica se mide en Pa·s, sin embargo, comúnmente se expresa en centiPoise (cP) Matemáticamente, la viscosidad dinámica se obtiene con la fórmula (16):

$$\eta = \frac{\tau}{\frac{\delta u}{\delta y}} \quad (15)$$

donde:

τ es la tensión tangencial
 y es la dirección normal al movimiento

La viscosidad es una propiedad que depende estrechamente de la temperatura y en menor medida de la presión a la que se encuentre el aceite. A medida que va incrementando la presión ejercida por un aceite, la viscosidad de este también aumenta. Sin embargo, para presiones cercanas a la atmosférica las variaciones son casi insignificantes.

Por otra parte, la viscosidad es inversamente proporcional a la variación de la temperatura, por lo que cuanto mayor sea la temperatura, menor será la viscosidad y viceversa. Esto es un factor importante a tener en cuenta a la hora de seleccionar lubricantes, gran parte de las aplicaciones de los lubricantes, estos estarán a altas temperaturas.

Para poder la variación de la viscosidad con la variación de la temperatura se desarrolló el índice de viscosidad (IV). Este parámetro se obtiene comparando la viscosidad entre dos aceites patrón, uno con gran variación de la viscosidad con la temperatura y de naturaleza asfáltica al que se le asigna un IV de 0 y otro con muy poca variación de la viscosidad con la temperatura y de naturaleza parafínica al que se le asigna un IV de 100. La viscosidad de ambos aceite a 100°C es la misma. De este modo se determinan las viscosidades de ambos aceites a 40°C y a 100°C.

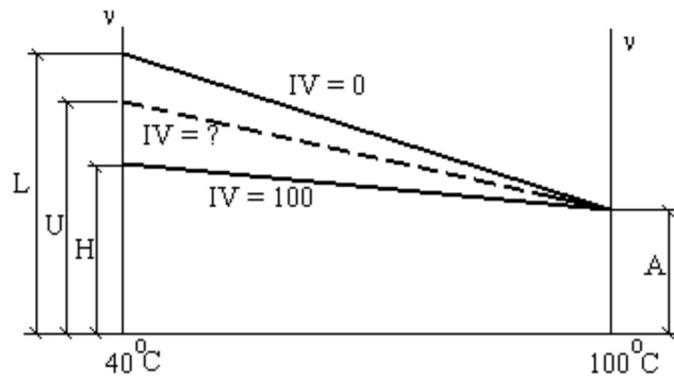


Figura 20. Variación de la viscosidad con respecto la temperatura para aceites con diferentes IV.

En la figura 20 se muestra la representación del cálculo del IV de donde: A es la viscosidad de los aceites a 100°C , H la viscosidad a 40°C del aceite cuyo $\text{IV}=100$, L es la viscosidad a 40°C cuyo IV es 0 y U es la viscosidad a 40°C del aceite cuyo índice de viscosidad se desconoce.

Para calcular el índice de viscosidad de un aceite lubricante se utiliza la expresión (16):

$$\text{IV} = \frac{L-U}{L-H} * 100 \quad (16)$$

En general, las situaciones de trabajo que requieren de un aceite con un IV alto son:

- Cuando se desconoce el valor óptimo de viscosidad
- Cuando se trabaja con condiciones de carga y velocidad variables
- Si existen fluctuaciones de temperatura
- En caso de querer necesitar aumentar la vida útil del aceite o de la máquina
- Si se necesita aumentar la eficiencia energética

Por otra parte, se hará uso de aceites con IV bajos en las siguientes situaciones:

- Cuando se conoce el valor óptimo de viscosidad
- Cuando se opera con condiciones de carga y velocidad constantes
- Cuando la temperatura es estable

Viscosidad cinemática

Es la relación entre la viscosidad dinámica y la densidad de un aceite, ambos medidos a mismas condiciones de temperatura. En el SI se mide en m^2/s , sin embargo la unidad principal unidad que se usa para medir la viscosidad cinemática es el centiStoke (cSt).

Se han elaborado diferentes escalas para poder identificar a los lubricantes según su viscosidad cinemática, de las cuales destacan la escala SAE y la escala VG.

La escala SAE fue definida por la Society of Automotive Engineers (SAE) para clasificar los aceites lubricantes usados en la automoción. Esta escala asigna un mismo número SAE para distintos rangos de viscosidades cinemáticas, de forma que la escala SAE no identifica de forma precisa la viscosidad de un lubricante con un número SAE, sino que lo identifica como perteneciente a un determinado rango de viscosidades. También existen los aceites multigrado, que sirven para trabajar a diferentes valores de temperatura. Estos aceites lubricantes se clasifican por dos números SAE. El primero es indicativo del rango de viscosidades del aceite a una temperatura de -18°C y el segundo es indicativo del rango de viscosidades del aceite a $98,9^\circ\text{C}$. El primer número SAE esta sucedido por una W. Un ejemplo de número SAE para un aceite multigrado sería el SAE 20W40.

Por otro parte, la escala ISO VG es parecida a la escala SAE pero se aplica a aceites industriales. En la tabla 1 se muestra el rango de viscosidades cinemáticas de esta escala.

ISO Viscosity Grade	Midpoint Kinematic Viscosity mm^2/s at 40°C (104°F)	Kinematic Viscosity Limit mm^2/s at 40°C (104°F) Minimum	Kinematic Viscosity Limit mm^2/s at 40°C (104°F) Maximum
ISO VG 2	2.2	1.98	2.42
ISO VG 3	3.2	2.88	3.52
ISO VG 5	4.6	4.14	5.06
ISO VG 7	6.8	6.12	7.46
ISO VG 10	10	9.00	11.0
ISO VG 15	15	13.5	16.5
ISO VG 22	22	19.8	24.2
ISO VG 32	32	29.8	35.2
ISO VG 46	46	41.4	50.6
ISO VG 68	68	61.2	74.8
ISO VG 100	100	90.0	110
ISO VG 150	150	135	165
ISO VG 220	220	198	242
ISO VG 320	320	288	352
ISO VG 460	460	414	506
ISO VG 680	680	612	748
ISO VG 1000	1000	900	1100
ISO VG 1500	1500	1350	1650
ISO VG 2200	2200	1980	2420
ISO VG 3200	3200	2880	3520

Tabla 1. Clasificación de lubricantes según escala ISO VG

Punto de inflamación

Es la temperatura a partir de la cual puede aparecer una llamarada por unos momentos sobre la superficie del lubricante como consecuencia de una chispa, lo que permite conocer la volatilidad del aceite e consecuentemente cuantificar el consumo que se produce de aceite durante el funcionamiento normal de la máquina.

Cuando el aceite logra arder por los menos durante 5 segundos, se dice que el aceite se encuentra en el punto de combustión. Esta temperatura aporta información sobre la presencia de componentes volátiles en el aceite.

Punto de fluencia

Temperatura por debajo de la cual el aceite ya no fluye bajo unas condiciones definidas. Esto es provocado por la cera que contiene el lubricante abaja temperatura. La cera forma cristales que disminuyen la fluidez del lubricante, causando una mala lubricación a bajas temperaturas.

Color

Existe una amplia gama de colores en los lubricantes. En general, los fabricantes usan colores determinados para identificar el lubricante con una determinada propiedad.

Emulsificación y demulsibilidad

La emulsificación es la propiedad que indica la capacidad de un aceite de mezclarse íntimamente con el agua hasta lograr una emulsión estable. Y por el contrario, la demulsibilidad indica la tendencia que tiene el aceite a separarse del agua. Estas propiedades son importantes en caso de que se vaya a usar un lubricante con sistema en los que haya presencia de agua, como por ejemplo las turbinas de vapor. Sin embargo, existe riesgo de oxidación del aceite por la presencia de agua, aire y altas temperaturas. Para ello se usan aditivos que consiguen aumentar la demulsibilidad del aceite.

Número de neutralización

Es indicativo de la acidez. Corresponde a los miligramos de KOH que se necesitan para neutralizar un gramo de aceite. Aunque el aceite refinado suele tener un número de neutralización bajo, los aditivos pueden provocar el incremento sustancial de esta propiedad. El incremento del número de neutralización es indicativo de la oxidación del aceite.

Espuma

Cuando el lubricante absorbe y retiene aire en su interior, comienza a producirse la espuma. La espuma está formada por burbujas que reducen la presión del aceite, son compresibles y no lubrican, lo que provoca que la capacidad de lubricación del aceite se vea deteriorada, por ello la presencia de la espuma es los lubricantes no es deseable.

Grado de protección contra el óxido

Es la capacidad que tiene el lubricante para evitar la oxidación de las partes que recubre cuando hay agua.

Corrosión de tira de cobre

Expresa cuan reactivo es un aceite para el cobre. Existen piezas de bombas que están hechas de cobre y están en contacto con el lubricante, por lo cual es importante tener en cuenta esta propiedad.

Contenido en azufre

Depende del petróleo del que se haya obtenido el lubricante, los aditivos que contiene y el refinamiento aplicado para la obtención de los aceites base. La gran mayoría de los aceites lubricantes contienen sulfuros no activos que no son corrosivos.

1.3.1.4.3 Tipos de lubricantes

Normalmente los lubricantes se clasifican según su composición y presentación o por su naturaleza. Por una parte, según la composición y presentación de los lubricantes podemos encontrar:

Aceites. Su consistencia varía desde aceites más líquidos hasta sustancias semi-grasas. Son principalmente usados en condiciones de temperatura media o elevada, así como cuando son necesarios cortos períodos de relubricación.

Los aceites pueden diferenciarse en dos grupos, los lubricantes minerales-sintéticos y los lubricantes con base animal o vegetal. Estos primeros son los más utilizados dentro de los aceites.

Los lubricantes minerales-sintéticos pueden estar basados en aceites minerales, como el petróleo, o ser puramente sintéticos. Los sintéticos poseen mayor poder antioxidante y estabilidad, por lo que su uso es más especializado, y además son más

caros. También se pueden encontrar mezclas de estos dos, llamados aceites semi-sintéticos. En el grupo de aceite mineral sintéticos se observan las diferentes categorías:

- Aceites minerales. Es un aceite obtenido del petróleo que carece de compuestos reactivos como el nitrógeno, azufre, oxígeno, etc. También suele estar exento de ácidos que deterioren la vida de los componentes que baña el aceite. Este tipo de aceite es el más indicado para rodamientos, especialmente, los aceites minerales de alta calidad.
- Diésteres. Son óptimos para valores de temperaturas entre -60°C y 120°C con una elevada resistencia a la corrosión. Su principal uso es en cojinetes ya que su viscosidad es baja y más estable con cambios de temperaturas en comparación con los aceites minerales.
- Aceites fluorados. Sus principales características es la buena estabilidad que presentan frente a oxidación y las excelentes propiedades a presiones elevadas.
- Poliglicoles. Su principal aplicación es en cuando temperaturas de operación superan los 900°C. Presentan una densidad superior a 1, aunque puede emulsionarse con el agua en casos de que se agiten con fuerza. Cabe destacar su excelente estabilidad frente a la oxidación y que su vida de servicio puede superar 10 veces la de los aceites minerales.
- Hidrocarburos sintéticos. Son usados en aplicaciones especiales. Se dividen en los polioalfaolefinas, también llamados PAO, y en hidrocarburos aromáticos alquilados. Las principales características de los PAO son su baja volatilidad, alta resistencia a la oxidación, alto índice de viscosidad y alta resistencia al calor. Los hidrocarburos aromáticos comparten características con los PAO y además presentan un bajo índice de viscosidad más bajo que estos.
- Aceites de silicona. Al ser lubricantes no orgánicos, presentan buen comportamiento a altas temperaturas así como cuando se dan grandes variaciones de temperatura. Por otra parte, son más propensos a sufrir corrosión. Son utilizados en aplicaciones especiales.

Por otro lado, los lubricantes con base animal o vegetal son ideales para obtener jabones, ya que esta sustancia se obtiene como producto de la reacción de los lubricantes con base animal o vegetal con materiales alcalinos. Sin embargo, este tipo de aceites no tiene un uso extendido debido a que son propensos a oxidarse y a altas temperaturas se descomponen en ácidos corrosivos.

Grasas semisólidas y sólidas

Están compuestas de aceites minerales, hasta un 90%, un espesante, aditivos y colorantes. Suelen contener materiales fibrosos y sólidos, al contrario que los aceites. Este tipo de lubricantes destacan por sencillo modo de aplicación, altas capacidades de adhesión y de retención de película, así como por su buena protección frente a contaminantes ambientales y humedad.

Lubricantes sólidos

Su uso es muy conveniente a altas temperaturas, así como cuando no es posible utilizar los demás tipos de lubricantes. Debido a que se encuentra en estado sólido, este tipo de lubricantes es propenso a desgastarse lo que dificulta que el lubricante pueda mantener la capa de lubricación que separa a las superficies en contacto. Este efecto es muy desfavorable en las aplicaciones de precisión debido a la aparición de holguras. Los lubricantes sólidos que más destacan son el grafito, el disulfuro de molibdeno, el talco, óxidos de metal y sales, entre otros.

1.3.1.4.4 Aditivos

Los aditivos son compuestos químicos que son añadidos a los aceites lubricantes en pequeñas cantidades con el objetivo de mejorar ciertas propiedades de estos. También se pueden obtener lubricantes especiales para aplicaciones específicas mediante la adición de unos aditivos concretos. Los aditivos más utilizados en la son:

- Aditivos para mejorar la viscosidad
Contrarrestan el efecto de la temperatura sobre la viscosidad de los aceites.
- Aditivos antioxidantes
Previenen la oxidación producida por la exposición del lubricante a oxígeno atmosférico.
- Aditivos inhibidores de la corrosión
Actúan como barrera protectora para las superficies metálicas frente a sustancias reactivas.
- Aditivos anti-desgaste y reductores de la fricción
Mejoran el comportamiento del lubricante en condiciones de temperatura y presión elevadas.

- Aditivos de presión extrema

Con estos aditivos los lubricantes son capaces de soportar presiones muy elevadas, previniendo que se rompa la capa de lubricante. Esto se consigue debido a la formación de películas de sulfuro y cloruro como consecuencia de la reacción entre el lubricante con aditivo y la superficie del metal. Estas películas son resistentes a la penetración.

- Dispersantes

Sirven para mantener en suspensión partículas contaminantes y productos oxidantes. Ayudan a mantener el lubricante en buenas condiciones evitando la formación de desechos de refino, el desgaste abrasivo, el incremento de la viscosidad y la formación de desechos de la oxidación.

- Detergentes

Limpian las piezas que están en contacto con el lubricante. Tienen propiedades parecidas a la de los lubricantes, pero además ayudan a evitar la oxidación y corrosión neutralizando los productos derivados de la combustión ácida.

- Aditivos anti-espuma y liberadores de aire

Ayudan a la liberación burbujas, previniendo así la formación de espuma. Esto se consigue debido a la alteración de la tensión superficial del lubricante. Al tener una solubilidad limitada en el aceite, solo es posible añadir pequeñas cantidades de estos aditivos a los aceites lubricantes.

- Aditivos emulsores y demulsionantes

Por una parte, los aditivos emulsores permiten la formación de emulsiones entre fluidos inmiscibles. Se usan sobre todo para aplicaciones en las que el lubricante se mezcla con agua. Por otra parte, los aditivos demulsionantes se utilizan para poder separar emulsiones. Se utilizan principalmente cuando es necesario separar mezclas de aceite con agua, para la posterior eliminación del agua.

- Aditivos para disminuir el punto de fluencia

Se usan para mejorar el comportamiento de los lubricantes a bajas temperaturas.

1.3.2 Recubrimientos

Un recubrimiento consiste en una fina capa superficial de pequeño espesor, compuesta de un material característico, que se aplica sobre las superficies de los componentes de las máquinas que se deseen modificar. De esta forma se modifican las superficies de los componentes con la finalidad de mejorar las características de estos sin tener que modificar el material base. Mediante los recubrimientos es posible proveer a los elementos de mayor resistencia al calor, a la corrosión, al desgaste, disminuir el rozamiento y más mejoras. Todo ello dependerá de la aplicación a la que vayan dirigida los elementos en cuestión. Las mejoras obtenidas se reflejan en la obtención de componentes con mejor respuesta en sus aplicaciones, una vida de uso más prolongada, así como un menor mantenimiento.

En el campo de la tribología, el uso de recubrimientos tiene una gran relevancia, ya que con la aplicación de estos se consigue reducir el coeficiente de fricción y el desgaste de los componentes.

Los materiales cuyo uso está más extendido para la obtención de recubrimientos para aplicaciones tribológicas son los siguientes:

- Materiales férreos poco aleados (< 12% aleación de Cr, C, Si + Ni, Mn, W, Mo, V)
- Materiales férreos de alta aleación (< 50% aleación de Cr, Mn, Mo, C + Ni, Co, Si, W, V)
- Aleaciones de base níquel (Ni + Cr(5-25%), Si(2-4,5%), + C,B)
- Aleaciones de base cobalto (Co + Cr(20-35%), W(4-15%), C(0,8-2,5%) + Si, Ni, Fe)
- Materiales cerámicos basados en óxidos (Al_2O_3 , Cr_2O_3 , ZrO_2 , TiO_2 , SiO_2 ...), carburos (WC , Cr_2C_3 , SiC ,...) nitruros, boruros y cermets

A continuación se hace una explicación más extensa de los recubrimientos hechos a partir de aleaciones de base níquel, específicamente los recubrimientos de NiCrBSi que son los que se analizan en este trabajo

1.3.2.1 Aleaciones base Níquel

El níquel es uno de los elementos más abundantes en la Tierra. Cerca de 0,008% de la corteza terrestre está formado por níquel y en el núcleo de la Tierra es el segundo elemento más abundante por detrás del hierro. Su número atómico es el 28, situado en el grupo de los metales de transición. Es conductor de la electricidad y del calor, con una alta ductilidad y maleabilidad por lo que es adecuado para ser laminado, pulido y forjado. Presenta ferromagnetismo a temperatura ambiental y su densidad es muy elevada, de 8.908 kg/m^3 . Su temperatura de fusión alcanza los 1.455°C . Presenta una

estructura cristalina cúbica centrada en las caras. El níquel en sí posee una resistencia moderada a la corrosión, pero su resistencia aumenta cuando se agregan elementos de aleación como cobre, molibdeno, cromo, hierro y tungsteno [6] [7].

El principal uso del Níquel es el de la obtención de aleaciones. Aproximadamente el 68% de la producción mundial de níquel está destinada para la fabricación de aceros inoxidables y otro 10% para la obtención de aleaciones no ferrosas base níquel. La importancia de este material radica en su alta resistencia a la corrosión.

Las aleaciones a base de níquel poseen varias propiedades que las hacen muy adecuadas para su uso en condiciones y entornos extremadamente severos. Estas aleaciones son muy resistentes a la oxidación y la corrosión, y cuando se calientan forman una capa de óxido pasiva, estable y espesa, que las protege de ataques posteriores. Las aleaciones de níquel también conservan su resistencia en una amplia gama de temperaturas. Esto los hace particularmente adecuados para su uso en aplicaciones de alta temperatura. Además, las aleaciones de níquel son más resistentes que los aceros inoxidables en muchos entornos.

Recubrimientos NiCrBSi

Las aleaciones de NiCrBSi son una combinación única de propiedades que les permite ser utilizados en una variedad de aplicaciones de propósito especial. Poseen una gran resistencia al desgaste adhesivo, desgaste abrasivo y a la corrosión a temperatura ambiente y a altas temperaturas. Son el resultado de la aleación de diferentes elementos: una base de Ni con Cromo, Boro y Silicio principalmente, con el fin de mejorar ciertas propiedades. Por una parte, el cromo promueve resistencia a la oxidación y corrosión a alta temperatura y aumenta la dureza del revestimiento formando precipitados muy duros. El boro reduce la temperatura de fusión y contribuye a la formación fases duras. Se agrega silicio para mejorar las propiedades auto-fundentes. Las aleaciones de NiCrBSi también contienen Carbono en su composición, de forma que se obtienen carburos con alta dureza que mejoran la resistencia al desgaste de los revestimientos [8].

Esta aleación se suele usar para obtener recubrimientos de NiCrBSi. Son recubrimientos resistentes al desgaste, la corrosión y la oxidación en condiciones de alta temperatura, alcanzando los 800°C. Su rango de aplicación es amplio, como por ejemplo en la industria de moldes de vidrio, en la industria del papel, la industria petrolera o industria química. Se han aplicado para la obtención de numerosos componentes, como por ejemplo aspas de turbinas, punzones para trabajo en caliente, aros de pistón, válvulas, rodillos para la fabricación de acero, calderas de combustibles fósiles, ejes de

bombeo, etc. Además, se suelen utilizar como reemplazo de los revestimientos de cromo duro, ya que estos últimos resultan ser muy contaminantes.

La forma de obtener los recubrimientos de NiCrBSi es mediante la proyección térmica. Las aleaciones de NiCrBSi se usan en forma de polvos autofundentes y comúnmente son depositados por medio de llama oxiacetilénica o alta velocidad. También se puede utilizar la proyección por plasma, obteniendo mejores resultados de porosidad, microdurezas y adherencia que con las técnicas anteriores. Además, es frecuente aplicar un pos tratamiento de refusión por láser o llama, de manera que se consigue un recubrimiento de mayor calidad, adherencia, menor porosidad y mayor dureza [9].

A continuación se explican los aportes de los diferentes elementos que son añadidos al níquel para la obtención de las aleaciones de NiCrBSi:

Boro

El punto de fusión del níquel es de 1455°C. Esta temperatura de fusión tan elevada dificulta la operación de proyección térmica en caso de la técnica de oxy-fuel y alta velocidad. Al añadir Boro en cantidades no superiores al 2,5 wt%, se consigue una aleación con un punto de fusión menor al del níquel. Sin embargo, cantidades de Boro superiores al 2,5 wt% puede provocar deficiencias en la aleación, ya que provoca la disminución de la resistencia a la corrosión y una excesiva fluidez.

Silicio

Al igual que el Boro, sirve para disminuir el punto de fusión de la aleación. También confiere propiedades auto-fundentes y mejora la fundición y las propiedades asociadas a la humectación. Se suele añadir en torno al 4 wt% de Silicio a las aleaciones de NiCrBSi.

Tanto el Boro como el Silicio actúan como elementos desoxidantes, formando borosilicatos con puntos de fusión bajos que previenen una oxidación mayor de los elementos activos en las aleaciones. Los óxidos ascienden hacia la superficie a través del depósito fundido y son eliminados en forma de escoria. Simultáneamente, el compuesto eutéctico NiNi_3B se forma conjuntamente con los borosilicatos altamente humectables, lo cual permite una deposición a temperaturas más bajas. De hecho, la humectación de borosilicatos en las aleaciones de Níquel resulta tan buena que una fase líquida sinterizada a, aproximadamente 1030°C, homogeniza la composición química, conjuntamente con la mejora de la precipitación de carburos y boruros de Cromo.

Cromo

Mejora la resistencia a la oxidación y corrosión a altas temperaturas, así como aumenta la dureza debido a la formación de fases duras. El contenido en cromo suele variar entre el 8 y el 20 wt%.

Carbono

El contenido en carbono de las aleaciones de NiCrBSi es muy bajo, alrededor del 0,5 wt%. Cuando el carbono al reaccionar con el Cromo se obtienen carburos de alta resistencia al desgaste y la cavitación, por ello resulta muy conveniente su adición en este tipo de aleaciones.

Alúmina

También llamada óxido de aluminio Al_2O_3 , es una sustancia cristalina blanca que posee una gran resistencia al desgaste abrasivo, una alta resistencia a la corrosión y es estable a altas temperaturas. La alúmina natural se utiliza como material de partida para la fundición de aluminio metálico. Sin embargo, una cantidad cada vez mayor de este compuesto se emplea en aplicaciones estructurales, industria automóvil, actividades aeroespaciales, biomédicas y herramientas de corte, particularmente cuando las condiciones ambientales son severas [10].

Esta diversidad de aplicaciones surge de las notables propiedades del Al_2O_3 , de las que destacan:

- Alta conductividad térmica
- Alta dureza
- Resistencia a la abrasión
- Resistencia a muchas formas de ataque químico.
- Resistencia a la corrosión
- Resistencia al desgaste
- Aislante eléctrico y térmico

El proceso de producción de alúmina a gran escala se conoce como proceso Bayer que consiste en su extracción a partir de bauxita. La bauxita se disuelve en hidróxido de sodio, que forma una solución de aluminato de sodio de la que luego se separan el óxido de hierro y la sílice, generando un residuo llamado lodo rojo. La alúmina se precipita a partir del aluminato de sodio y se calcina para producir varios grados de alúmina. Existe una gran variedad de grados comerciales de alúmina, que pueden contener entre 85% y casi 100% de Al_2O_3 . Esta clase de materiales también puede exhibir varias densidades y características microestructurales, como el tamaño de grano. El comportamiento de desgaste de la alúmina puede verse afectado por todas estas variables.

La alúmina existe en diferentes fases dependiendo de la pureza de la alúmina y sus propiedades mecánicas y físicas. La alúmina- α es una fase termodinámicamente estable y se puede utilizar como revestimiento para disminuir el desgaste superficial de

los materiales. La alúmina- α se utiliza como cerámica estructural debido a que tiene buenas propiedades mecánicas y también excelentes propiedades térmicas a altas temperaturas. Estas características han hecho que la alúmina sustituya a otros materiales cerámicos en un gran número de aplicaciones [11].

El desgaste de los materiales es un problema de gran importancia industrial ya que este fenómeno provoca la inutilización y la sustitución de los componentes. Por esto, la selección adecuada de materiales resistentes al desgaste aumenta la vida útil de los equipos y reduce considerablemente los costos de mantenimiento. La alúmina es el material más utilizado en aplicaciones que requieren resistencia al desgaste, lo que hace que este material sea particularmente importante en una amplia gama de aplicaciones. Sus diversas propiedades atractivas incluyen alta inercia química, considerable tenacidad a la fractura, costo relativamente bajo, gran dureza, alta resistencia a la erosión, buen comportamiento a altas temperaturas, alta resistencia eléctrica y gran disponibilidad [12].

En la tabla 2 se presentan las propiedades de la alúmina:

Densidad	3,8 gr/cm ³
Resistencia compresión	4000 MPa
Resistencia flexión	310 MPa
Módulo de elasticidad	406 GPa
Punto de fusión	2072 °C
Conductividad térmica	35 W/m·K
Coeficiente de dilatación térmica	$7 \cdot 10^{-6}$ K ⁻¹
Constante dieléctrica	9,6
Dureza Vickers HV1	2000HV

Tabla 2. Propiedades alúmina

1.3.3 Proyección térmica

La proyección térmica es una técnica que se basa en la proyección de partículas de un material determinado, principalmente polvos metálicos, cerámicos o poliméricos, sobre las superficies de los elementos a tratar con la finalidad de proporcionarles una capa de recubrimiento. Esta capa de recubrimiento permite mejorar el comportamiento de las piezas cuando estas son sometidas a condiciones extremas tales como altas temperaturas, cargas elevadas, desgaste severo, corrosión, ambientes reactivos, de forma que se alarga la vida útil de los componentes y por consiguiente, de las máquinas.

Existen numerosas técnicas de las que se sirve la proyección térmica, en las que generalmente todas destacan de las altas temperaturas de trabajo, a pesar de existir una técnica de rociado en frío. Mediante un chorro a alta velocidad y temperatura, se proyecta el polvo fundido o semi-fundido que va depositándose en forma de capas sobre la superficie base que acaban formando el recubrimiento.

Los principales parámetros de los que depende la proyección térmica son:

- Temperatura de la llama
- Temperatura de fusión de las partículas proyectadas
- Distancia de proyección
- Velocidad de las partículas proyectadas
- Presión de proyección
- Temperatura de impacto de las partículas sobre material base
- Espesor del recubrimiento

Es fundamental definir bien estos parámetros en función de cada operación con el fin de obtener un recubrimiento con una correcta adherencia y mayor calidad.

Los recubrimientos obtenidos por proyección térmica en la mayoría de las ocasiones presentan defectos tales como poros, inclusiones de óxidos, partículas sin fundir, etc. Estos defectos provocan deficiencias en las propiedades de los recubrimientos. En la figura 21 se observa una ilustración de los defectos citados.

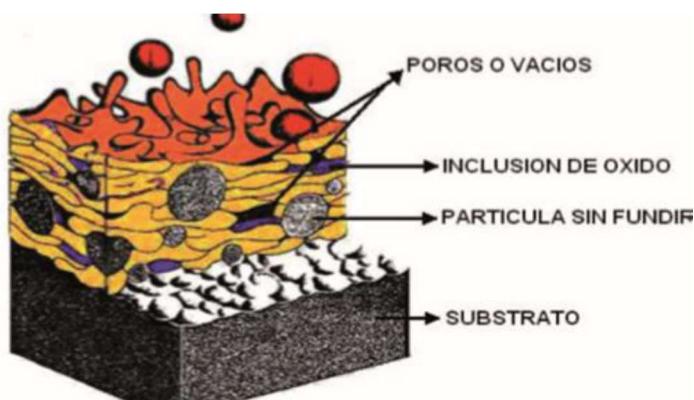


Figura 21. Defectos en los recubrimientos obtenidos por proyección térmica

A continuación se detallan las técnicas de proyección térmica más extendidas en la industria:

Proyección térmica por llama

Esta técnica consiste en fundir el material proyectado mediante una llama de Oxígeno-combustible y propulsarlo mediante un gas pulverizador, por ejemplo aire comprimido o nitrógeno, sobre el material base. El combustible más usado suele ser el acetileno, aunque también se usa hidrógeno.

La proyección térmica por llama permite proyectar más de 100 tipos diferentes de materiales. El material de aportación puede suministrarse, bien en forma de hilo o varilla (Fig. 22), que va administrándose de forma continua, o bien en forma de polvos, que pueden diferenciarse en polvos autofundentes u autoadherentes. Los polvos autofundentes requieren de un tratamiento térmico posterior por medio de soplete de llama de acetileno/oxígeno que permite la difusión de la capa proyectada mejorando así las propiedades de esta y su adherencia al material base.

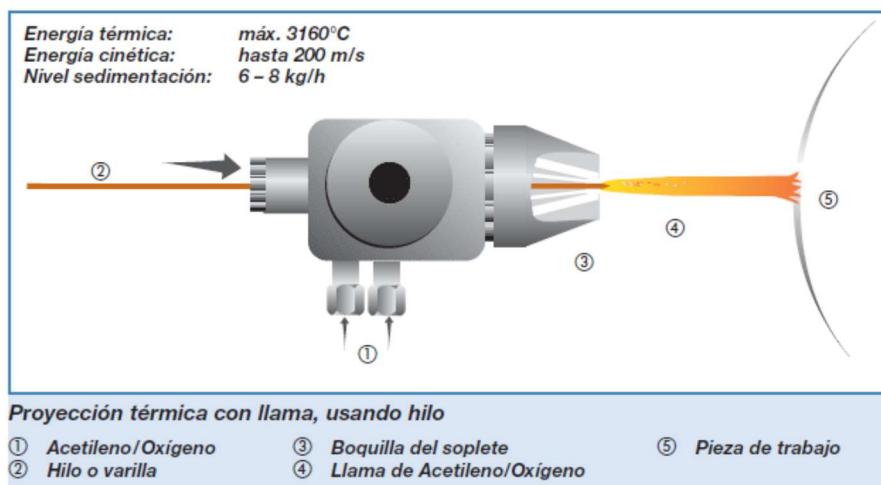


Figura 22. Representación de la proyección térmica por llama de hilo

Las principales ventajas de este método son la alta eficiencia de deposición, el bajo coste de la operación y la facilidad y practicidad de la operación. Por otra parte, la proyección por llama no permite la pulverización de materiales con una temperatura de fusión superior a los 2700°C, además de que con esta técnica se obtienen recubrimientos de mayor porosidad, así como peor adherencia en comparación con las demás técnicas.

Los principales campos de aplicación de esta técnica son los casquillos protectores para ejes, rotores y serpentines de extrusión, asientos de rodamientos, etc.

Proyección térmica a alta velocidad

También llamada HVOF (“*High Speed Oxy-Fuel*”), es una técnica que se deriva de la proyección térmica por llama. La combustión del material de aporte, que se suministra en forma de polvo, también se realiza mediante una llama de combustible/oxígeno, pero en este caso, a presiones elevadas. Esto provoca que el material se proyecte a altas velocidades, de forma que se obtiene un recubrimiento de mayor densidad y adherencia, así como una porosidad menor. Los combustibles usados en esta técnica son el propano, etileno, propileno e hidrógeno. Las partículas proyectadas suelen alcanzar velocidades superiores a la velocidad del sonido cuando son rociadas.

Las ventajas de esta técnica es la obtención de recubrimientos con una mayor uniformidad microestructural y cuyas partículas han sufrido de degradación menor, debido al menor tiempo de residencia del material fundido en la llama.

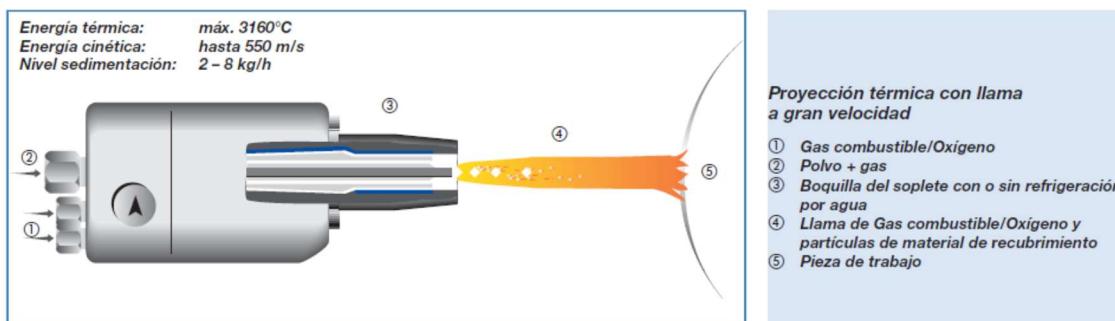


Figura 23. Representación de la proyección térmica por HVOF

Los principales campos de aplicación de la proyección HVOF son rodillos para la industria fotográfica, piezas de maquinaria para las industrias química y petroquímica, por ejemplo bombas, válvulas correderas, válvulas de esfera, juntas mecánicas, etc.

Proyección térmica por arco eléctrico

En esta técnica el material a proyectar se funde por medio de un arco eléctrico que se forma en la pistola de proyección. El arco eléctrico se produce con el mismo material a proyectar. Dos alambres metálicos con polaridad opuesta se encuentran enfrentados en la boca de la pistola de forma que entre ellos se produce un arco eléctrico. Los dos alambres se alimentan continuamente de forma que cuando entran en contacto forma un arco eléctrico que provoca la fusión de estos, y con la ayuda de un gas propulsor, se rocían las gotas de material fundido sobre la superficie del material base. Como gas de propulsión se puede usar aire comprimido, nitrógeno o argón.

La cantidad recubrimiento obtenido por unidad de tiempo depende del amperaje de salida, la densidad del material de aporte y el punto de fusión del mismo.

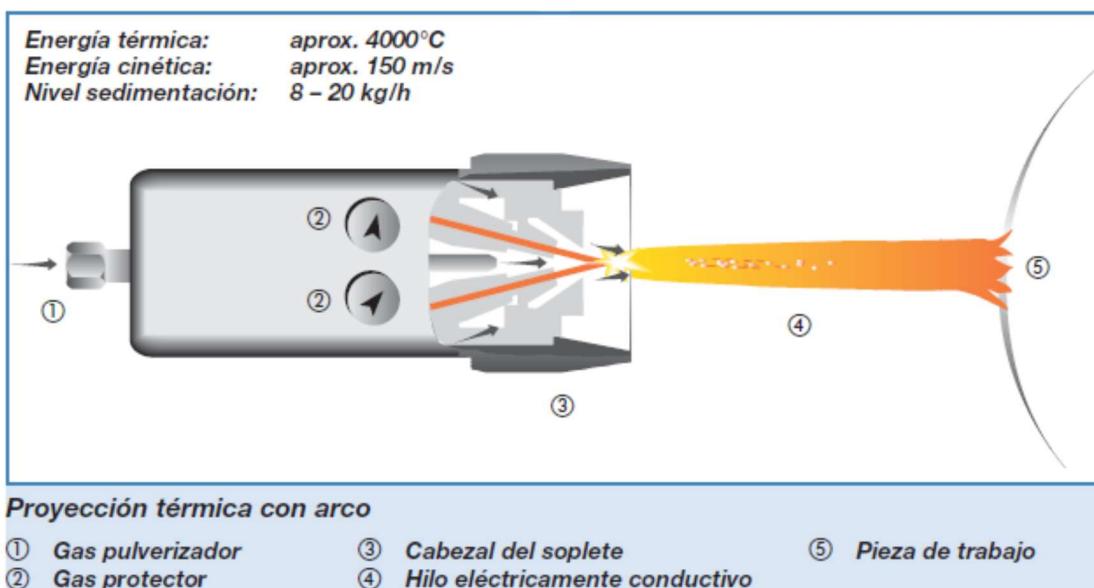


Figura 24. Representación de la proyección térmica por arco eléctrico

Mediante esta técnica se obtiene un sistema de proyección térmica de gran rendimiento, sin embargo, queda restringida únicamente a la obtención de recubrimientos de materiales eléctricamente conductores.

Proyección térmica por plasma

La proyección térmica por plasma, consiste en fundir el polvo de material de aporte mediante un rayo de plasma y es proyectado sobre la superficie de la pieza a tratar.

La pistola de proyección está formada de un ánodo de cobre y un cátodo de tungsteno los cuales se refrigeran por agua. El gas de plasma (argón, nitrógeno, hidrógeno, helio) fluye alrededor del cátodo y a través del ánodo que tiene la forma de una boquilla de concrección. El plasma se inicia mediante una descarga de alto voltaje que provoca una ionización localizada y una trayectoria conductora para que se forme un arco de corriente continua entre el cátodo y el ánodo. El calentamiento por resistencia del arco hace que el gas alcance temperaturas extremas, se disocie e ionice para formar un plasma.

Esta técnica permite alcanzar temperaturas de 10.000°C, por lo que es muy utilizado para proyectar recubrimientos con altas temperaturas de fusión como los cerámicos, aunque también se proyectan recubrimientos metálicos y cermet.

Los principales campos de aplicación de la proyección térmica por plasma son los vehículos aeroespaciales, implantes, etc.

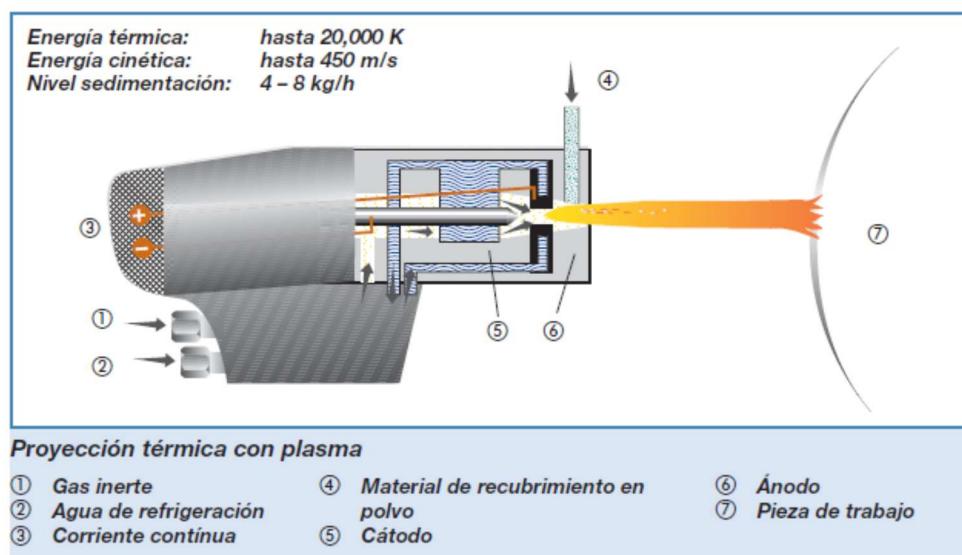


Figura 25. Representación de la proyección térmica por plasma.

1.4 Parte experimental

En este apartado se va a explicar cómo se ha llevado a cabo el desarrollo de este trabajo mediante una explicación detallada de los equipos, material y elementos utilizados, así como los procesos y ensayos realizados a lo largo de la investigación.

1.4.1 Equipos principales

1.4.1.1 Tribómetro Plint&Partners TE 79

El ensayo de rozamiento se llevará a cabo con un tribómetro de la empresa Plint&Partners modelo TE-79 que incorpora el módulo P Indexing Pin on Disc Module para llevar a cabo ensayos de rozamiento del tipo Pin on Disk (PoD). PoD es un tipo de configuración de las máquinas de ensayo tribológico que consisten en un disco giratorio llamado pista de rodadura sobre el cual contacta una probeta, en nuestro caso pin (Fig. 26). El pin se posiciona perpendicularmente respecto a la pista de rodadura y sobre él se aplica una carga determinada en función del ensayo. Como consecuencia del contacto dinámico entre el pin y la pista de rodadura se origina un camino de desgaste sobre el disco [13].

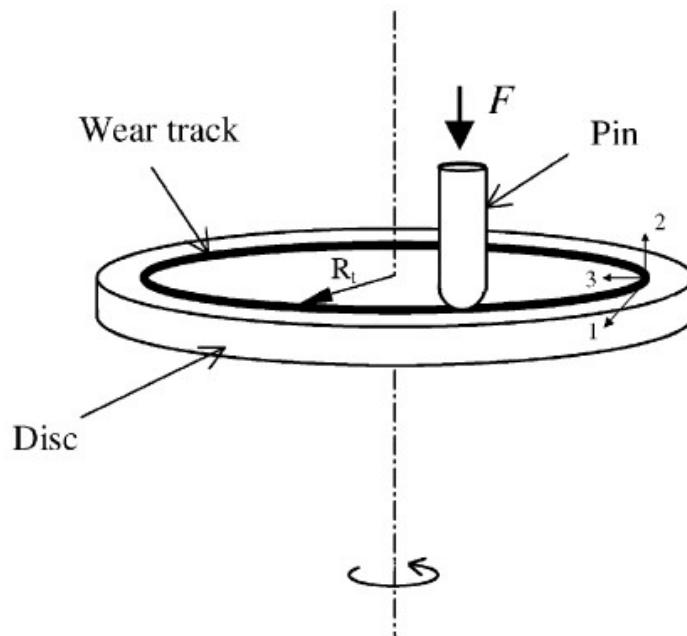


Figura 26. Configuración del tipo Pin on Disk.

El tribómetro TE 79 realiza ensayos acorde a las normativa ASTM G-99 y DIN 50324 de forma que produce un contacto de Clase 1 (“*pin o bola cargada verticalmente contra un disco rozante horizontal*”). Además, el módulo P permite realizar ensayos acorde a la normativa ASTM G-132, normativa la cual implica que el pin siempre contacte en la presencia de una capa limpia de abrasivo o de superficie rozante [4].

El TE 79 incorpora un sistema de medición de fuerza de carga y fricción, que está montado en una placa base, una unidad hardware de control, una unidad de interfaz y un software de control COMPEND 2000. La máquina está montada sobre un banco e incluye una carcasa transparente de metacrilato y un sensor de temperatura y humedad ambiental. La carcasa también se utiliza como cubierta de seguridad para la máquina e incorpora un sensor magnético de proximidad, de forma que el tribómetro no funciona en ausencia de la carcasa [13].

El pin utilizado en el ensayo está fijado a un brazo articulado. Sobre este mismo brazo se apoyan las cargas del ensayo en un lado del brazo y en el otro lado se haya un contrapeso. Este contrapeso sirve para proporcionar un equilibrio neutral al pin así como para desplazar el centro de gravedad al plano de contacto. Las cargas se aplican mediante el uso de pesos que van de 0,1 N a 50 N.

El brazo articulado está restringida por un transductor de fuerza de calibre en una unión deslizante. Esta unión permite que únicamente se mida la componente tangencial de la fuerza de contacto, es decir, la fuerza de fricción, incluso en los ensayos en los que se producen grandes deflexiones debido al uso de probetas elastoméricas.

El brazo articulado se acciona mediante un servomotor que permite subirlo y bajarlo para poder desplazar el pin en el punto deseado de la pista de rodadura. El programa también permite introducir un retroceso entre la puesta del brazo en la posición del ensayo y el inicio del movimiento. Este período de espera es un parámetro importante para determinar la fricción de arranque en los contactos elastoméricos [13].

TE 79/P Indexing Pin on Disc Module

Este módulo supone la incorporación de un conjunto de disco giratorio que está montado en un carro transversal, lo que permite que el pin siga una trayectoria espiral sobre el disco. Los movimientos de rotación del disco y de traslación del carro se obtienen mediante el uso de motores paso a paso. El módulo está ubicado en la placa base del tribómetro y está fijado con tornillos de fijación.

El disco de la pista de rodadura posee un depósito donde se aloja el aceite lubricante sobrante. El depósito está montado junto al eje de transmisión vertical. Este conjunto es montado sobre una corredera transversal, lo que permite cambiar el radio de operación durante el ensayo. Por medio del software es posible configurar que el disco gire a velocidad constante durante el cambio de radio [13].



Figura 27. Tribómetro TE 79 y módulo TE 79/P Indexing Pin on Disc Module

Control y adquisición de datos

El control y la adquisición de datos se implementan a través de un ordenador que ejecuta el software COMPEND 2020 en Windows (Fig. 28). El control automático se implementa mediante secuencias programadas por el usuario. El control manual se implementa mediante controles en la pantalla. Los datos de las pruebas pueden ser almacenados en forma de archivos .csv o .tsv.

A lo largo del ensayo es posible controlar y regular la velocidad de rotación del disco de la pista de rodadura así como el radio de deslizamiento del pin. También es posible monitorizar los valores de la fuerza de rozamiento, el coeficiente de rozamiento, la distancia recorrida, la temperatura de ambiental y la humedad relativa. Estos valores son mostrados en la interfaz del programa.

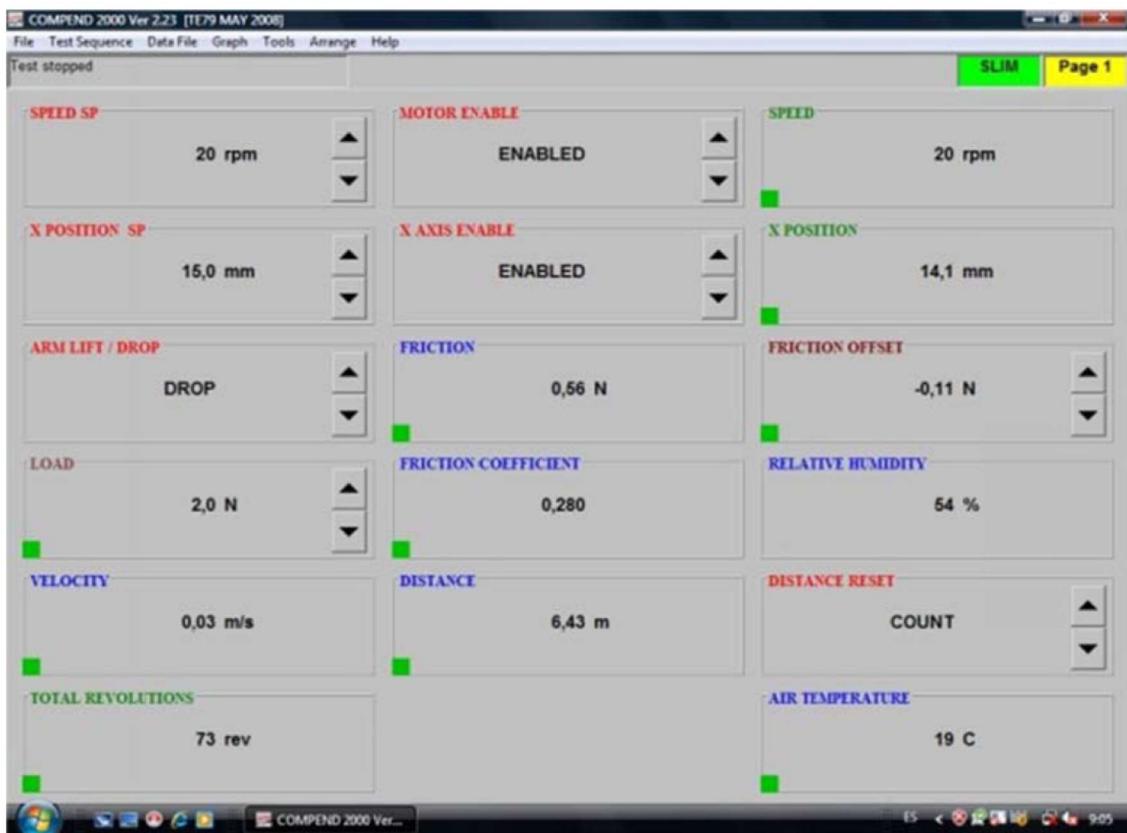


Figura 28. Interfaz software COMPEND 2000

En las tablas 3 y 4 se muestran las principales especificaciones técnicas del tribómetro y del módulo respectivamente:

Configuraciones de contacto	Bola
	Pin
	Personalizada
Carga	0,1-50 N
Rango fuerza de fricción	0-50 N
Sensor de humedad	10-90% HR
Interfaz	Serial Link Interface Module
Software	COMPEND 2000

Tabla 3. Parámetros de operación del tribómetro TE 79

Configuraciones de contacto	Ball on Disc
	Pin on Disc
Diámetro de disco	100 mm
Radio de pista	0-40 mm
Velocidad transversal Y	10 mm/min
Velocidad de rotación	0-250 RPM
Velocidad de desplazamiento	1 m/s max

Tabla 4. Parámetros de operación del módulo TE 79/P Indexing Pin on Disc Module

1.4.2 Materiales

1.4.2.1 Lubricante. Aceite CUT-MAX 7-26

Como lubricante para llevar a cabo el ensayo de rozamiento es el aceite lubricante CUT-MAX 7-26. Es un hidrocarburo de aceite mineral fabricado y comercializado por Houghton Ibérica S.A. El principal uso de este aceite es como fluido dieléctrico para operaciones de mecanizado por electroerosión. A continuación se detallan las propiedades de este aceite en la tabla 5:

Densidad	0,88 g/cm ³
Viscosidad cinemática	0,002624 kg/ms (40°C)

Tabla 5. Propiedades aceite CUT-MAX 7-26

El aceite CUT-MAX 7-26 es un aceite de baja viscosidad, siendo usado en procesos de súper-acabado. Se destacan las siguientes ventajas de este aceite:

- Alta resistencia a la oxidación
- Compatible para todo tipo de filtro
- Baja formación de niebla
- Flujo eficiente que reduce la ocurrencia de miscrosoldaduras
- Su baja viscosidad lo hace ideal para procesos de super-acabados

Las principales de este aceite son como medio lubricante para el mecanizado de moldes de las máquinas de inyección de plástico o de fundición, la fabricación de láminas de turbinas aeroespaciales y para el taladro fino de los perfiles aerodinámicos fabricados de aleaciones de níquel.

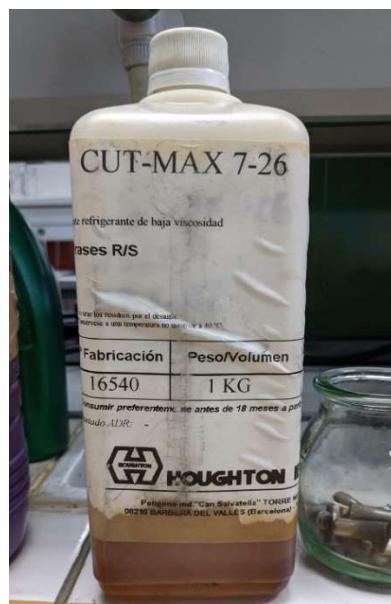


Figura 29. Aceite CUT-MAX 7-26

1.4.2.2 Pin base y pista de rodadura

Los pins son las muestras que se utilizan en el proyecto. Sobre estas muestras se rociará los recubrimientos que son objeto de estudio del proyecto y posteriormente serán usadas para realizar el estudio de fricción y demás análisis del proyecto. Estos elementos presentan una geometría cilíndrica de 8 mm de diámetro y una longitud de 18 mm. Una de las puntas del cilindro presenta una forma de redondeada de forma que se obtiene una geometría de contacto puntual que puede ser utilizada en el ensayo de fricción para reproducir el par tribológico. Sobre esta cara redonda se aplicará el recubrimiento.

El disco del Tribómetro tiene la función de pista de rodadura de dicha máquina. El disco tiene un diámetro de 100 mm y un espesor de 5 mm. Este componente se obtiene de forma comercial.

Tanto los pins como el disco de la pista de rodadura están hechos de acero inoxidable AISI 304. Los aceros inoxidables son aleaciones de hierro con un contenido de cromo de 10,5% o superior. En la superficie de estos aceros se crea una capa pasiva de óxido de cromo que le confiere a estos aceros la propiedad de inoxidable. Dentro de los aceros inoxidables encontramos el AISI 304 que es un acero inoxidable austenítico y el más común entre los aceros inoxidables. Su contenido en níquel suele oscilar entre el 8% y el 10,5% mientras que el cromo suele estar entre el 18% y el 20%. Presenta una microestructura Cúbica Centrada en las Caras y no presenta magnetismo debido a su condición de austenítico. Además del níquel y el cromo, también contiene aleantes como el manganeso, silicio y carbono [14].

Su uso está muy extendido en la industria debido a que presenta una buena procesabilidad, soldabilidad, resistencia a la corrosión, resistencia al calor, resistencia a baja temperatura, buenas propiedades mecánicas, se puede trabajar en caliente, como estampado y doblado. Este tipo de aceros inoxidables no pueden ser endurecidos por tratamientos térmicos. Para mejorar las propiedades mecánicas así como aliviar las tensiones internas se aplican tratamientos de recocido.

En la figura 30 se muestran dos imágenes, la de la izquierda muestra el disco de la pista de rodadura y la de la derecha muestra el pin después de ser cortado.



Figura 30. Par tribológico: Disco de acero AISI 304 (izquierda) y pin de acero AISI 304 (derecha)

En la tabla 6 se puede observar la composición química del acero inoxidable AISI 304 según ASTM:

ASTM	C	Si	Cr	Ni	Mn	P	S	N
A240/A240M	0,07	0,75	17,5-19,5	8-10,5	2,0	0,045	0,03	0,10
A276A/276M	0,08	1,0	18-20	8-11	2,0	0,045	0,03	0

Tabla 6. Composición química acero inoxidable AISI 304 (%).

También se indican en la tabla 7 las volares de las propiedades mecánicas del AISI 304:

Densidad	7,93 g/cm ³
Punto de fusión	1398-1454 °C
Calor específico	500 J/(Kg·K) a 20°C
Resistividad eléctrica	0,73 μΩ·m (20°C)
Permeabilidad magnética	1,02
Módulo elástico	193 GPa
Difusividad térmica	3,84 mm ² /s
Coeficiente de conductividad térmica	16,3 (100 °C) 21,5 (500 °C)
Coeficiente de dilatación lineal	17,2 (0-100 °C) 17,8 (0-300 °C) 18,4 (0-500 °C)

Tabla 7. Propiedades físicas acero inoxidable AISI 304

A continuación, en la tabla 8 se presentan los valores más significativos de las propiedades físicas de este tipo de acero:

ASTM	Resistencia a la tracción (MPa) \geq	Límite de elasticidad \geq (MPa) 0.2%	Elongación en 50 mm (% , \geq)	Dureza Brinell (HBW) \leq	Producto	Condición
ASTM A240/A240M	515	205	40	201	Placa de acero, hoja y tira	-
ASTM A276A/276M	515	205	40	-	Barras y formas de acero	Recocido, acabado en caliente

Tabla 8. Propiedades mecánicas acero inoxidable AISI 304

1.4.2.3 Recubrimiento NiCrBSi-Alúmina

Ya que el objetivo del proyecto es comparar las muestras rociadas con NiCrBSi, unas con adición de alúmina y otras sin, se van a preparar dos mezclas de polvo de recubrimiento. Una de las mezclas estará formada únicamente por NiCrBSi y la otra muestra de NiCrBSi+Alúmina.

El recubrimiento convencional, que no tiene alúmina, se obtiene de un recubrimiento comercial en forma de polvo de NiCrBSi de la marca Castolin Eutectic con referencia PE 3307 Eutalloy, el tamaño medio de las partículas es de entre 125 y 45 micras, una densidad de 4,3gr/Cm3 y una dureza de 330Hv30 , En la tabla 9 se muestra la composición química de este recubrimiento.

Recubrimiento	C	Si	B	Cr	Fe	Ni
NiCrBSi(10%Cr)	0,4	3,1	1,6	10,1	2,8	81,94

Tabla 9. Composición química recubrimiento NiCrBSi(10,1% Cr)

Para obtener el recubrimiento modificado, al recubrimiento comercial de NiCrBSi anterior se le añade un 10% de Al₂O₃ micrométrica de la marca PLAXAIR con referencia ALO 101, con un tamaño medio de las partículas de 42 micras, densidad de 3,95gr/Cm3, y una dureza Vickers de entre 1500 y 1650 Kgf/mm². En la tabla 10 se muestra la composición química del recubrimiento en forma de polvo resultante de la mezcla del recubrimiento NiCrBSi con alúmina:

Recubrimiento	C	Si	B	Cr	Fe	Ni
NiCrBSi(10%Cr)+Al ₂ O ₃	0,4	3,1	1,6	10,1	2,8	81,94

Tabla 10. Composición química recubrimiento NiCrBSi(10,1% Cr)+ Al₂O₃

1.4.3 Procedimiento experimental

1.4.3.1 Preparación de las muestras

Se prepararán dos tipos de muestras diferentes, una muestra que será rociada con el recubrimiento NiCrBSi convencional y la otra será rociada con el recubrimiento de NiCrBSi+alúmina. Ambas muestras están hechas del mismo material base y se usarán en distintos ensayos a iguales condiciones.

Corte

Los pins utilizados en los ensayos están hechos de acero inoxidable AISI 304. Tienen una geometría cilíndrica de 8 mm de diámetro y 18 mm de largo (Fig. 31) y se obtienen por el corte de una varilla de acero inoxidable AISI 304 de 8 mm de diámetro mediante una tronzadora de disco Buehler modelo Abrasimet 2 (Fig. 32).



Figura 31. Pins cortados



Figura 32. Tronzadora de disco Buehler modelo Abrasimet 2.

Granallado

La operación de granallado consiste en la impulsión de partículas de corindón a presión haciéndolas impactar sobre la superficie de los pins de forma que se limpia la superficie de estos y se les otorga de una rugosidad superficial y acabado adecuados para la posterior operación de proyección del recubrimiento sobre los pins. Las partículas de corindón tienen una alta dureza por lo que al impacta sobre la superficie de las muestras a gran velocidad causa una deformación plástica sobre estas además de provocar arranque de material superficial. Para el ensayo se utilizan partículas de un tamaño aproximado de 0,53 mm y una pureza de 99,6%. Se impulsan mediante aire comprimido de 6 kg/cm² durante un minuto haciendo impactar las partículas con un ángulo de incidencia de 45º a una distancia de 130 mm de los pins. Se utiliza la granalladora MEGA 4 fabricada por Abrasivos y Maquinaria S.A., mostrada en la figura 33.



Figura 33. Granalladora MEGA 4.

Limpieza y desengrase

Como consecuencia de la operación de granallado y del estado anterior de las muestras, estas presentan suciedad superficial en forma de suciedad, grasa o suciedad acumulada en las cavidades formadas durante el granallado. Para la limpieza de los pins se ha hecho uso de la técnica de ultrasonidos.

La técnica de ultrasonidos consiste en la emisión de ondas ultrasónicas en un medio con agua destilada donde está depositada la muestra a limpiar. Las ondas son transmitidas de forma uniforme en todo el depósito de agua y al impactar con la muestra provocan una serie de implosiones sobre la superficie de la muestra consiguiendo eliminar de forma completa la suciedad y grasa tanto superficial como la alojada en las cavidades. Esta técnica resulta ventajosa frente a los métodos de limpieza tradicionales

ya que se consigue una limpieza a nivel microscópica así como un ahorro en el tiempo de limpieza.

Para limpiar los pins de este trabajo se ha utilizado un equipo de ultrasonidos Branson 2210 (Fig. 34). Se introduce el pin a limpiar en un recipiente de cristal que contiene acetona y este es introducido en el equipo y se deja actuar durante 5 minutos. En este caso la muestra a limpiar no entra en contacto directo con el agua destilada y las ondas ultrasónicas se transmiten a través de la acetona, la cual ayuda a en la operación de desengrasar.



Figura 34. Equipo de limpieza por ultrasonidos Branson 2210

1.4.3.2 Proyección térmica

Para poder depositar los recubrimientos que son objeto de estudio de este proyecto se hace uso de la técnica de proyección térmica. En este apartado se explicarán las diferentes operaciones que implica esta técnica, desde la preparación de los polvos del recubrimiento hasta la refusión del recubrimiento proyectado.

Preparación de los recubrimientos

Por una parte, el los polvos del recubrimiento de NiCrBSi se obtienen directamente de forma comercial, por lo que el recubrimiento no modificado ya estaría preparado para ser proyectado. Por otra parte, el recubrimiento modificado está formado por NiCrBSi+Alúmina por lo que es necesario obtener dicha mezcla ya que cada producto se obtiene comercialmente de forma separada.

Para la obtención de la mezcla del recubrimiento modificado se hará uso de la mezcladora WAB Turbula (Fig. 35). Esta mezcladora es capaz de realizar un mezclado de alta homogeneidad, rápido y suave gracias a la cinemática de inversión utilizada en el mezclado. Este método no genera segregación debido al movimiento tridimensional del sistema ya que combina movimientos rotacionales en forma de ocho y mediante un movimiento rítmico y pulsante se van colocando las sustancias.

Este mezclador permite obtener mezclas de polvos de diferente densidad, forma, tamaño y concentración. Además resulta ventajoso frente a los mezcladores cilíndricos, de cinta, en V o doble cono ya que su tiempo de operación es menor y presenta mayor fiabilidad.

Para llevar a cabo la operación de mezclado se depositan los polvos de NiCrBSi y la alúmina micrométrica en un recipiente de plástico cerrado y se introducen en la mezcladora, dejándola trabajar durante 24 horas a 300 rpm.



Figura 35. Mezclador rotacional WAB Turbula

Proyección térmica por llama (Oxy-fuel)

Para la proyección de los recubrimientos sobre los pins se utiliza la proyección térmica por llama oxiacetilénica, técnica descrita en el apartado 1.3.3 “Proyección térmica”. La elección de esta técnica reside en por una parte por la adecuación de esta técnica con la naturaleza compuesta de los materiales proyectados, ya que al usar otro tipo de proyección térmica, como por ejemplo por láser, el recubrimiento podría acabar siendo quemada por las altas temperaturas de la operación. Por otro lado, la proyección por oxy-fuel resulta una técnica de gran practicidad así como de baja economía. Para ello se utiliza una pistola Castodyn DS 8000 de la empresa Castolin Eutectics S.A.

En la figura 36 podemos observar una imagen de la pistola utilizada y en la tabla 11 se indican los diferentes componentes de esta:

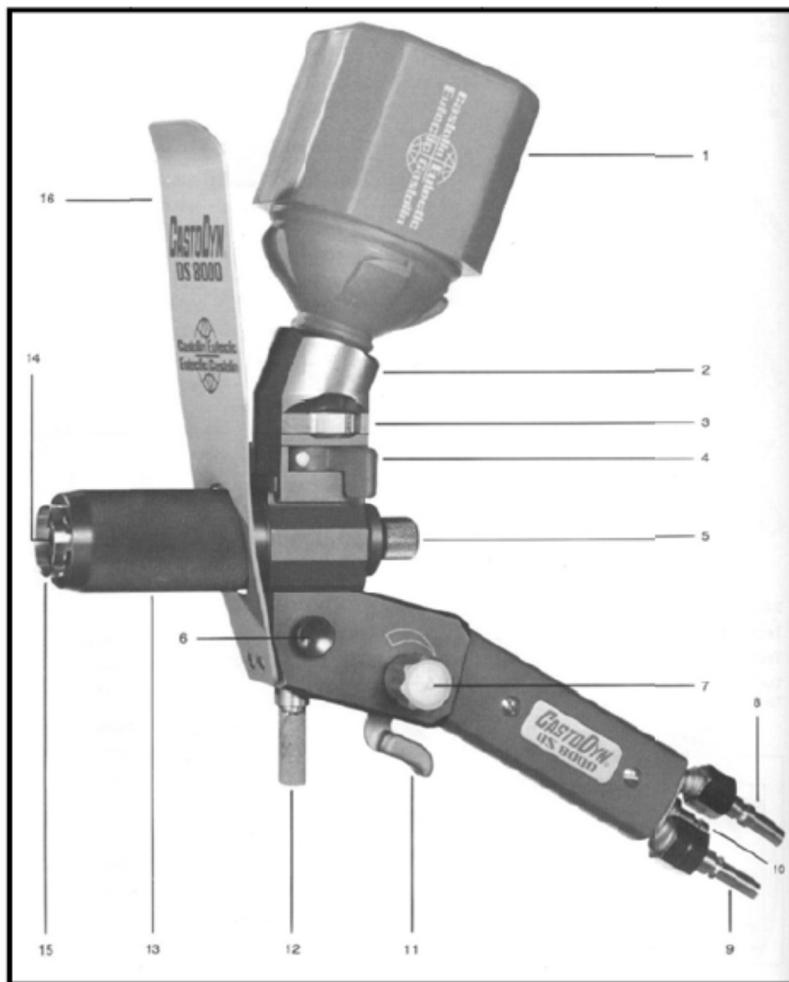


Figura 36. Pistola de proyección térmica Castodyn DS 8000.

Nº componente	Descripción
1	Tolva de alimentación de polvos
2	Acoplamiento para la alimentación de polvos
3	Diafragma de control de flujo de polvo (6 posiciones)
4	Obturador. Permite el montaje/desmontaje de la tolva contenedora de polvo
5	Inyector de polvo. Determina la velocidad de flujo del gas de transporte del polvo
6	Válvula de aire comprimido
7	Válvula de acetileno. Permite ajustar el flujo de acetileno para obtención del tipo de llama deseada (oxidante, carburante o neutra)
8	Conector de oxígeno
9	Conector de acetileno
10	Conector de aire comprimido
11	Válvula de desconexión rápida de oxígeno y acetileno
12	Perno de sujeción
13	Cubierta de la boquilla
14	Boquilla de la llama. Sirve para introducir el polvo en la llama
15	Boquilla de inyección
16	Escudo térmico

Tabla 11. Componentes pistola de proyección térmica Castodyn DS 8000.

Tal y como se desarrolló en el apartado 1.3.3 “Proyección térmica”, se utiliza como combustible el acetileno y junto con oxígeno se obtiene la llama. El polvo de recubrimiento se ubica en el depósito que tiene la pistola que es suministrado a la llama y por medio de aire a presión en la boca de la pistola se proyecta el recubrimiento fundido a gran velocidad sobre el pin. En la imagen 37 se observa la operación de proyección térmica con una pistola oxy-fuel.

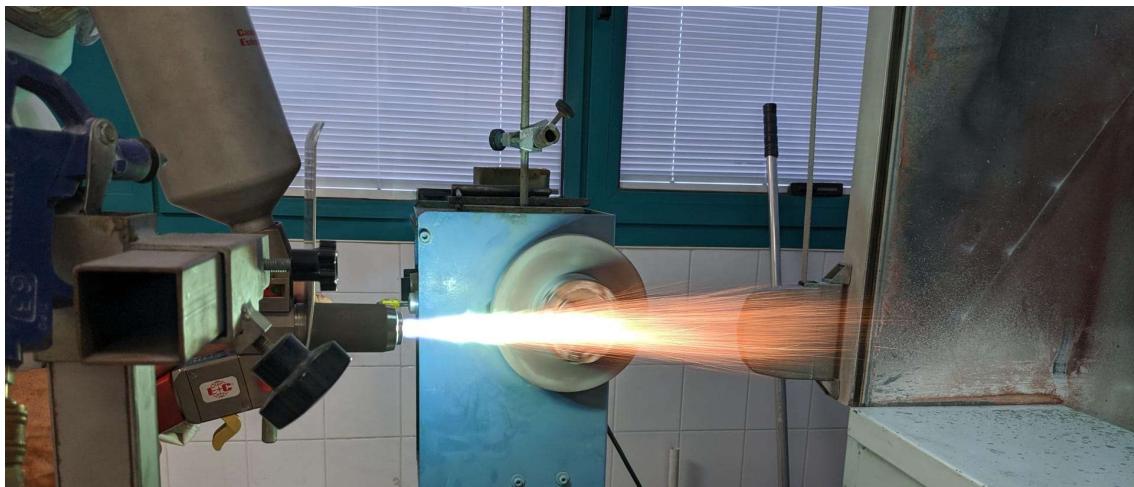


Figura 37. Operación de proyección térmica oxy-fuel

Es posible modificar y controlar la llama con la válvula que regula el paso del flujo del acetileno (fig. 38) pudiendo obtener una llama más oxidante o carburante. Además, se dispone de una palanca de cierre rápido que permite cortar el paso total de los gases y así detener el equipo (fig. 39).



Figura 38. Válvula caudal gases

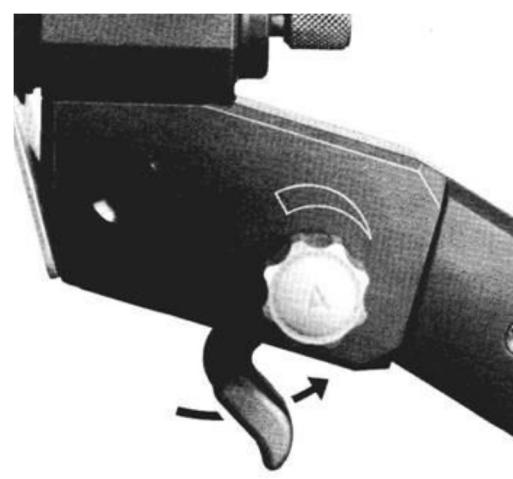


Figura 39 . Palanca de cierre rápido

En la tabla 12 se muestran los parámetros de operación utilizados en la proyección térmica de ambos tipos de recubrimiento:

Velocidad pistola (mm/s)	Temperatura (oC)	N.º de pasadas de proyección sección transversal	Distancia de proyección (mm)	Presión acetileno (bar)	Presión oxígeno (bar)	Presión aire (bar)	Tipo de llama
67,5	3000	5	120	0,7	4	2,5	Neutra

Tabla 12. Parámetros de proyección térmica por llama.

En la figura 40 se muestra como ha quedado la muestra tras ser rociada por el recubrimiento de NiCrBSi.



Figura 40. Pin con recubrimiento de NiCrBSi tras la proyección por oxy-fuel

Refusión

Después de la proyección del recubrimiento sobre los pins, estos son sometidos a una operación de refusión de forma que se disminuye en gran medida la porosidad del recubrimiento, la cual suele ser elevada debido a la proyección oxiacetilénica, aumentando así la densidad del recubrimiento además de la fuerza de adherencia entre el recubrimiento y el sustrato. También se consigue homogeneizar las fases formada en el recubrimiento.

El proceso de refusión (Fig. 42) se lleva a cabo aplicando una llama oxiacetilénica sobre los pins a una temperatura entre los 927 y los 1127 a una velocidad de disparo de partículas de 150 mm/min. De esta forma se consigue que el recubrimiento este en una fase intermedia entre la líquida y la sólida, fase en la que los procesos de difusión tienen lugar. Tras la refusión se obtienen recubrimientos de 1,5 mm de espesor.



Figura 41. Refusión por llama oxiacetilénica

En la figura 42 se muestra los pins después de haber completado la operación de refusión. Se puede notar que los pins que contienen alúmina tienen un color más claro que los pins con el recubrimiento comercial.



Figura 42. Izquierda: Pins con recubrimiento de NiCrBSi tras la refusión.
 Derecha:Pins con recubrimiento de NiCrBSi+alúmina tras la refusión

1.4.3.3 Desbaste y pulido

Para llevar a cabo el estudio de durezas, microestructuras y el ensayo de rozamiento de los pins con recubrimiento previamente será necesario el desbaste y pulido de una pequeña superficie de los pins que será objeto de estudio de las siguientes fases mencionadas. Esto se hace para conseguir una superficie lisa y plana ya que el proceso con el proceso de proyección térmica se obtiene un acabado de alta rugosidad lo cual actúa como concentrador de tensiones afectando así a la vida de los pins. Además, el desbaste permite obtener una superficie plana y perpendicular respecto al eje de los pins que permitirá llevar a cabo el ensayo de rozamiento.

El desbaste se llevará a cabo en 4 etapas mediante cuatro diferentes desbastadoras Buehler Metasav 2000 (fig. 43). Las devastadoras poseen discos abrasivos de SiC con granulometrías de 240, 400, 800 y 1200 mm² respectivamente. La

primera etapa corresponde a la granulometría de 1200 mm² y siguiendo el resto de etapas con un tamaño de granulometría descendiente. Con las primeras etapas se arranca más cantidad de material mientras que con las últimas se obtiene un acabado superficial más elevado. Los discos girarán a una velocidad de 150 rpm y a lo largo de la operación de desbaste se rociará agua al disco para a modo de refrigerante.



Figura 43. Desbastadora Metaserv 2000.

A continuación del desbaste de lleva a cabo el pulido de la superficie desbastada. Mediante el pulido se consigue reducir la rugosidad superficial hasta niveles tolerados para llevar a cabo el ensayo de rozamiento. También permite eliminar la deformación producida en la superficie durante la operación de desbaste. La operación de pulido se llevará a cabo en 2 etapas con dos pulidoras Buehler Metaserv (Fig. 44 y 45). En la primera pulidora se emplea un abrasivo de pasta de diamante y aceite a modo de refrigerante. En la segunda se utiliza partículas de alúmina como agente abrasivo y agua como medio refrigerante. Ambas etapas de pulido se lleva a cabo a una velocidad de rotación de 200 rpm.



Figura 44. Pulidora Buehler Metaserv

con pasta de diamante

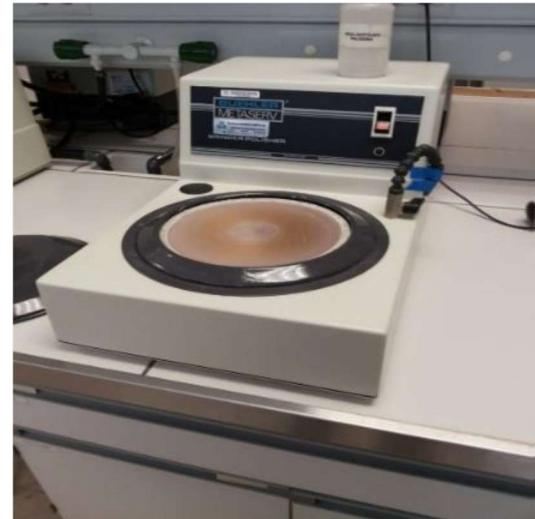


Figura 45. Pulidora Buehler Metaserv

con partículas de alúmina

En la figura 46 se muestra el resultado obtenido después de aplicar las operaciones de desbaste y pulido. Se puede observar cómo tras aplicar estos procesos se ha obtenido una superficie plana y brillante con la que ya es posible realizar el ensayo de rozamiento.



Figura 46. Muestra de NiCrBSi (izquierda) y muestra de NiCrBSi+alúmina pulida (derecha)

1.4.3.4 Ensayo de rozamiento en medio lubricado

Una vez obtenida el área de trabajo en los pins mediante los pasos previos, ya es posible realizar el ensayo de rozamiento. Este ensayo se llevará a cabo con el tribómetro tal y como se ha explicado en el apartado 1.4.1.1 “Tribómetro Plint&Partners TE 79” y se aplicará tanto sobre la muestra con recubrimiento convencional como sobre la muestra con recubrimiento modificado, de forma que se obtienen unos resultados para cada pin que posteriormente serán analizados y comparados.

Este ensayo de rozamiento en medio lubricado consiste en una prueba de rozamiento acumulado con diferentes cargas y velocidades de rotación. El radio de la pista de rodadura será de 35 mm para todo el ensayo. Las cargas que se aplicarán durante el ensayo serán de 3, 6, 9, 15 y 20 N y las velocidades de 10, 20, 30, 40, 50 y 60 rpm. El ensayo comenzará desde la velocidad más baja hasta la más alta para cada uno de los pesos, desde el más liviano hasta el más pesado. Primero se comenzará con la carga de 3N a 10 rpm y se tomará la medida del rozamiento cuando el pin haya deslizado 8 metros y a los 10 metros se aumentará a la siguiente velocidad repitiendo el procedimiento y así sucesivamente para todas las velocidades. Las medidas del rozamiento deberán ser tomadas si el valor de rozamiento que proyecta el programa es estable. En caso contrario, la medida no podrá ser tomada y esto será indicio de que existe un problema en el contacto entre el pin y el disco, lo cual tendrá que ser solucionado. Una vez que se hayan tomado las diferentes medidas de rozamiento a las diferentes velocidades se detiene el tribómetro y se aumenta la carga, repitiendo así el procedimiento descrito. En total se anotarán 30 valores de rozamiento y el pin habrá deslizado 300 metros sobre la pista de rodadura.

En la tabla 13 se pueden observar los parámetros usados en el ensayo:

Cargas aplicadas (N)	3	6	9	15	20
Velocidades de rotación (RPM)	10	20	30	40	50
Temperatura de ensayo (°C)	22 (ambiental)				
Lubricante	CUT-MAX 7-26				
Humedad relativa (%)	48 (ambiental)				
Radio pista de rodadura (mm)	35				

Tabla 13. Parámetros de operación en ensayo de rozamiento

El ensayo se llevará a cabo acorde al principio de funcionamiento del tribómetro, descrito en el apartado 1.4.1.1 “Tribómetro Plint&Partners TE 79”. La operación con el tribómetro se realizará como se explica a continuación:

1. Antes de ubicar el pin en tribómetro habrá que someterlo a una limpieza por ultrasonidos siguiendo el mismo procedimiento anteriormente realizado. Una vez limpio y seco, se toma medida del peso del pin en una balanza. Esta medida será la masa inicial el pin
2. A continuación se prepara el equipo del tribómetro para llevar a cabo el ensayo. Se coloca el pin en el brazo y fijándolo al sistema de sujeción. Fijado el pin se introduce en la interfaz del software la distancia R del pin al centro del disco de la pista de rodadura. Esta distancia será el punto en el que contacte el pin con el disco.

3. Posteriormente se aplica la carga deseada, tal como se ha descrito anteriormente. Se añade el aceite lubricante en la pista de rodadura y después se coloca la caja de protección de metacrilato. Con el programa se mueve el brazo articulado a la posición de operación, entrando en contacto el pin con la pista de rodadura. Ahora se ajusta el offset del coeficiente de rozamiento para que el programa nos muestre un rozamiento de 0 al inicio del ensayo y se indica la velocidad deseada, según lo explicado anteriormente, y se inicia la marcha del disco (Fig. 47).
4. Una vez finalizado habiendo procedido según lo explicado, se extrae el pin del brazo y se limpiará con ultrasonidos. Finalmente se vuelve a tomar notación del peso del pin.

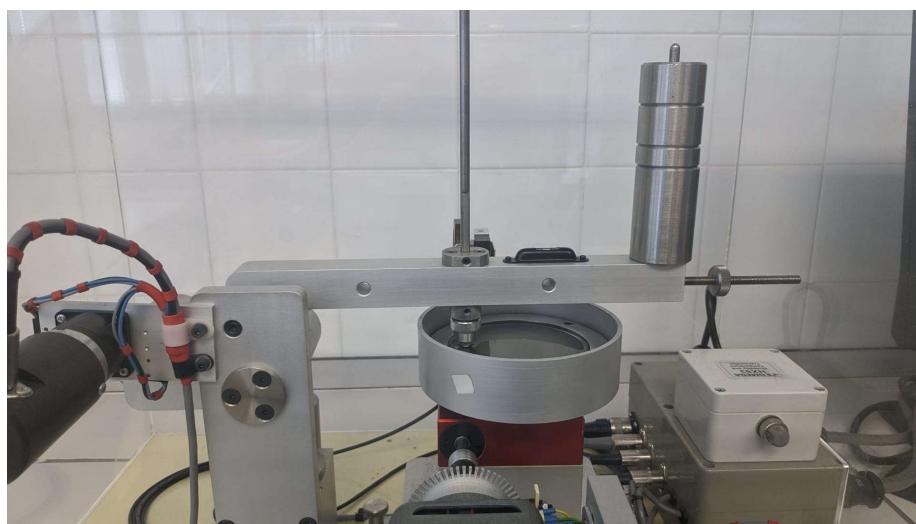


Figura 47. Ensayo de fricción en medios lubricados.

Este ensayo se realizará de forma exacta tanto para el pin con recubrimiento NiCrBSi convencional como para el pin con recubrimiento NiCrBSi+alúmina. Las condiciones del ensayo serán a condiciones ambientales.

Para medir el peso de las muestras se utilizará una báscula de precisión (Fig. 48), cuya sensibilidad tendrá que ser menor a 0,1 mg. La operación de pesado deberá hacerse de forma muy minuciosa evitando cualquier ruido o perturbación a la hora de pesar las muestras, ya que la pérdida de masa que sufre en pin a lo largo del ensayo de rozamiento es de valores muy pequeños, por lo que cualquier error podría dar lugar a grandes desviaciones del valor real.



Figura 48. Báscula de precisión usada.

1.4.3.5 Ensayo de microdureza

Para poder llevar a cabo el ensayo de microdurezas antes será necesario preparar las muestras, de forma que habrá que cortar los pins para poder acceder a las capas internas de material, se embutirán, se desbastarán y pulirán y finalmente se medirá la dureza de las diferentes capas de material del pin por medio de un microdurómetro. Este ensayo se realizará tanto para la muestra con el recubrimiento convencional como para la del recubrimiento modificado.

Corte

Una vez realizado el ensayo de rozamiento, se realiza una sección transversal de los pins mediante una máquina de corte de precisión. La máquina usada en esta operación ha sido una Buehler ISOMET Low speed Saw, mostrada en la figura 49. Para esta operación se ha hecho uso de un disco de corte de diamante con una carga de 75 gr. Es necesario usar un líquido refrigerante para esta operación, concretamente se ha hecho uso de una emulsión de aceite ISOCUT FLUID con agua destilada.

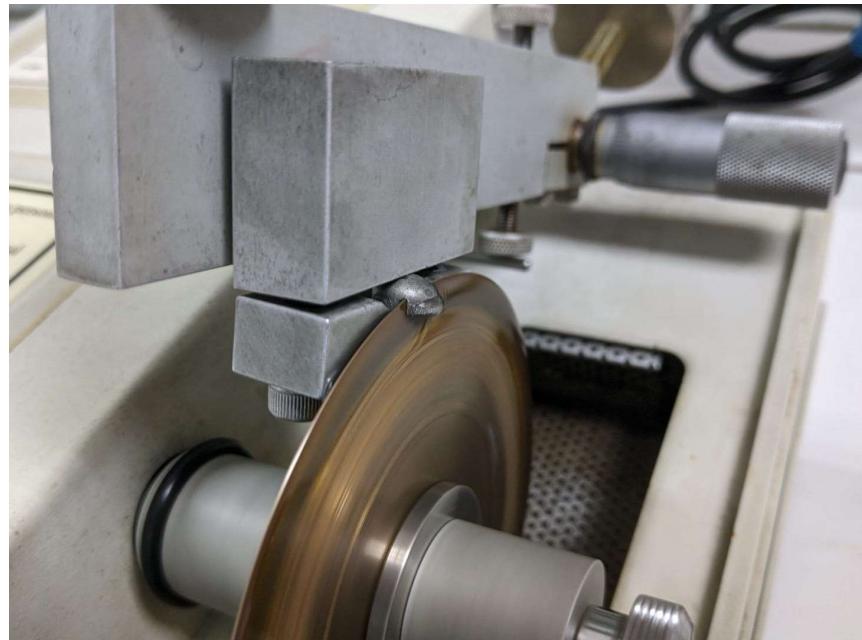


Figura 49. Operación de corte por disco Buehler ISOMET

Embutición

Para poder analizar las muestras con un microdurámetro es necesario embutir las muestras cortadas en metacrilato, dejando al descubierto la cara cortada de los pins. La embutición se lleva a cabo con una embutidora Buehler Metaserv (Fig. 50).



Figura 50. Equipo de embutición Buehler Metaserv

El proceso de embutición consiste en introducir el pin seccionado con la cara seccionada hacia abajo, que es la que se desea dejar visible, en el alojamiento del equipo. Se añade encima de la muestra metacrilato en polvo (3 cucharadas), una etiqueta identificativa de la muestra y otra cucharada de metacrilato. Seguidamente se tapa el alojamiento, se pone en marcha una resistencia y se aplica presión con una palanca que actúa la prensa aplicando una presión de 1000 psi durante 15 minutos. A lo largo de esta operación la presión disminuirá por lo tanto habrá que controlar que la presión no descienda de 500 psi y en caso de hacerlo habrá que añadir más presión manteniéndola siempre entre 500 y 1000 psi. La resistencia calienta los elementos introducidos en la máquina a una temperatura de 170°C, la cual es superior a la temperatura de transición vítrea del metacrilato, por lo que este se fundirá. Una vez transcurrido el tiempo se apagará la resistencia y se aumentará la presión hasta los 3000 psi. A medida que disminuye la presión se conectarán un sistema de refrigeración por agua y se dejará actuar por 10 minutos. Pasado el tiempo se desbloquea la prensa y se extra la pieza embutida en metacrilato, mostrada en la figura 51.



Figura 51. Muestra embutida en metacrilato

Desbaste y pulido

El desbaste y pulido de la muestra embutida se hace como ya se explicó en los pasos previos para la preparación de las muestras, con los mismos equipos y parámetros de operación. La finalidad de esta operación es eliminar las capas de óxido presentes en la superficie expuesta del material.

Estudio de microdurezas Vickers

El estudio de microdurezas Vickers permite medir la dureza de la mayoría de los elementos metálicos independientemente de su estado o espesor, lo que este método sea muy práctico.

Este método consiste en impactar un penetrador de diamante de geometría piramidal cuadrada y de tamaño reducido sobre la superficie a medir con un ángulo de 136°. En nuestro caso se aplicará una carga de 200 gr durante 20 segundos. Como resultado de la penetración del penetrador sobre la muestra queda una marca sobre la muestra. Mediante la longitud de las diagonales de dicha marca y la carga aplicada es posible calcular la dureza de la zona analizada mediante la siguiente fórmula matemática:

$$HV = \frac{1,854 \cdot P}{d^2} \quad (17)$$

donde P es la carga aplicada medida en kgf y d es la media de las dos diagonales de la huella medida en mm.

La dureza Vickers se identifica con las letras HV. La nomenclatura que se utiliza para escribir los valores de durezas es HV/P/t, donde P es la carga utilizada medida en gramos y t es el tiempo de permanencia de la huella de diamante con unidades de segundo.

Debido a que la marca que el penetrador de diamante produce sobre la muestra es de un tamaño menosciable, este ensayo se considera como no destructivo.

Además, a partir del valor de la dureza se pueden conocer otras propiedades mecánicas como por ejemplo es el módulo de elasticidad, la resistencia mecánica, etc. También se utiliza para obtener el volumen perdido durante los ensayos de desgaste abrasivo.

En la figura 52 se puede observar una representación de la geometría del penetrador de diamante así como la marca que deja el indentador sobre la superficie de la muestra.



Figura 52. Representación indentador

.Para llevar a cabo el estudio de microdurezas se utiliza el microdurómetro Buehler Micromet 1 (Fig. 53)



Figura 53. Microdurómetro Vickers Micromet 1

1.4.3.6 Análisis de la microestructura

Para poder estudiar la microestructura de las muestras es necesario prepararlas previamente. Se lleva a cabo un ataque químico sobre la superficie expuesta mediante una solución de 1 HCl, 10 HNO₃ y 10 H₂O.

Posteriormente se analiza la microestructura mediante un microscopio electrónico de barrido mediante espectroscopia de energía dispersiva (SEM-EDS) (Fig. 54) que proporciona imágenes detalladas de alta resolución de la muestra mediante un haz de electrones enfocado sobre superficie y la detección de señales de electrones secundarios o retrodispersados. También se utiliza un analizador de rayos X de dispersión de energía (EDX o EDA) que permite la identificación de los elementos y otorga información cuantitativa de la composición.



Figura 54. Microscopio electrónico de barrido SEM ubicado en el edificio de investigación del Campus del Río Seco de la Universitat Jaume I

Mediante estas técnicas se llevará a cabo un análisis de las microestructuras de ambos recubrimiento. También se harán análisis semicuantitativos de ambos recubrimientos así como un mapping de la muestra de NiCrBSi+alúmina. El mapping consiste en analizar la distribución espacial de los elementos constituyentes de las muestras de forma que ayuda a entender la distribución de las fases formadas así como las propiedades mecánicas.

1.5 Resultados

A lo largo de este apartado se presentan los resultados obtenidos a lo largo de este proyecto. A modo de simplificación a lo largo de este apartado se hará referencia al pin con el recubrimiento de NiCrBSi comercial como R, mientras que el pin con el recubrimiento de NiCrbSi+alúmina será llamado R'.

1.5.1 Caracterización de la microestructura

1.5.1.1 Caracterización de la microestructura, muestra R

Antes de estudiar la dureza y el comportamiento tribológico de los recubrimientos conviene llevar a cabo un estudio de la microestructura de las muestras R y R'. Analizar la microestructura de ambos recubrimientos permite la identificación de las fases formadas en la microestructura, tamaño, morfología, distribución de precipitados duros sobre la matriz blanda de Ni-Cr y concentración de los constituyentes de las fases formadas. De esta forma será posible comprender y justificar los valores que se obtendrán en los ensayos posteriores de dureza y rozamiento relacionándolos con la microestructura de cada muestra. Para el estudio de la microestructura se ha empleado la técnica de microscopía electrónica de barrido SEM.

En las figuras 55 y 56 se muestran las imágenes SEM a 35 y 1.000 aumentos respectivamente del recubrimiento de NiCrBSi convencional de la muestra R. El recubrimiento presenta un alto grado de homogeneidad y la ausencia de los límites del splat gracias a la refusión realizada. Sin embargo, la microestructura presenta un grado de porosidad medio-bajo. La baja velocidad de las partículas característica del proceso de proyección térmica por llama provoca que algunas partículas no se esparzan bien en el momento del impacto sobre el sustrato y como consecuencia de esto se produce, poros en el recubrimiento. Esto podría ser remediado con una técnica de refusión más avanzada, por ejemplo, la refusión por láser, lo que mejoraría las características mecánicas a alta temperatura y resistencia al desgaste. Además, tampoco se produce una unión metálica continua entre el recubrimiento y el sustrato debido al uso de la refusión por llama [15].

En la figura 55 se observa una buena adherencia y continuidad entre el sustrato y el recubrimiento (ausencia de discontinuidades físicas o delaminación). Esto es indicativo de que los parámetros de proyección térmica seleccionados han sido correctos así como los de la refusión.

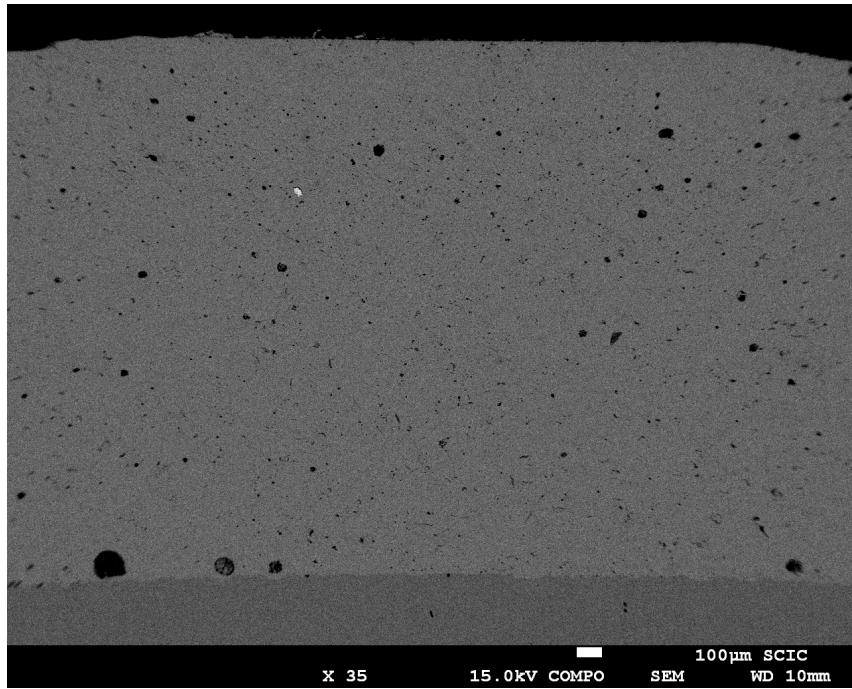


Figura 55. Imagen SEM a 35 aumentos del recubrimiento de NiCrBSi de la muestra R.

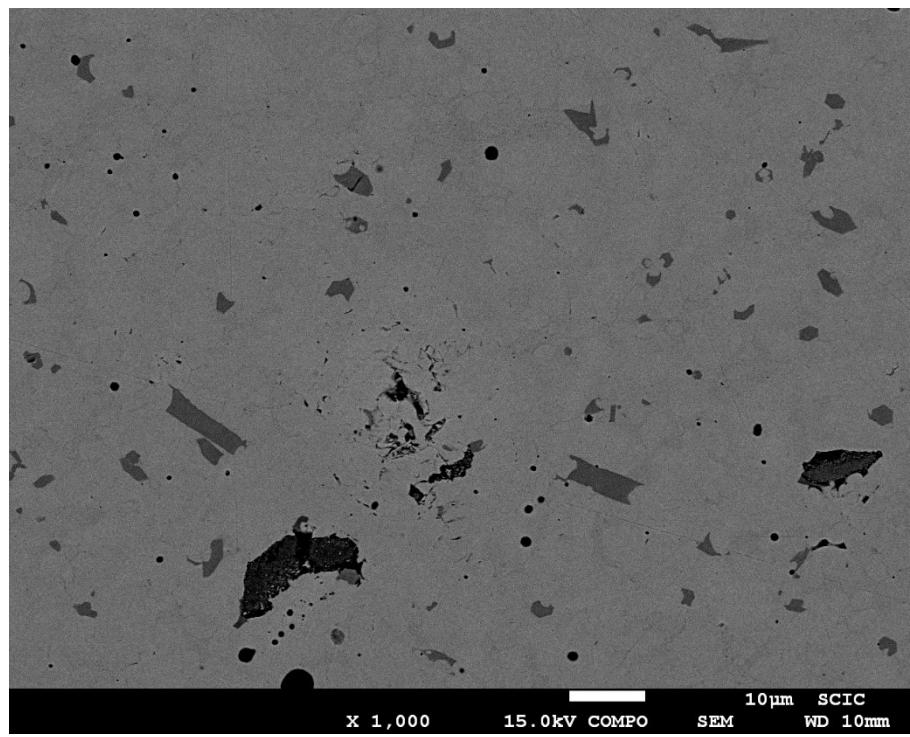


Figura 56. Imagen SEM a 1.000 aumentos del recubrimiento de NiCrBSi de la muestra R.

Análisis semicuantitativo

Como parte del estudio de la microestructura se ha hecho un análisis de la microestructura mediante EDX del recubrimiento de NiCrBSi convencional de la muestra R para poder analizar de forma más exhaustiva las fases que se forman en este recubrimiento. Para ello, en la figura 57 se muestra una micrografía a 7.500 aumentos de la muestra R. Se puede identificar la presencia de precipitados con una forma poligonal irregular de vértices agudos y alargados repartidos por la matriz blanda de Ni-Cr.

Mediante el análisis RX por puntos es posible realizar un análisis semicuantitativo y determinar los elementos que forman las fases que presenta el recubrimiento. Dichos elementos están recogidos en la tabla 14 en la que se muestran los espectros de diferentes puntos analizados de la micrografía.

En el espectro 1 se analiza una fase de morfología irregular y alargada con un alto contenido en cromo y carbono, 61,43% y 21,23% respectivamente, lo que es indicativo que es un precipitado de carburo de cromo. Por otra parte, presenta un bajo contenido en níquel, 17,34%, que pertenece a la matriz blanda de Ni-Cr.

Los espectros 2 y 3 analizan precipitados con una morfología poligonal irregular de vértices agudos y alargados y atendiendo a su composición se puede asumir que son fases de carburos de cromo al igual que en el espectro 1, ya que presentan un alto contenido en cromo y carbón y un bajo contenido en cromo, que forma parte de la matriz blanda de Ni-Cr. El espectro 4 sigue la misma tendencia que los espectros anteriores, aunque su contenido en níquel es ligeramente superior, además de presentar una morfología amorfa.

El espectro 5 presenta contenido de níquel muy elevado del 74,94% y del 6,25% de cromo por lo que se puede afirmar que esta fase representa la matriz blanda de Ni-Cr.

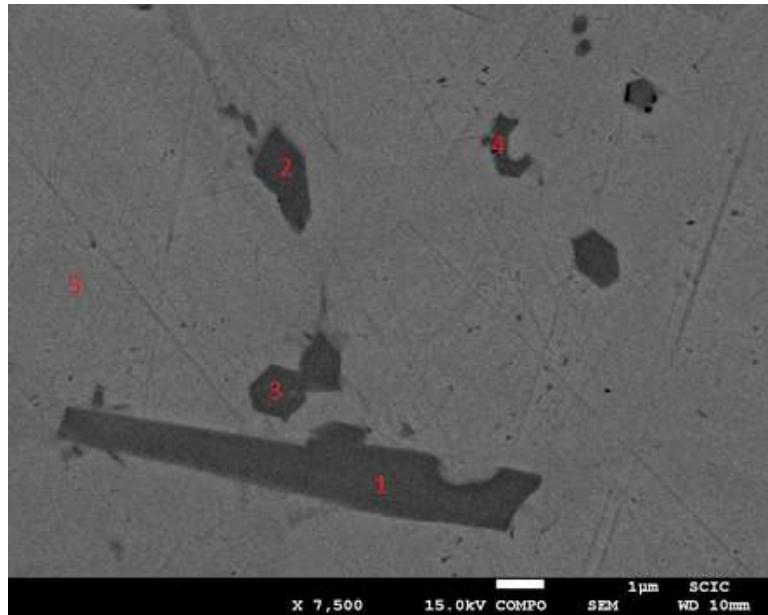


Figura 57. Imagen SEM a 7.500 aumentos del recubrimiento de NiCrBSi de la muestra R.

Espectro	Elemento (%)					
	Ni	Cr	B	Si	Fe	C
1	17,34	61,43	-	-	-	21,23
2	17,22	63,15	-	-	-	19,63
3	15,76	64,5	-	-	-	19,74
4	26,14	54,56	-	-	-	19,30
5	74,94	6,25	-	3,66	3,34	11,8

Tabla 14. Análisis semicuantitativo EDAX de la estequiometría del recubrimiento R.

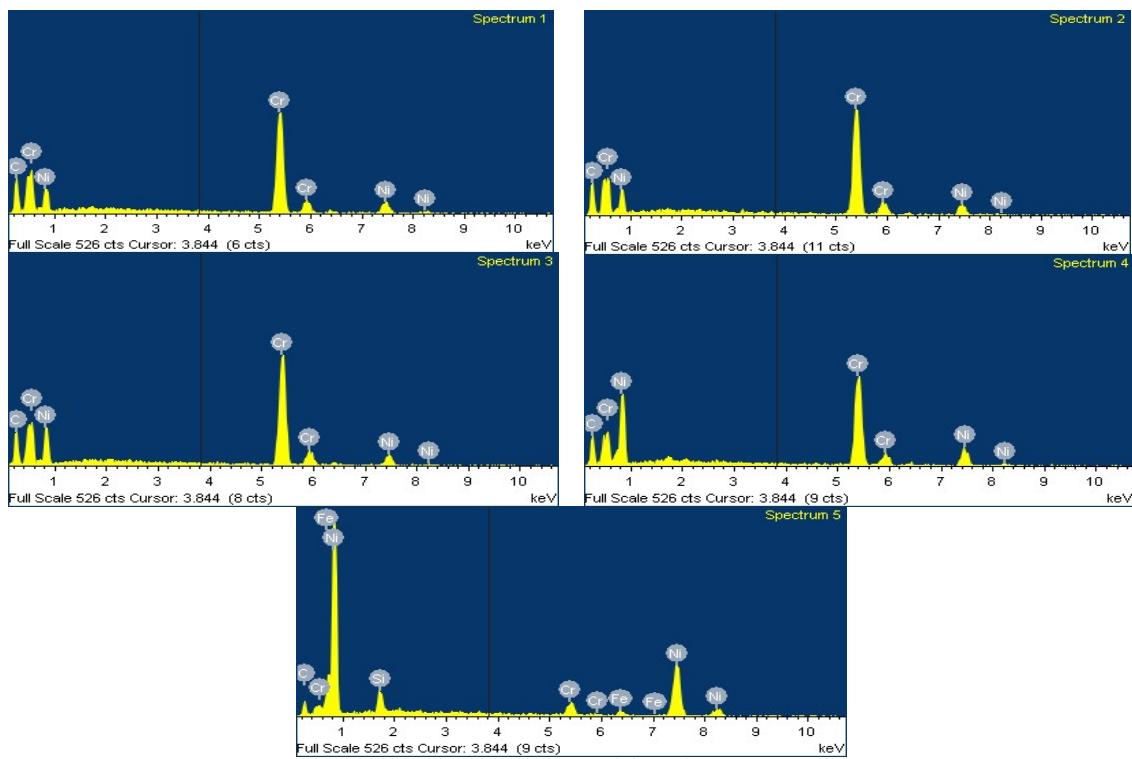


Figura 58. Espectros EDAX del recubrimiento R.

1.5.1.2 Caracterización de la microestructura, muestra R'

En las figuras 59 y 60 se muestran las imágenes SEM a 35 y 1.000 aumentos respectivamente del recubrimiento de NiCrBSi convencional de la muestra R. Al igual que en la muestra R, el recubrimiento R' presenta un alto grado de homogeneidad y la ausencia de los límites del splat gracias a la refusión realizada. Sin embargo, la microestructura presenta un grado de porosidad medio-bajo, que puede ser remediado con una técnica de refusión más avanzada, por ejemplo, la refusión por láser. También se observa una buena adherencia y continuidad entre el sustrato y el recubrimiento (ausencia de discontinuidades físicas o delaminación). Esto es indicativo de que la proyección térmica por llama se ha realizado de forma correcta así como los parámetros de la misma fueron los adecuados. Además, tampoco se produce una unión metálica continua entre el recubrimiento y el sustrato debido al uso de la refusión por llama.

Además de estas propiedades que comparten ambos recubrimientos, ya que ambos están formados por un recubrimiento base de NiCrBSi, en el recubrimiento R' puede observarse una distribución de alúmina con un alto grado de homogeneidad por toda la matriz blanda de Ni-Cr. Esta presencia de alúmina en el recubrimiento mejora las propiedades tanto mecánicas como tribológicas del recubrimiento de NiCrBSi comercial ya que fortalece la matriz blanda de Ni-Cr. Además, las partículas de alúmina suelen presentar una morfología poligonal con forma irregular y vértices agudos que provocan concentraciones de tensiones en los vértices de las mismas confiriendo así mayor dureza a la matriz de Ni-Cr.

Existe una mayor acumulación de Al_2O_3 en las cercanías de la interfase así como precipitados duros de menor tamaño que los formados en la superficie. Este hecho es producido por la tendencia de la alúmina a quedarse atrapada en el interior del recubrimiento como consecuencia del proceso de refusión, ya que las partículas de alúmina son de baja densidad y su punto de fusión es muy alto por lo que durante el proceso de refusión precipitan al fondo del recubrimiento.

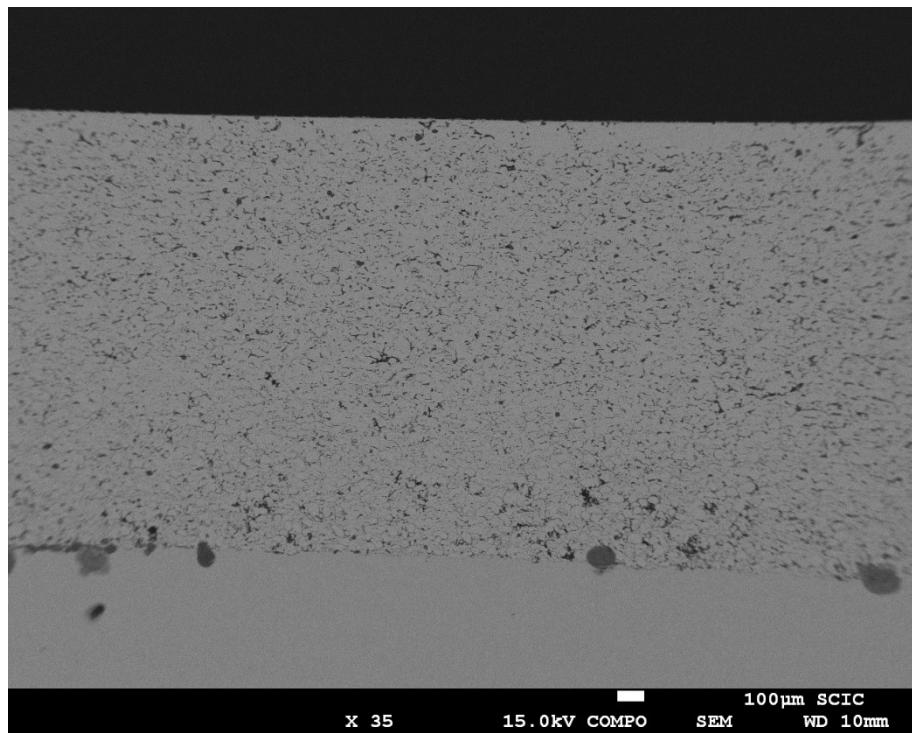


Figura 59. Imagen SEM a 35 aumentos del recubrimiento de NiCrBSi de la muestra R'.

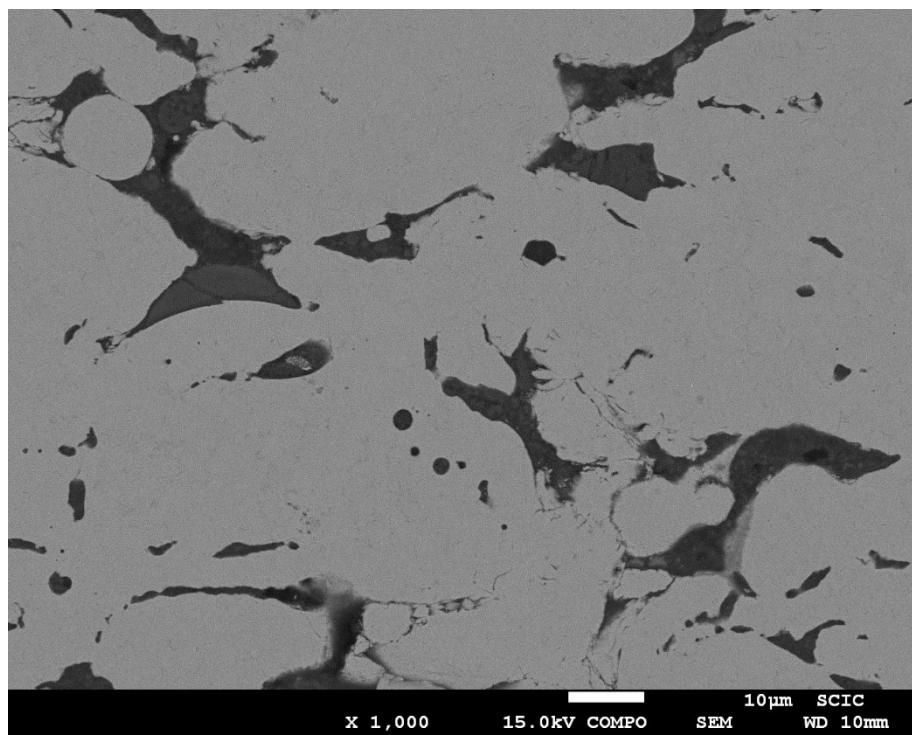


Figura 60. Imagen SEM a 1000 aumentos del recubrimiento de NiCrBSi de la muestra R'.

Análisis semicuantitativo

Del mismo modo se ha hecho un análisis de la microestructura mediante EDX del recubrimiento de NiCrBSi-alúmina de la muestra R' para poder identificar y analizar de forma más exhaustiva las fases que se forman en este recubrimiento como consecuencia de la adición de alúmina al recubrimiento.

En la figura 61 una micrografía a 1.000 aumentos de la muestra R' y en la tabla 15 se recogen los elementos de los diferentes puntos analizados mediante los cuales se realiza un estudio semicuantitativo.

En el espectro 1 se detecta un alto contenido en oxígeno y aluminio, 36,8% y 13,44% respectivamente, lo que es indicativo de que este punto presenta partículas de alúmina. También se detecta un contenido elevado en carbono del 33,27% por lo que también se presentan precipitaciones de carburos en esta zona.

El espectro 2 presenta contenido en níquel muy elevado del 72,99% y del 7,33% de cromo por lo que se puede afirmar que esta fase representa la matriz blanda de Ni-Cr.

Los espectros 3 y 4 presentan valores muy elevados de carbono y aluminio. El espectro 3 muestra un contenido del 60,03% de oxígeno y un 21,39% de aluminio, claro indicativo de la presencia de partículas de alúmina. También hay carbono en un 7,6%, silicio en un 3,93 y cromo en un 7,04%, lo que puede indicar la presencia de carburos de silicio y cromo. El espectro 4 muestra un contenido del 64,87% de oxígeno y un 32,80% de aluminio, que de nuevo son un claro indicio de la presencia de partículas de alúmina.

El espectro 5 muestra un contenido moderado en níquel del 44,07% y del 11,22% en cromo, lo que significa que hay presencia de la matriz blanda de Ni-Cr. También se detecta aluminio en un 7,84% y oxígeno en un 24,39% lo que significa la presencia de alúmina. Existe un 10,60% de carbono y un 1,88% de silicio, pudiéndose formar carburos de silicio, además de carburos de cromo.

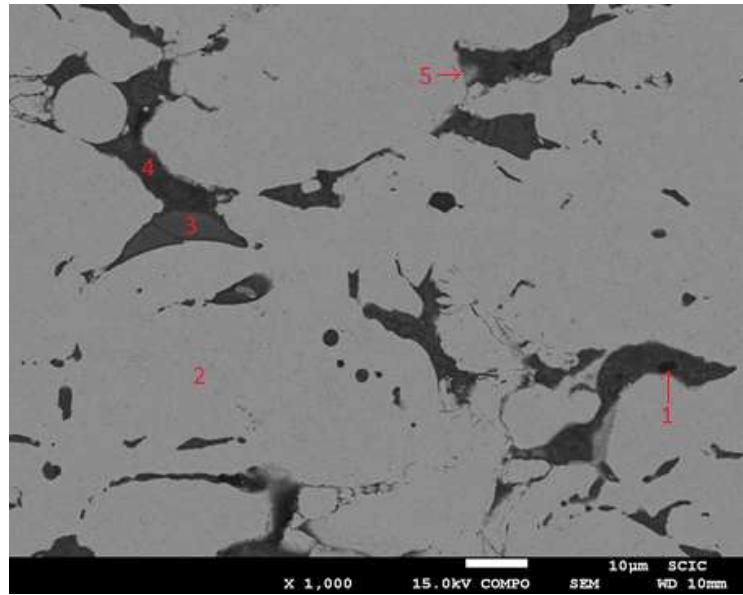


Figura 61. Imagen SEM a 1.000 aumentos del recubrimiento de NiCrBSi de la muestra R'.

Espectro	Elemento (%)							
	Ni	Cr	B	Si	Fe	C	O	Al
1	13,16	3,33	-	-	-	33,27	36,80	13,44
2	72,99	7,33	-	2,82	2,10	14,77	-	-
3	-	7,04	-	3,93	-	7,60	60,03	21,39
4	2,33	-	-	-	-	-	64,87	32,80
5	44,07	11,22	-	1,88		10,60	24,39	7,84

Tabla 155. Análisis semicuantitativo EDAX de la estequiometria del recubrimiento R.

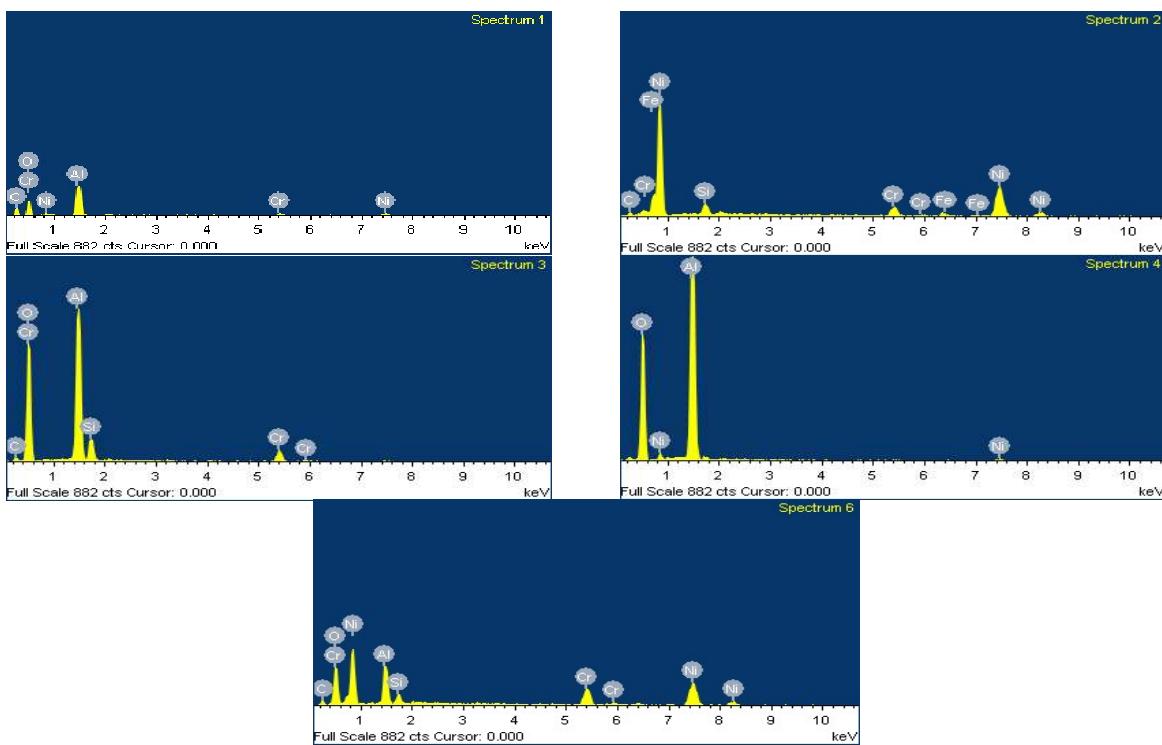


Figura 62. Espectros EDAX del recubrimiento R.

Mapping muestra R'

A continuación se va a realizar un mapping de un detalle de la micrografía anterior, mostrado en la figura 63. Mediante el mapping es posible observar la presencia y como están repartidos los diferentes elementos en el detalle.

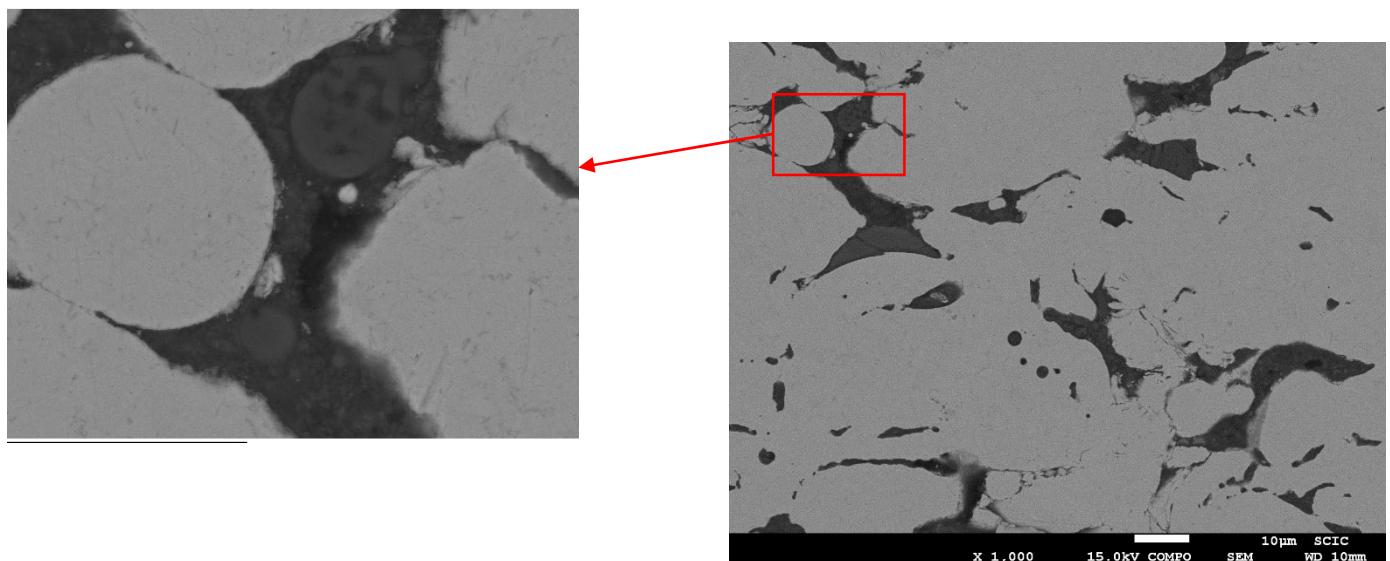


Figura 63. Detalle de micrografía a 1.0000 aumentos del recubrimiento de NiCrBSi de la muestra R'

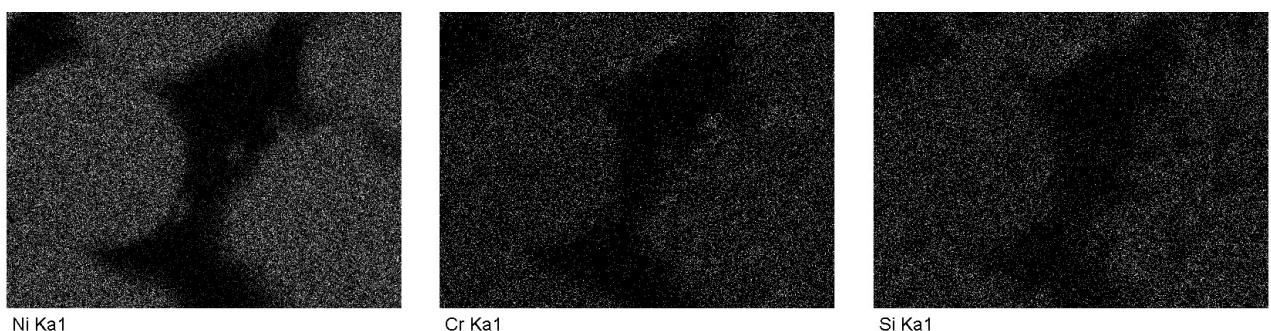


Figura 64. Mapping. Presencia de níquel, cromo y silicio.

En la figura 64 podemos observar como el níquel, cromo y silicio tienen presencia en las mismas zonas de forma mayoritaria. Estas zonas son donde se halla la matriz blanda de Ni-Cr. Esta zona presenta un color claro y es la más abundante en todo el recubrimiento

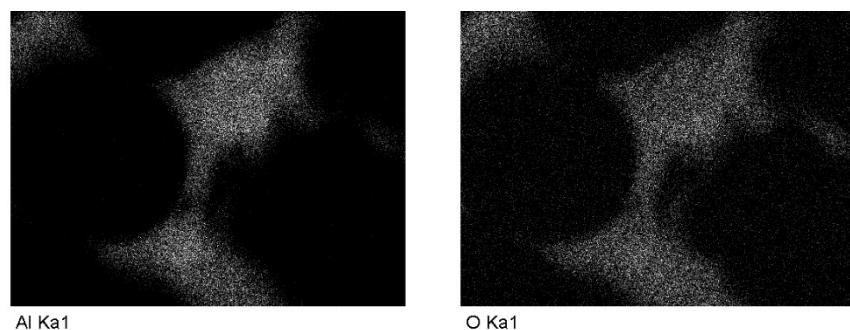


Figura 65. Mapping. Presencia de aluminio y oxígeno.

Podemos observar en la figura 65 que las zonas con presencia de altas concentraciones de aluminio y oxígeno coinciden, dando a entender que es donde se encuentran repartidas las partículas de alúmina.

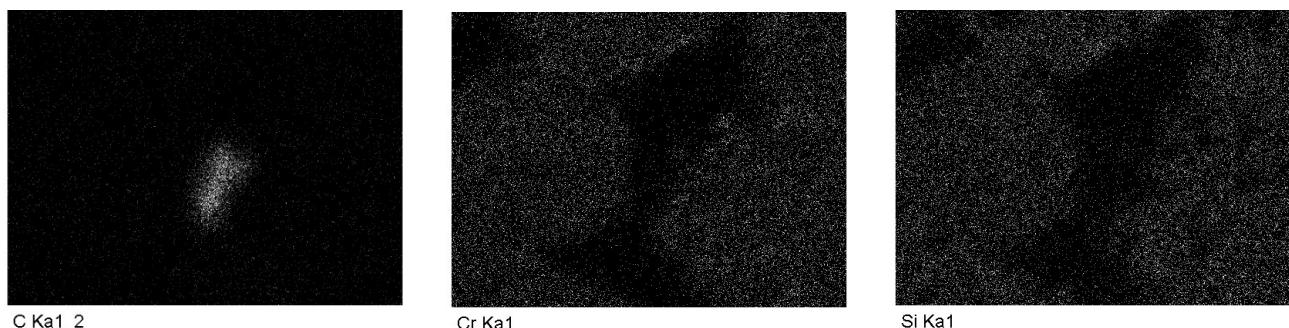


Figura 66. Presencia de carbono, cromo y silicio.

Finalmente, en la figura 66 se observa como en la zona con alta concentración de carbono se observa también la presencia de cromo y silicio, lo que indica que existen precipitaciones de carburos de cromo y silicio en esta zona.

1.5.2 Análisis de durezas

Tal y como se ha explicado en el apartado 1.4.3.5 “Ensayo de microdureza”, se lleva a cabo un ensayo de durezas sobre las muestras R y R' obteniendo así un perfil de durezas para cada muestra. El perfil de durezas permite obtener una representación gráfica de las microdurezas de los recubrimientos y el material base de forma que permite identificar que material es más duro.

En el ensayo de microdurezas Vickers se han tomado 3 medidas en 5 puntos para cada muestra. La toma de medidas comienza en la superficie del recubrimiento, y se van tomando medidas cada 0,5 mm hasta llegar al material base. De cada serie de medidas se obtiene la media (tabla 16) y se representa gráficamente. En la figura 67 se comparan los perfiles de durezas obtenidos.

HV/100/15		
DISTANCIA (MM)	R	R'
0	431	580,4
0,5	393,5	484,3
1	501,9	604,5
1,5	441,7	580,4
2	205	230
2,5	186,5	196

Tabla 16. Perfiles de microdurezas Vickers de las muestras R y R'

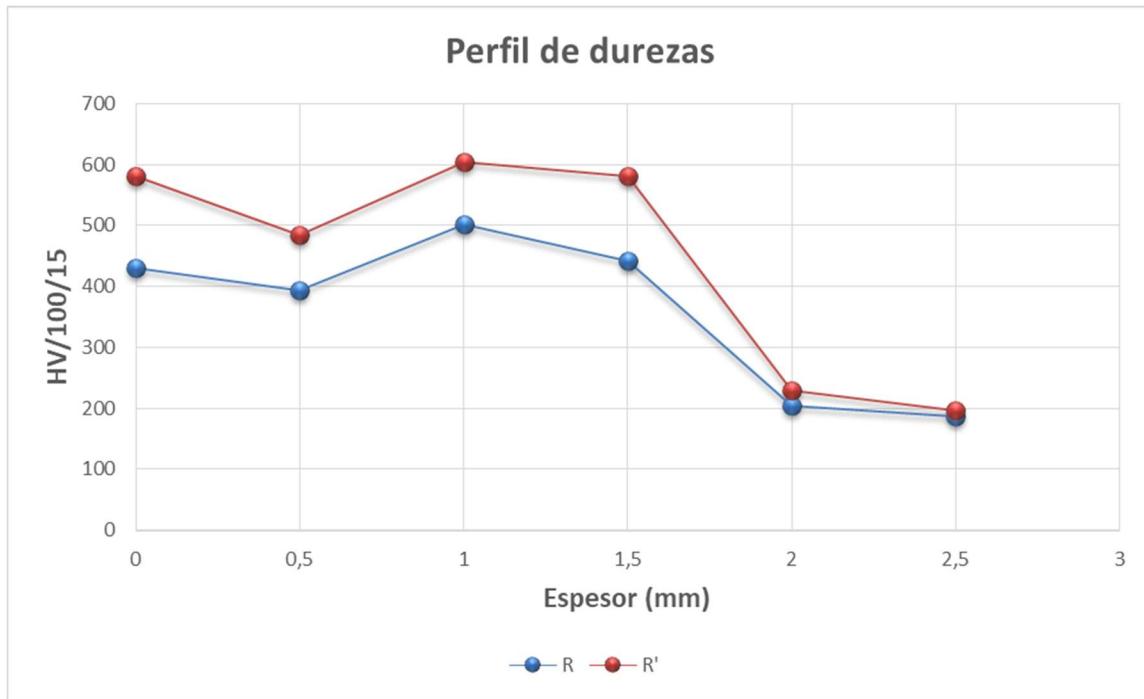


Figura 67. Perfiles de microdurezas Vickers de la sección transversal de los recubrimientos muestras R y R'

En ambos perfiles de durezas podemos diferenciar tres zonas en las que las durezas son más parecidas. La primera zona, hasta 1,5 mm, pertenece al recubrimiento y presenta las durezas más elevadas, la segunda zona, desde 1,5 mm hasta los 2 mm, pertenece a la interfase recubrimiento-material base y donde la dureza desciende desde los altos valores de dureza del recubrimiento hasta los bajos valores de dureza del material base, y finalmente la tercera zona, que empieza en los 2 mm, y pertenece al material base presentando las menores durezas.

Las durezas medias obtenidas para cada recubrimiento son de 436,4HV en el caso de R y 580,4HV en el caso de R'. Comparando los valores de microdurezas de ambos perfiles, es posible observar que existe una notable variación entre la dureza de las muestras R y R' a lo largo de toda la zona del recubrimiento, siendo la dureza de la muestra R' superior en todos los puntos de medida. Se producen dos picos de variación de durezas, a 0 mm existe una variación del 35% y a 1,5 mm se da una variación del 31%. Este aumento de durezas se debe a la presencia de alúmina en los recubrimientos de NiCrBSi, lo que provoca un endurecimiento de la matriz blanda de Ni-Cr así como la formación de pequeños precipitados duros.

1.5.3 Ensayo de rozamiento en medios lubricados.

El ensayo de rozamiento se lleva a cabo según lo descrito en el apartado 1.3.4.3 “Ensayo de rozamiento en medio lubricado” para cada muestra R y R'. Se hace uso del tribómetro Plint & Parters TE 79 con el módulo el módulo P Indexing Pin on Disc Module. El aceite lubricante usado es el CUT-MAX 7-26 con una viscosidad dinámica de 0,002624 kg/ms.

Las condiciones ambientales en las que se lleva a cabo el ensayo son a una temperatura ambiental de 22°C y una humedad relativa del 48% El radio de la pista de rodadura es de 40 mm para todo el ensayo Las cargas que se aplicarán durante el ensayo serán de 3, 6, 9, 15 y 20 N y las velocidades de 10, 20, 30, 40, 50 y 60 rpm. En las tablas 17 y 18 se muestran los valores de los coeficientes de rozamiento obtenidos de cada ensayo respectivamente:

Coeficiente de rozamiento R						
Carga (N)	Velocidad (rpm)					
	10	20	30	40	50	60
3	0,122	0,115	0,110	0,092	0,085	0,080
6	0,149	0,140	0,132	0,124	0,112	0,107
9	0,167	0,158	0,150	0,144	0,137	0,132
15	0,184	0,180	0,172	0,164	0,158	0,150
20	0,201	0,195	0,184	0,177	0,169	0,161

Tabla 17. Valores de coeficiente de rozamiento de la muestra R.

Valores Coeficiente de rozamiento R'						
Carga (N)	Velocidad (rpm)					
	10	20	30	40	50	60
3	0,100	0,091	0,079	0,072	0,060	0,054
6	0,124	0,116	0,105	0,094	0,087	0,082
9	0,153	0,150	0,143	0,131	0,120	0,115
15	0,170	0,161	0,155	0,149	0,145	0,136
20	0,190	0,184	0,179	0,171	0,162	0,150

Tabla 18 . Valores de coeficiente de rozamiento de la muestra R'.

El máximo valor de coeficiente de rozamiento para ambas muestras se da en las condiciones de carga máxima y velocidad mínima, es decir, a 20N y 10 rpm, siendo estos valores de 0,201 para R y 0,19 para R'. Por otro lado, el mínimo valor de coeficiente de rozamiento se da en las condiciones de carga mínima y velocidad máxima, es decir, a 3N y 60 rpm, siendo estos valores de 0,08 para R y 0,054 para R'. Podemos observar que en todas las condiciones los valores de μ son menores para la muestra R'. A continuación se muestra la dependencia de μ de los principales factores del ensayo, estos son, la velocidad y la carga aplicada

1.5.3.1 Influencia de la velocidad

Los valores de rozamiento de las tablas 17 y 18 son representados en sendas gráficas en función de la velocidad de rotación para cada una de las cargas usadas en el ensayo.

Para ambos recubrimientos, a medida que aumenta la velocidad para una misma carga el valor del coeficiente de rozamiento disminuye. Esta relación decreciente entre velocidad y coeficiente de rozamiento se debe al efecto patín del lubricante, ya que a medida que aumenta la velocidad de contacto, el lubricante desarrolla una capa de mayor continuidad entre las dos superficies en contacto siendo capaz de separarlas de forma que se reduce el contacto entre las crestas de rugosidad de las dos superficies por lo que se reduce coeficiente de rozamiento.

En la figura 68 se puede observar la representación del coeficiente de rozamiento obtenido para la muestra R en función de la velocidad del ensayo.

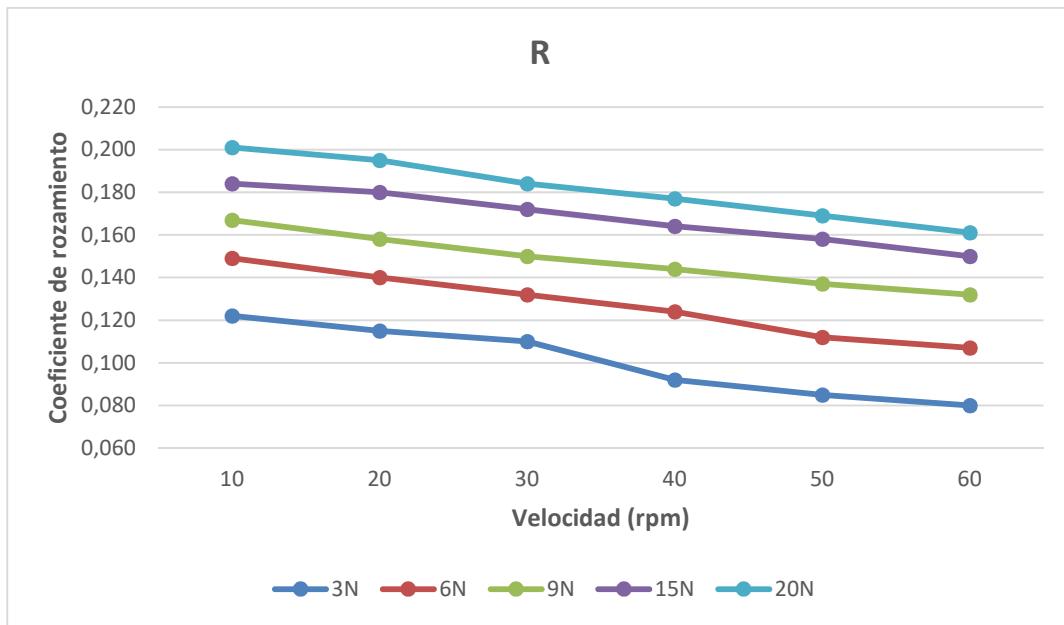


Figura 68. Representación del coeficiente de rozamiento obtenido para la muestra R en función de la variación de la velocidad.

También se muestra la representación del coeficiente de rozamiento obtenido para la muestra R' en función de la velocidad del ensayo en la figura 69.

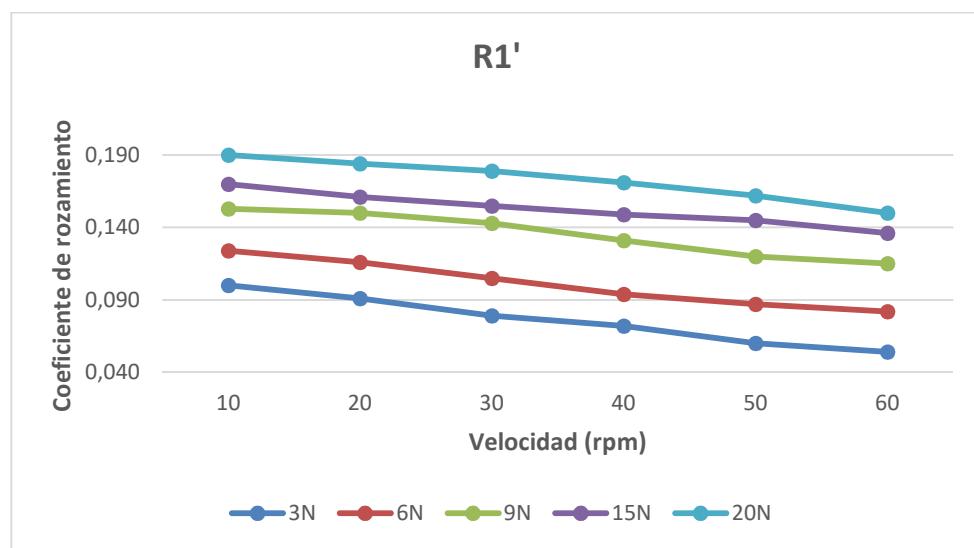


Figura 69. Representación del coeficiente de rozamiento obtenido para la muestra R' en función de la variación de la velocidad.

En la figura 70 se muestra una serie de gráficas comparativas entre los valores del coeficiente de rozamiento de ambas muestras en función de la velocidad para cada una de las diferentes cargas.

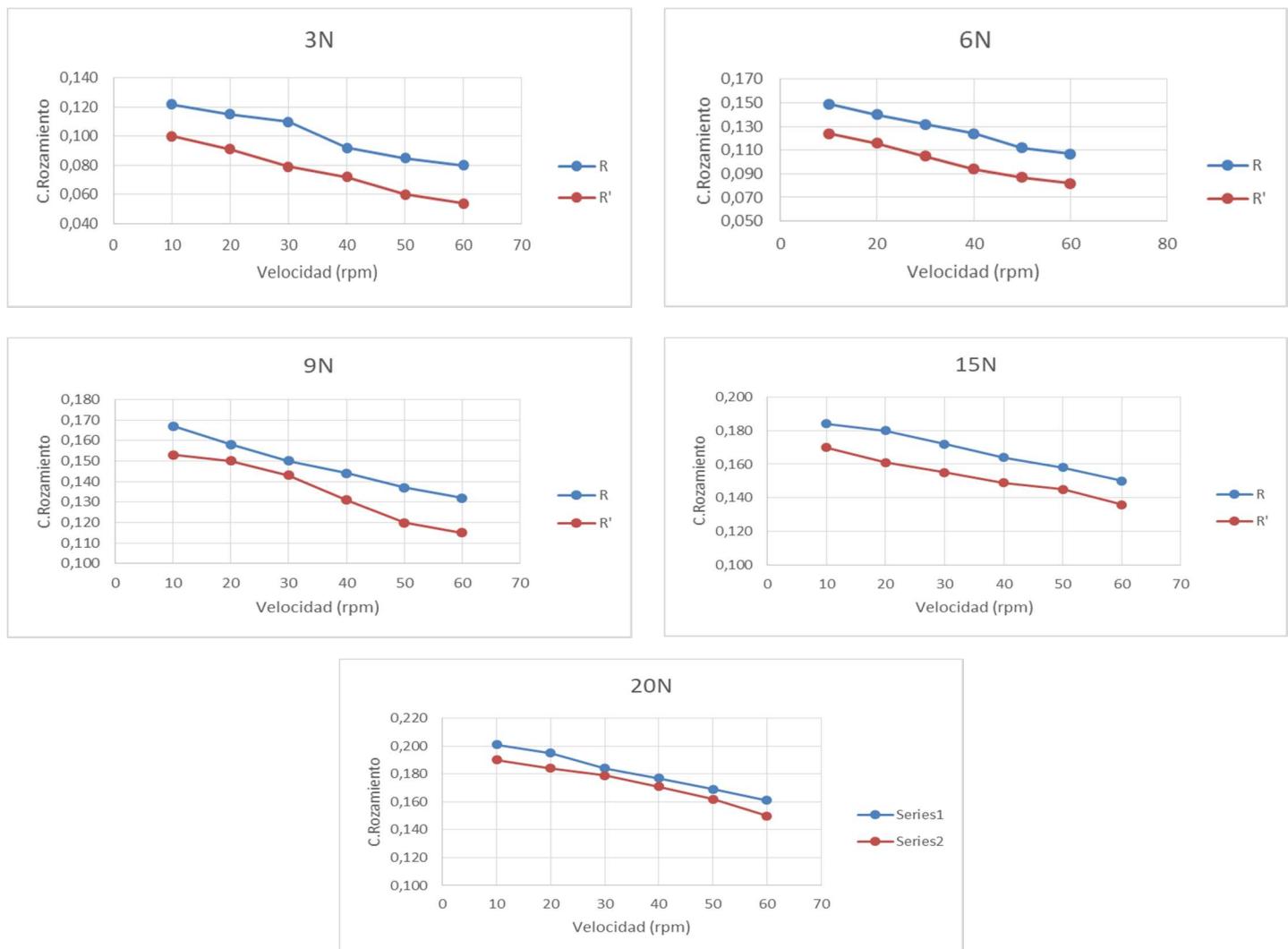


Figura 70. Comparativas entre los valores del coeficiente de rozamiento de las muestras R y R' en función de la velocidad

Los valores de coeficiente de rozamiento más bajos se dan a velocidades más elevadas, así como los valores más elevados de coeficiente de rozamiento se producen a velocidades más bajas.

Comparando ambos recubrimientos podemos observar que para todas las velocidades se obtiene menor coeficiente de rozamiento para la muestra que contiene alúmina. El comportamiento que muestran ambas muestras ante la variación de velocidad es bastante parecido en ambos casos mostrando una variación generalmente lineal ante el cambio de la velocidad y bastante paralela entre ambos casos, manteniendo siempre la muestra R' menores valores de coeficiente de rozamiento en todo el rango de velocidades.

A medida que aumenta la velocidad, la diferencia entre los coeficientes de rozamientos se va acentuando, por ejemplo para el caso de 3N, a 10 rpm la diferencia

de μ entre ambas muestras es del 18%, aumentando esta diferencia con la velocidad hasta llegar a los 60 rpm a una diferencia del 32,5%. Sin embargo, esta diferencia se ve reducida a medida que aumenta la carga ya que en el ensayo de 20N, a 10 rpm la diferencia entre μ es del 5,4% mientras que a 60 rpm es de 6,8%, además que en las velocidades intermedias la diferencia se vio reducida.

1.5.3.2 Influencia de la carga

Los valores de rozamiento de las tablas 17 y 18 son representados en sendas gráficas en función de la presión aplicada para cada una de las velocidades a las que trascurre el ensayo.

Para ambos recubrimientos, a medida que aumenta la carga aplicada para una misma velocidad el valor del coeficiente de rozamiento aumenta. Esta relación creciente entre la carga y coeficiente de rozamiento se debe a que a mayor carga aplicada, la capa de lubricación que separa las superficies que están en contacto es cada vez menor, entrando en contacto cada vez más picos de rugosidad de las superficies, lo que provoca mayor contacto entre las superficies y por ende mayor coeficiente de rozamiento.

En la figura 71 se muestra la representación del coeficiente de rozamiento obtenido para la muestra R en función de la carga aplicada.

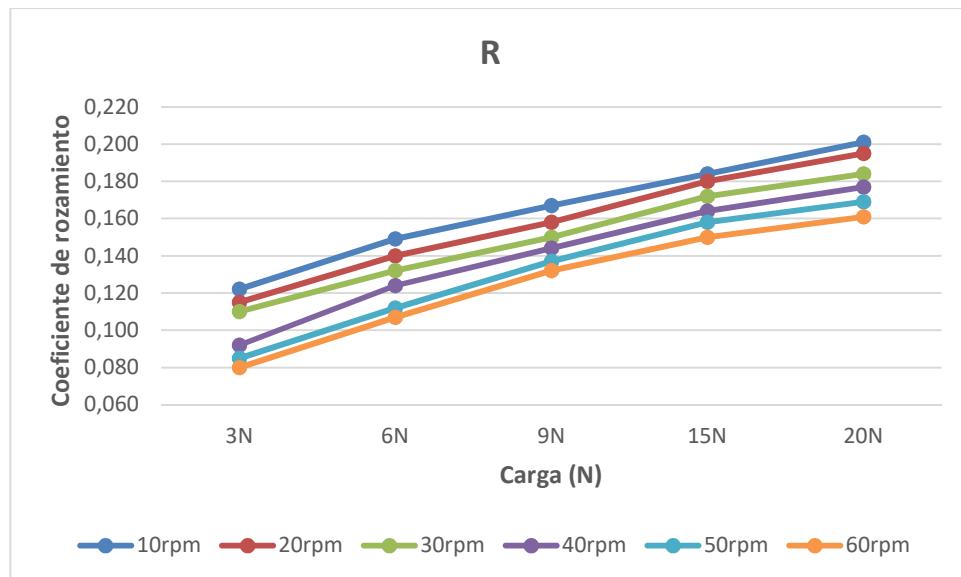


Figura 71. Representación del coeficiente de rozamiento obtenido para la muestra R en función de la variación de la carga.

También se muestra la representación del coeficiente de rozamiento obtenido para la muestra R' en función de la carga aplicada en la figura 72.

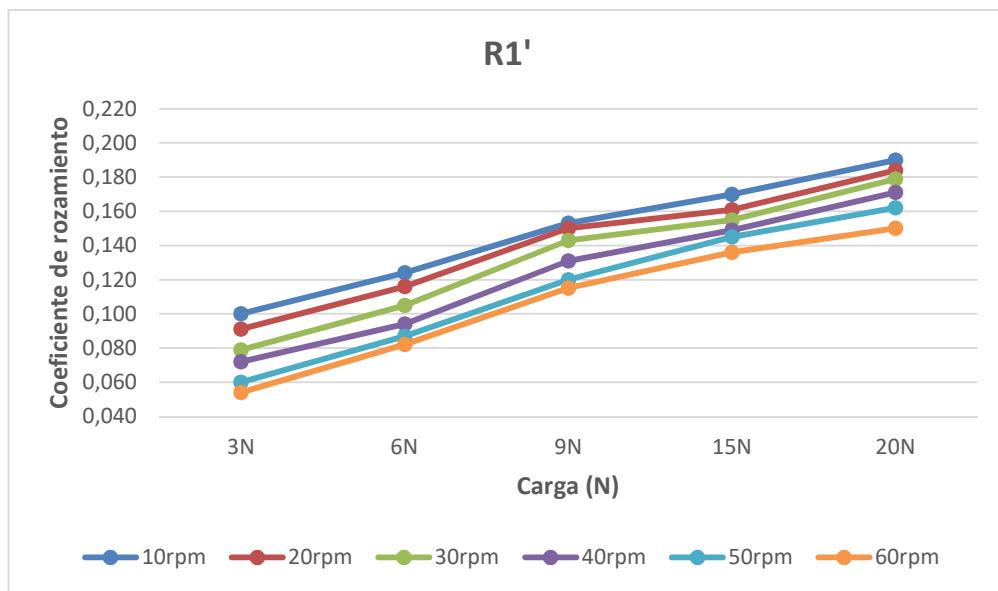
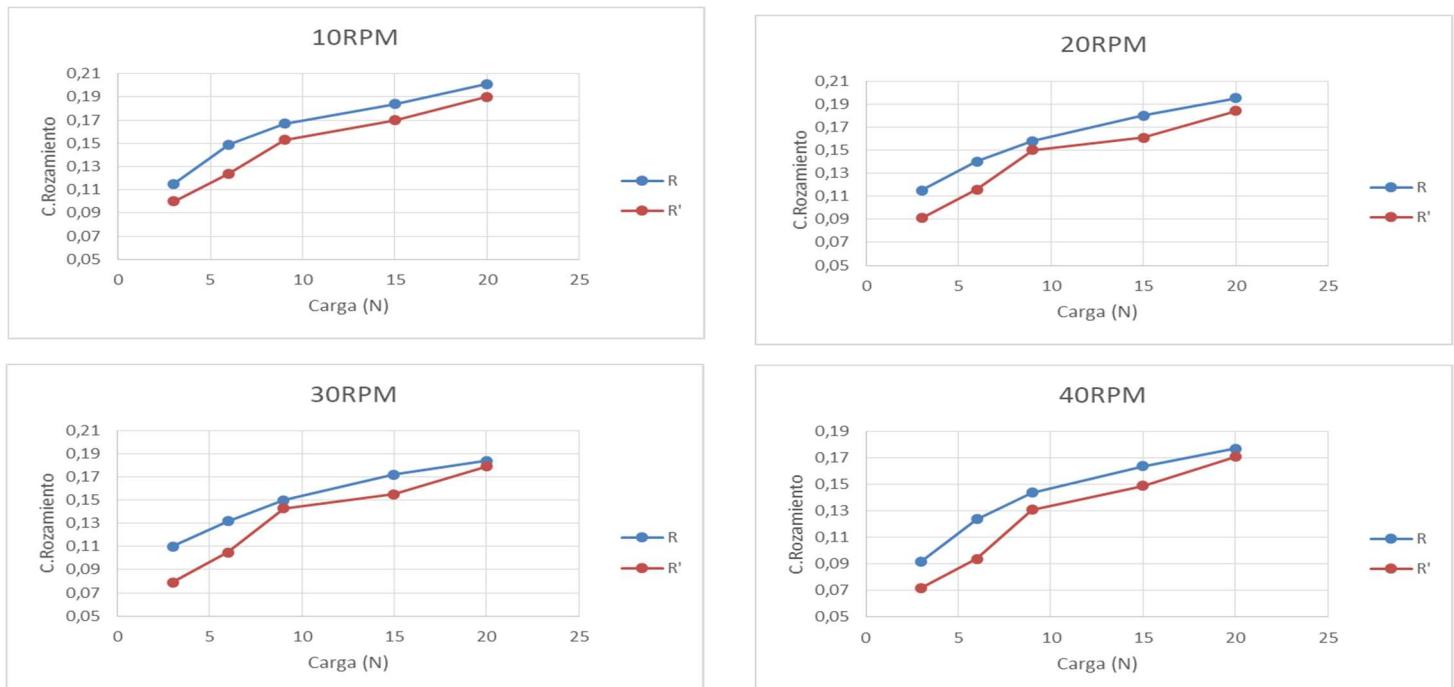


Figura 72. Representación del coeficiente de rozamiento obtenido para la muestra R' en función de la variación de la carga.

En la figura 73 se muestra una serie de gráficas comparativas entre los valores del coeficiente de rozamiento de ambas muestras en función de la carga aplicada para cada una de las diferentes velocidades de rotación.



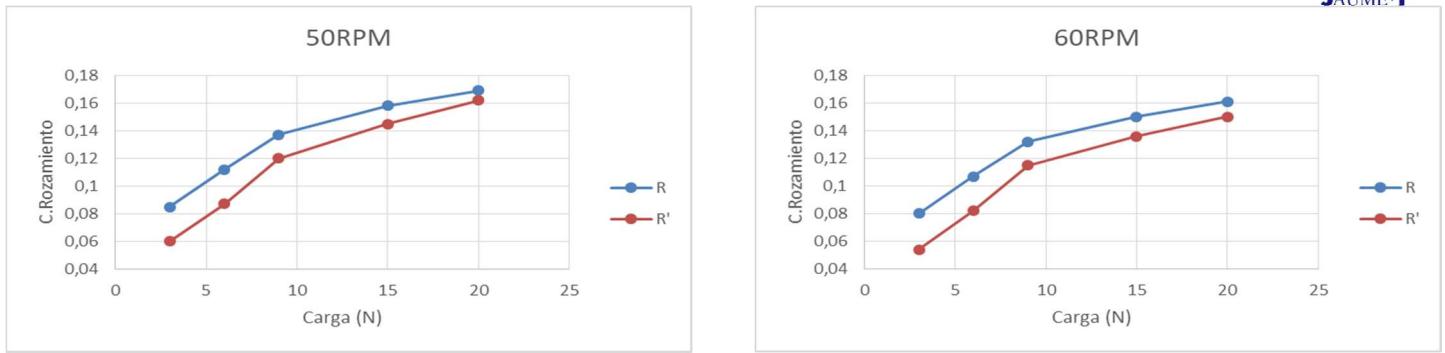


Figura 73. Comparativas entre los valores del coeficiente de rozamiento de las muestras R y R' en función de la carga

Los valores de coeficiente de rozamiento más bajos se dan a cargas más bajas, así como los valores más elevados de coeficiente de rozamiento se producen con la aplicación de cargas mayores.

Comparando ambos recubrimientos podemos observar que para todas las cargas se obtiene un menor coeficiente de rozamiento para la muestra que contiene alúmina independientemente de la velocidad aplicada. El comportamiento que muestran ambas muestras ante la variación de la carga es bastante parecido y paralelo, mostrando una variación de μ más elevado a cargas más bajas, mientras que a altas cargas se reduce la variación. La muestra R' siempre presenta menores valores de coeficiente de rozamiento en todo el rango de cargas respecto a la muestra R. Generalmente, la variación de μ con la variación de la carga es mayor en el caso de la muestra R'. Por ejemplo, en el caso de 60 rpm, entre las cargas de 3N y 6N, el μ de R' muestra una variación del 52% mientras que el de R varía un 32,75%. Para ambos casos, la diferencia disminuye a mayores cargas.

A medida que aumenta la carga, la diferencia entre los coeficientes de rozamientos de ambas muestras se va reduciendo, por ejemplo, para el caso de 10 rpm con una carga de 3N la diferencia de μ entre ambas muestras es del 13%, disminuyendo esta diferencia con el aumento de la carga hasta llegar a 20N con una diferencia del 5,4%. Sin embargo, esta diferencia se ve acentuada a medida que aumenta la velocidad ya que en el ensayo de 60 rpm, con una cargar de 3N la diferencia entre μ es del 32,5% mientras que a 20N es de 6,8%.

Como se observa en la figura 73, la variación del coeficiente de rozamiento entre ambos recubrimientos es mayor a bajas cargas, mientras que a medida que va aumentando la carga, dicha variación se ve amortiguada, llegando a variaciones muy pequeñas cuando la carga es máxima (20N). Este hecho se observa para las diferentes velocidades de operación. Este fenómeno tiene lugar debido a la mayor estabilidad y continuidad de la capa de lubricación del par rozante de la muestra R' como consecuencia de la adición de alúmina.

1.5.4 Modelización del comportamiento tribológico. Curva de Stribeck

Los regímenes de lubricación son un aspecto clave en la tribología ya que son un indicativo de cómo esta interactuando el par rozante y permite entender estado tribológico de dicho par rozante. En las aplicaciones mecánicas puede darse diferentes regímenes de lubricación en una misma aplicación. Como consecuencia de la alteración de los parámetro de operación tales como cambios leves en las propiedades del lubricante y de la pieza, la velocidad, la temperatura, la geometría o la rugosidad de la superficie los regímenes de lubricación se van alterando, pasando de un régimen hidrodinámica a uno mixto o de uno mixto a uno límite, por ejemplo. Además de esto, diferentes regímenes pueden coexistir en diferentes regiones en la interfaz de par rozante e incluso coexistir en la misma región a medida que avanza el proceso.

En el ensayo de rozamiento, a bajas velocidades la película de lubricante que separa las superficies en contacto es muy fina por lo que se produce un régimen de lubricación límite y a medida que aumenta la velocidad, el espesor de la película de lubricante se hace más grande aumentando así la separación entre los cuerpos, pasando del régimen límite a un régimen de lubricación mixto y, finalmente, a un régimen hidrodinámico.

El régimen de lubricación se obtiene a partir de los datos de coeficiente de fricción obtenidos en el ensayo de fricción mediante la elaboración de la curva de Stribeck, tal y como se explica en el apartado 1.3.4.1 “Regímenes de lubricación. Curva de Stribeck”. Para ello se obtiene el parámetro de Hersey, $H = \eta \cdot v / Pa$, que será el eje horizontal de la curva, donde η es la viscosidad absoluta del lubricante en $Kg/m \cdot s$, v la velocidad del par rozante en m/s y Pa la presión aparante aplicada, que será igual a la carga aplicada entre el área aparente de contacto. El coeficiente de rozamiento representa el eje vertical de la curva. A continuación se presenta la modelización de los pares rozantes de ambas muestras y está basada en el modelo seguido en [15] y [16].

En las figuras 74 y 75 se muestra la curva de Stribeck obtenida para la muestra R de NiCrBSi convencional y muestra R' de NiCrBSi+alúmina respectivamente con los valores de coeficiente de rozamiento obtenidos anteriormente, la presión aparente y demás parámetro conocidos en sus respectivas unidades.

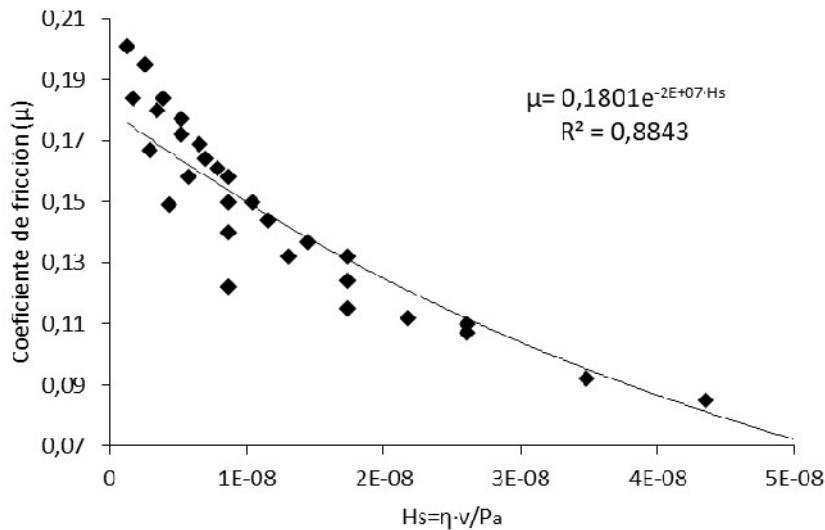


Figura 74. Curva de Stribeck a partir del parámetro de Hersey para la muestra R.

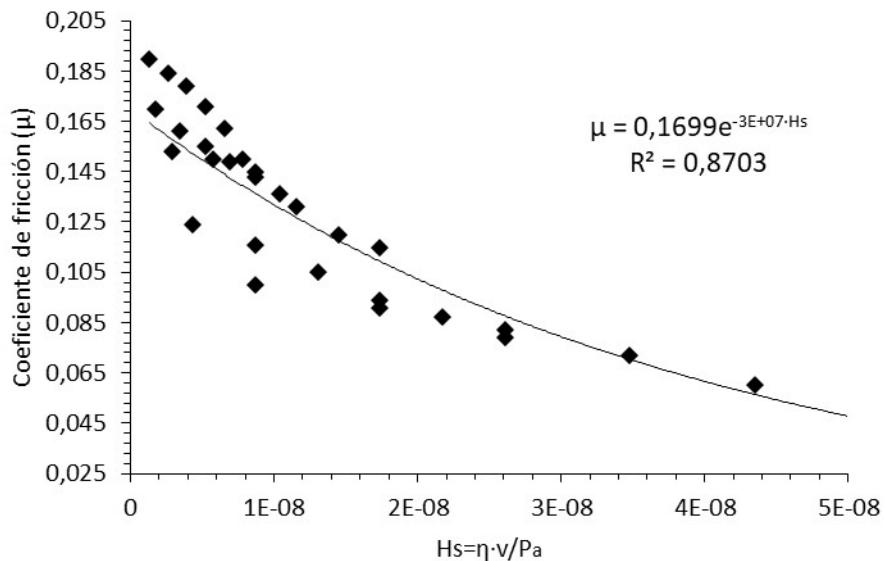


Figura 75. Curva de Stribeck a partir del parámetro de Hersey para la muestra R'.

Para la correlación de la curva de Stribeck se ha usado una línea de tendencia del tipo exponencial negativa que se ajusta de forma aceptable ya que el coeficiente de determinación obtenido es superior al 87% para ambos casos. La función exponencial obtenida está definida por el siguiente modelo matemático:

$$\mu = \mu_0 \cdot e^{-n \cdot Hs} \quad (18)$$

donde μ_0 es el coeficiente de fricción en el origen para $H_s = 0$. Por extrapolación se puede considerar como el coeficiente de fricción en el régimen de lubricación límite. Altos valores de μ_0 son indicativos de una mayor tendencia a la cohesión en el par rozante.

El exponente n_e indica la tendencia directa a alcanzar el dominio del régimen hidrodinámico. Valores pequeños de n_e (<1), indican que predomina el régimen de lubricación mixta. Para el caso de la muestra R, el exponente presenta un valor relativamente pequeño por lo que está asociado con el régimen de lubricación mixta.

Las funciones exponenciales pueden estar constituidas por dos mecanismos, que en nuestro caso estos dos mecanismos se establecen como la lubricación mixta, que corresponde a la pendiente, y la lubricación hidrodinámica, correspondiendo a la parte asintótica.

Teóricamente, la lubricación hidrodinámica no depende de las características del par rozante, dependiendo el rozamiento de la viscosidad del lubricante. Sin embargo, los fenómenos que causan la lubricación límite tienen una clara influencia en la consecución de la lubricación hidrodinámica. Uno de estos fenómenos es el nivel de cohesión entre el par rozante que define el grado de cohesión del par, esto es, la tendencia a formar microsoldaduras entre los picos de rugosidad de las superficies en contacto. De esta forma, es de gran importancia identificar los factores de los que depende la cohesión, ya que esta tiene una gran influencia en la consecución del régimen hidrodinámica. A continuación se describen los factores que influyen en la cohesión:

- El coeficiente de rozamiento en el origen, μ_0 . Como ya se ha dicho, μ_0 se puede considerar como el coeficiente de fricción en el régimen de lubricación límite.
- El exponente de la función n_e , indica la tendencia directa alcanzar las abscisas, es decir, el régimen hidrodinámico. A mayor n_e habrá una menor tendencia a la cohesión.
- La variable de Hersey (H_{sho}) límite de la lubricación hidrodinámica. Mayores valores de H_{sho} indican que la tendencia al comportamiento cohesivo es mayor, ya que requerirán mayores flujos de lubricante para eliminar toda posible acción cohesiva. Para poder estimar el valor de H_{sho} se ha fijado el valor de μ en el inicio de la zona hidrodinámica (μ_{Hsho}) en 0,01.

En la figura 76 se muestra una comparativa entre las curvas de Stribeck de los pares rozantes de ambas muestras. Para la muestra R se obtienen valores de μ entre 0,085-0,201, mientras que para la muestra R' se han obtenido valores de μ entre 0,06-0,19. Para ambas muestras el parámetro de Hersey H_s está comprendido entre $1,3 \cdot 10^{-9}$ y $4,35 \cdot 10^{-8}$. Aunque no se presenten grandes diferencias entre ambos recubrimientos,

se puede afirmar que el recubrimiento R' presenta mayor estabilidad de la capa de lubricación desarrollando una mayor capa de lubricante capaz de aislar las dos superficies en contacto de forma que interactúan un menor número de picos de rugosidad y alcanzándose valores de rozamientos menores.

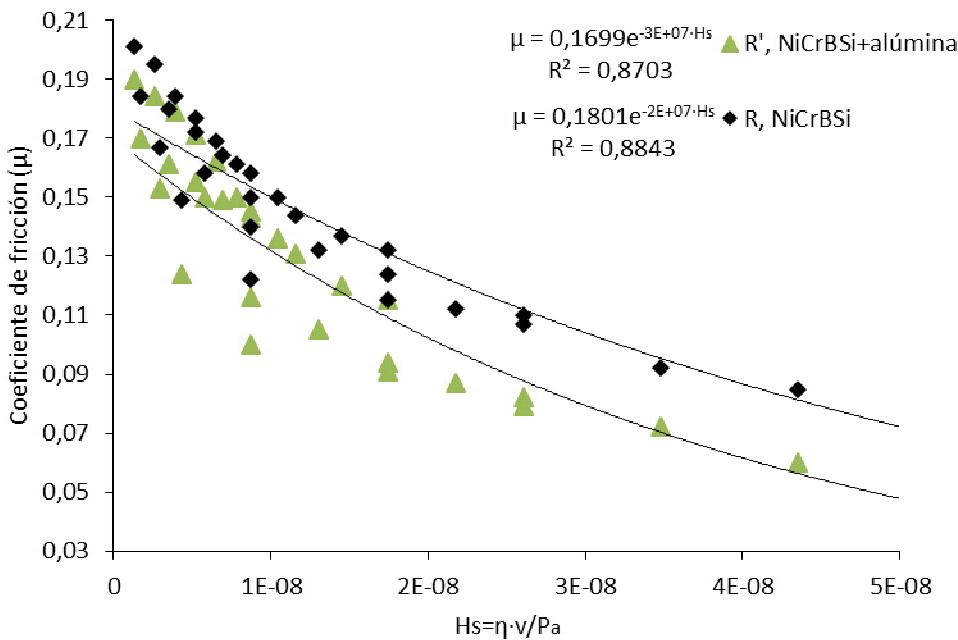


Figura 76. Comparativa entre las curvas de Stribeck de las muestra R y R'.

En la tabla 19 se muestran los valores de μ_0 , n_e , H_{sho} obtenidos para las correlaciones anteriores de las muestra R y R'. Se puede observar que la muestra R' muestra una menor tendencia hacia el comportamiento cohesivo ya que presenta un n_e mayor, además de presentar una zona de lubricación mixta de menor amplitud al tener un H_{sho} más bajo.

Muestra	μ_0	n_e	H_{sho}
R	0,1801	$-2 \cdot 10^7$	$1,445 \cdot 10^{-7}$
R'	0,1699	$-3 \cdot 10^7$	$9,442 \cdot 10^{-8}$

Tabla 19. Parámetros que afectan a la cohesión.

El régimen de lubricación mixta está comprendido entre el régimen límite y el hidrodinámico. Los datos disponibles permiten establecer relaciones lineales entre el μ y Hs para cada presión aplicada en el régimen de lubricación mixta. Estas correlaciones se muestran en las figuras 77 y 78 para cada muestra. Estas relaciones lineales se expresan como:

$$\mu_{Pa} = \mu_0 - m \cdot Hs \quad (19)$$

De esta forma, es posible obtener el coeficiente de rozamiento estático cuando $H_s=0$. Habiendo supuesto que el coeficiente de rozamiento límite de la zona hidrodinámica es 0,01 y con el coeficiente de rozamiento estático, es posible definir el régimen de lubricación mixta.

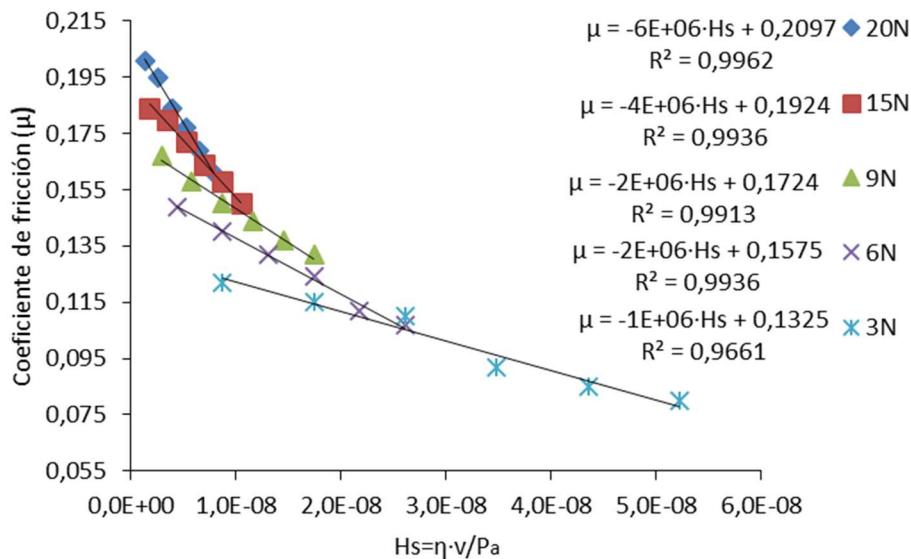


Figura 77. Correlación lineal μ - H_s en función de las cargas para R .

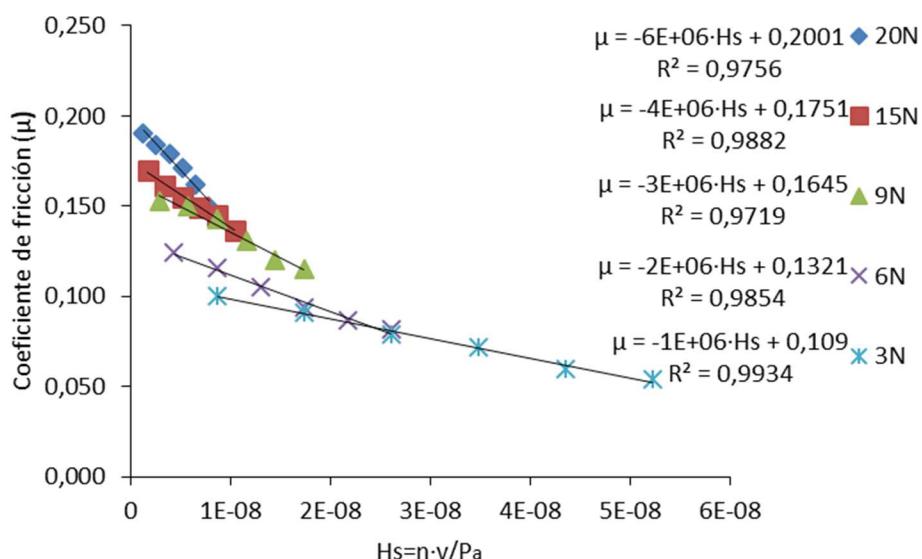


Figura 78. Correlación lineal μ - H_s en función de las cargas para R' .

Como podemos observar, a medida que la presión aplicada aumenta, los términos μ_o y m también crecen. La evolución de los términos μ_o se correlaciona con las presiones aparentes, mostrado en el siguiente modelo matemático:

$$\mu_o = K_{\mu_o} \cdot Pa^{n_{\mu_o}} \quad (20)$$

Se ha seleccionado una función exponencial debido a que a medida que aumenta la presión aparente, el coeficiente de rozamiento se va amortiguando. Esta expresión obtenida en la correlación del coeficiente de rozamiento estático y la presión aparente aplicada se puede obtener la constante de correlación K_{μ_o} y el exponente n_{μ_o} . En las figuras 79 y 80 se muestra esta correlación potencial entre μ_o y Pa para las muestras R y R' respectivamente.

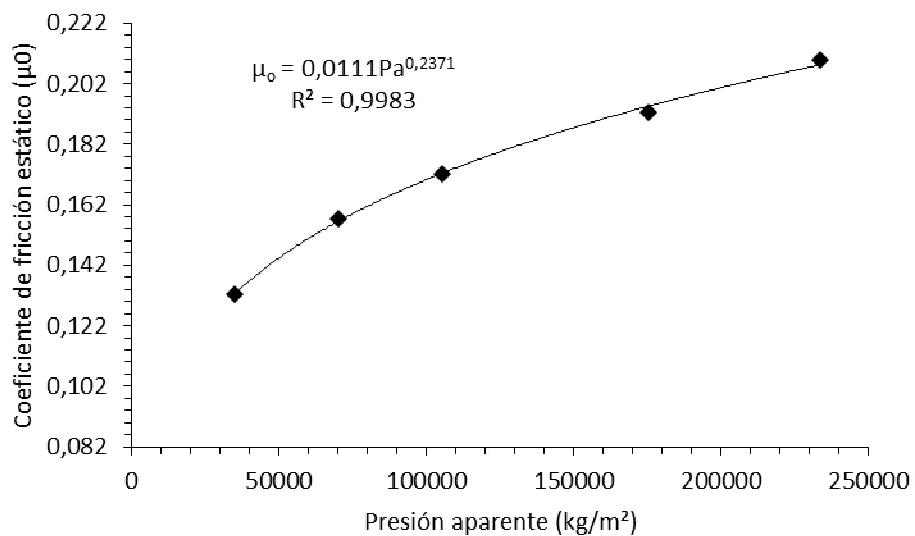


Figura 79. Correlación entre los términos independientes μ_o y las presiones aparentes Pa para la muestra R.

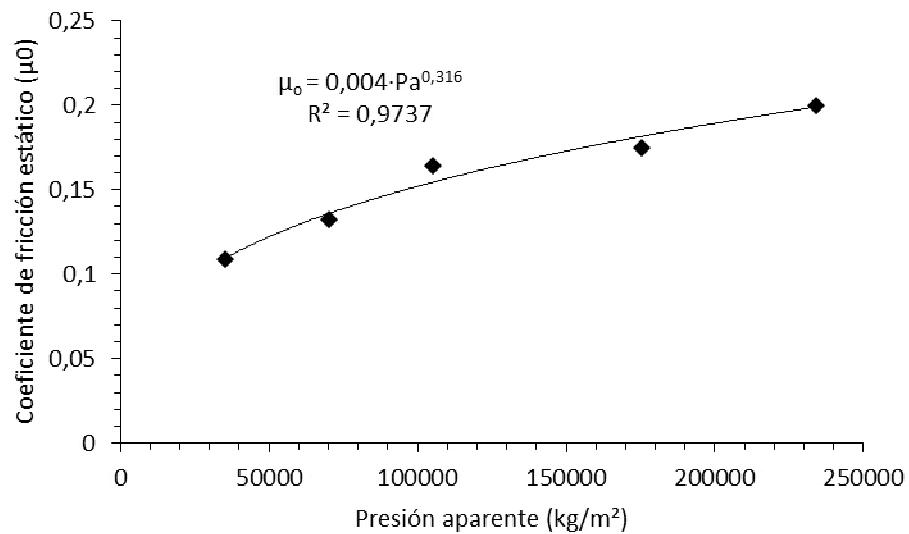


Figura 80. Correlación entre los términos independientes μ_o y las presiones aparentes Pa para la muestra R'.

La correlación exponencial utilizada se ajusta muy bien a los datos obteniendo un coeficiente de determinación superior al 99% y 97% respectivamente para cada muestra. Analizando la función podemos establecer que a mayor valor de la constante de correlación K_{μ_0} y el exponente n_{μ_0} , más tendencia habrá de estar en la zona de lubricación límite ya que el coeficiente de rozamiento será mayor, por lo que se incrementará el comportamiento cohesivo del par rozante. Como podemos observar,

De igual manera, también se observa una correlación entre la pendiente m del modelo de tipo lineal del coeficiente de rozamiento y la presión aparente mediante una función potencial, representadas en la figura 81 y 82, obteniendo un coeficiente de determinación del 95% y 99%. Esto es indicativo de la alta influencia que ejerce la presión aparente sobre la lubricación mixta. La función potencial utilizada en el ajuste es del tipo:

$$m = K_m \cdot Pa^{n_m} \quad (21)$$

Analizando la función podemos establecer que a mayor valor de la constante de correlación K_m y el exponente n_m , mayor será el valor de la pendiente por lo que se esperará un mayor comportamiento cohesivo del par rozante por lo que mayor será la influencia del régimen límite sobre el hidrodinámico.

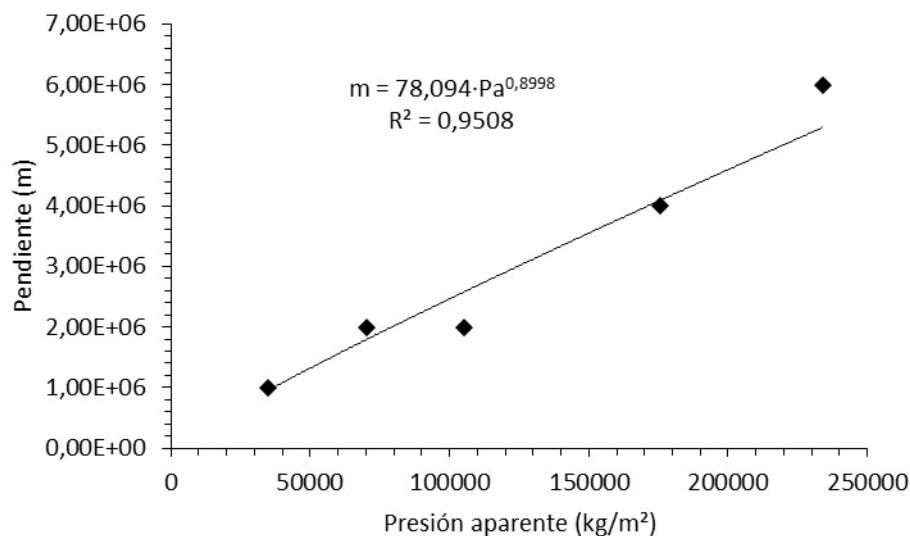


Figura 81. Correlación m y Pa en las curvas de lubricación mixta para la muestra R.

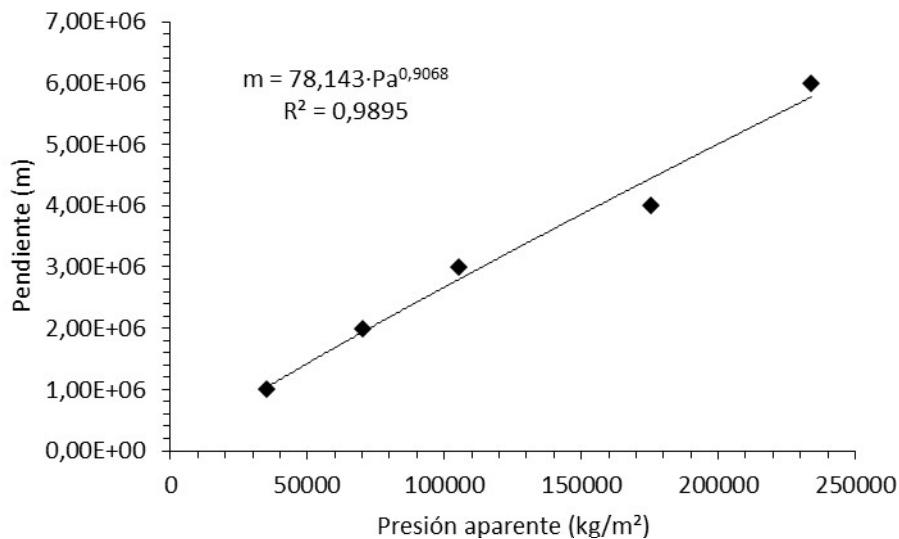


Figura 82. Correlación m y Pa en las curvas de lubricación mixta para la muestra R' .

Con los resultados obtenidos, se puede asumir que en la Curva de Stribeck predomina la lubricación mixta mediante la variable conjunta que conforman la lubricación hidrodinámica Hs_{ho} y la lubricación límite Pa^n . De este modo se hipotetizó la variable Hs en la que n es un exponente que debe ser optimizado con el coeficiente de rozamiento estático μ_{oPa} .

En la tabla 20 se muestra un resumen de las constantes y exponentes resultantes para las muestra R y R' .

Muestra	$K_{\mu o}$	$n_{\mu o}$	K_m	n_m
R	0,0111	0,2371	78,094	0,8998
R'	0,004	0,316	78,143	0,9068

Tabla 20. Parámetros $K_{\mu o}$, $n_{\mu o}$, K_m y n_m para R y R' .

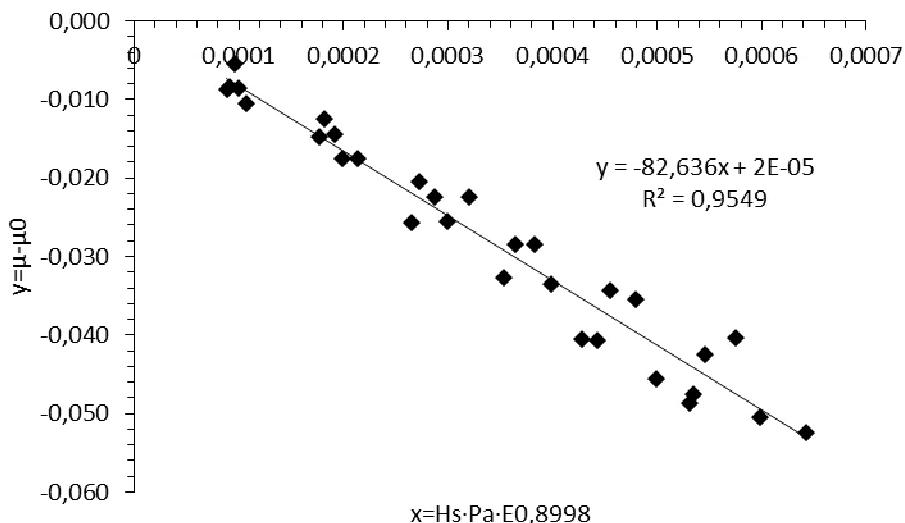


Figura 83. Correlación entre $(\mu - \mu_0)$ y el parámetro compuesto de Hs y Pa^{n_m} para la muestra R .

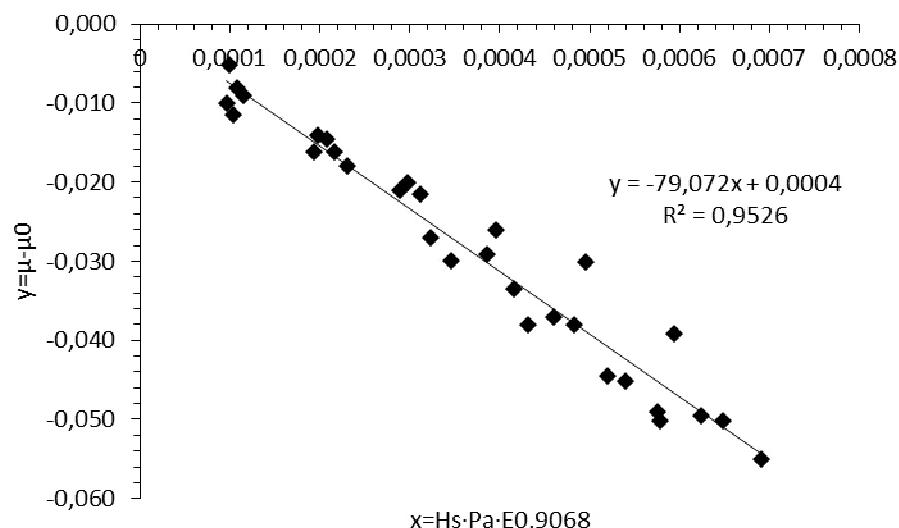


Figura 84. Correlación entre $(\mu - \mu_0)$ y el parámetro compuesto de Hs y Pa^{n_m} para la muestra R' .

En el análisis de la correlación de la pendiente m y la presión aplicada Pa , el exponente óptimo n_m de la variable compuesta $Hs \cdot Pa^{n_m}$ correspondiente a los recubrimientos R ($n_m=0,8998$) y R' ($n_m=0,9068$) se obtiene un coeficiente de determinación superior al 95% en ambos casos, por lo que se puede justificar que la lubricación mixta es gobernada por la variable compuesta $Hs \cdot Pa^{n_m}$, en la que Hs es la variable que rige la lubricación hidrodinámica y la Pa^{n_m} es la que lo hace en la límite.

De este modo el modelo genérico del coeficiente de rozamiento en la lubricación mixta es el que se expresa a continuación

$$\mu = K_{\mu_0} \cdot Pa^{n_{\mu_0}} - Hs \cdot K_m \cdot Pa^{n_m} \quad (22)$$

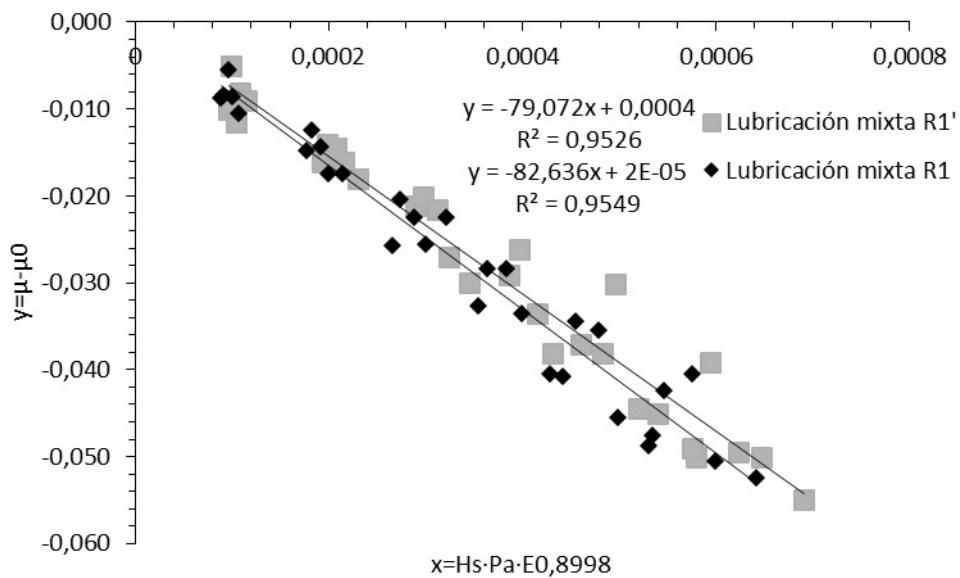


Figura 85. Comparativa entre la zona de lubricación mixta de las muestras R y R'.

En este caso del par rozante de la muestra R, el modelo matemático del coeficiente de rozamiento en la lubricación queda como:

$$\mu = 0,0111 \cdot \text{Pa}^{0,2371} - \text{Hs} \cdot 82,636 \cdot \text{Pa}^{0,8998} \quad (23)$$

Mientras que para el par rozante de la muestra R', el modelo matemático del coeficiente de rozamiento en la lubricación queda como:

$$\mu = 0,004 \cdot \text{Pa}^{0,316} - \text{Hs} \cdot 79,072 \cdot \text{Pa}^{0,9068} \quad (24)$$

1.5.5 Análisis de pérdidas energéticas

Para poder estimar el efecto que provoca la adición de alúmina sobre las pérdidas energéticas por fricción se hará uso de la expresión (13) presentada en el apartado 1.3.1.3.2 “Gasto energético por rozamiento. Pérdidas mecánicas” y se calculará el Consumo Energético por Fricción (CEF) para ambas muestras R y R'. A continuación se vuelve a mostrar expresión para calcular el CEF:

$$CEF = 0,03077 * \mu * F_N * \emptyset * N \quad (13)$$

Donde:

- μ es el coeficiente de rozamiento [\emptyset]
- F_N es la fuerza normal aplicada [kgf]
- \emptyset el diámetro de rodadura [m]
- N es la velocidad de rotación del disco [rps]

Con los valores de coeficiente de rozamiento obtenidos en el ensayo de rozamiento en medios lubricados y mostrados en las tablas 17 y 18, el diámetro de rodadura de 0,08 m y la fuerza normal y velocidad de rotación del disco correspondiente a cada punto de medida del coeficiente de rozamiento se obtendrán los valores de los CEF, de forma que habrán tantos valores de CEF como valores de coeficiente de rozamiento hayan.

En la tabla 21 se muestran los valores de CEF obtenidos para la muestra R:

Velocidad (rps)	CEF (W)				
	Carga (kgf)				
	0,31	0,61	0,92	1,53	2,04
0,167	1,53E-05	3,74E-05	6,29E-05	1,15E-04	1,68E-04
0,333	2,89E-05	7,03E-05	1,19E-04	2,26E-04	3,26E-04
0,500	4,14E-05	9,94E-05	1,69E-04	3,24E-04	4,62E-04
0,667	4,62E-05	1,24E-04	2,17E-04	4,12E-04	5,92E-04
0,833	5,33E-05	1,41E-04	2,58E-04	4,96E-04	7,07E-04
1,000	6,02E-05	1,61E-04	2,98E-04	5,65E-04	8,08E-04

Tabla 21. Valores pérdidas energéticas por fricción para la muestra R.

Del mismo modo, en la tabla 22 se muestran los valores de CEF obtenidos para la muestra R':

Velocidad (rps)	CEF (W)				
	Carga (kgf)				
0,31	0,61	0,92	1,53	2,04	
0,167	1,25E-05	3,11E-05	5,76E-05	1,07E-04	1,59E-04
0,333	2,28E-05	5,82E-05	1,13E-04	2,02E-04	3,08E-04
0,500	2,97E-05	7,90E-05	1,61E-04	2,92E-04	4,49E-04
0,667	3,61E-05	9,43E-05	1,97E-04	3,74E-04	5,72E-04
0,833	3,76E-05	1,09E-04	2,26E-04	4,55E-04	6,78E-04
1,000	4,07E-05	1,23E-04	2,60E-04	5,12E-04	7,53E-04

Tabla 22. Valores pérdidas energéticas por fricción para la muestra R'.

El CEF es directamente proporcional a los parámetros de operación del ensayo de fricción estos son, la velocidad, la carga, el radio y el coeficiente de rozamiento. Como podemos observar, a medida que el valor de estos parámetro aumenta, también lo hace el CEF, por lo que los mínimos valores del CEF se darán a bajas revoluciones, bajas cargas y cuando el valor del coeficiente de rozamiento sea menor, mientras que los máximos valores se darán a altas velocidades y altas cargas y altos valores de rozamiento. Sin embargo, el valor del rozamiento y es directamente proporcional a la carga e indirectamente proporcional a la velocidad, por lo que para una misma carga, a medida que aumenta la velocidad el rozamiento disminuirá. Por ello, es necesario determinar cuál de estos dos parámetros tiene un mayor efecto sobre el CEF, y cómo podemos ver en las tablas 21 y 22, para unas mismas condiciones de carga el CEF aumenta a medida que aumenta la velocidad, por lo que el consumo energético por fricción tiene una mayor dependencia de la velocidad que del coeficiente de fricción. Esto se debe a que los valores de la velocidad afectan al CEF en mayor magnitud que el coeficiente de rozamiento.

Tal y como se ha visto en la fórmula del CEF, el único parámetro que depende de cada muestra es el coeficiente de rozamiento ya que los demás parámetros serán iguales para ambos casos, por lo que como ya fue presentado en el apartado 1.5.3 “Ensayo de rozamiento en medios lubricados” los valores de μ son mayores para la muestra R, por lo que lógicamente la muestra R mostrará mayores valores de pérdidas energéticas por fricción que la muestra R'.

El mayor valor de CEF obtenido para la muestra R ha sido de $8,08 \cdot 10^{-4}$ W mientras que para la muestra R' se registró un valor máximo de $7,53 \cdot 10^{-4}$ W, mostrados en la figura 86. Esto supone una diferencia del 7%. También podemos observar un comparación de los CEF acumulados a lo largo de toda la prueba para cada muestra, siendo este valor de CEF total de $7,2 \cdot 10^{-3}$ W en el caso de R y $6,55 \cdot 10^{-3}$ W en el caso de R', registrándose un descenso de la energía consumida en un 9% como consecuencia del uso de recibimientos de NiCrBSi con alúmina. Por otra parte, la mayor variación de CEF entre ambos recubrimiento se observa para las condiciones de 0,31 kgf (3N) y 1 rps (60 rpm) suponiendo una variación del 32%.

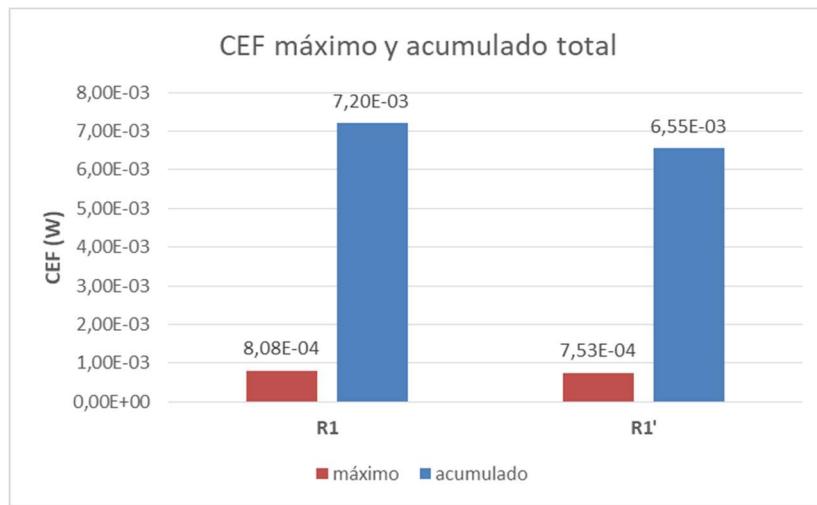


Figura 86. Comparativa entre CEF máximos y acumulados totales de las muestras R y R'.

En las figuras 87 y 88, a modo de ilustración, se muestra una representación del CEF acumulado para cada carga de ambas muestras de forma que se representa la energía que se ha consumida a lo largo de la realización del ensayo de fricción para cada carga, dado que este es un ensayo de desgaste acumulado.

Se puede observar que en los ensayos de bajas cargas, la energía consumida por fricción es insignificante frente a la consumida a altas cargas. Por ejemplo, la energía acumulada consumida con una carga de 0,61 kgf (6N) es casi del mismo valor que la energía consumida en el ensayo de 1,53 kgf (15N) únicamente habiendo pasado por la velocidad de 0,167 rps (10 rpm). Esto hecho evidencia la importancia y la influencia de la carga del ensayo en la energía consumida por fricción. También se puede observar la disminución de la energía consumida a lo largo de todo el ensayo para el caso de la muestra R' frente a la muestra R, habiendo una disminución de entre el 8% y al 11% de la energía consumida acumulada para cada carga para la muestra R' respecto a R.

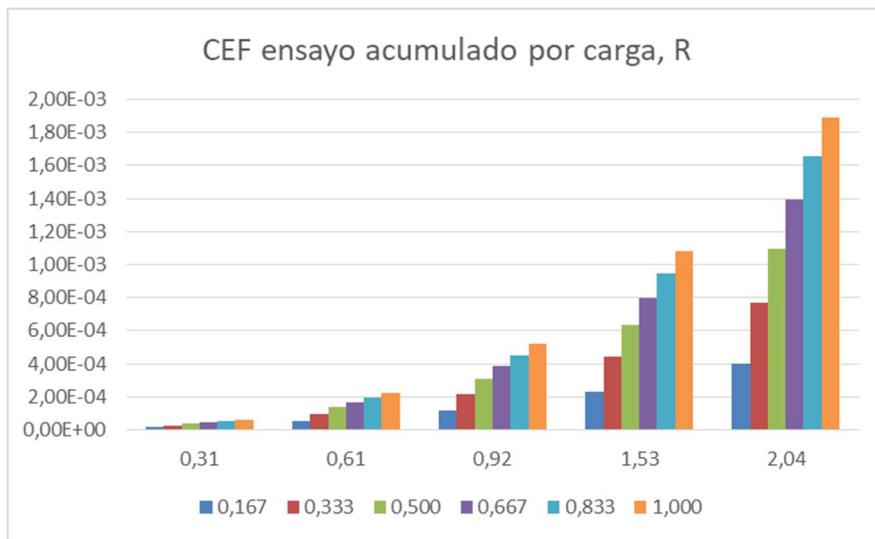


Figura 87. Evolución del CEF acumulado por carga para la muestra R.

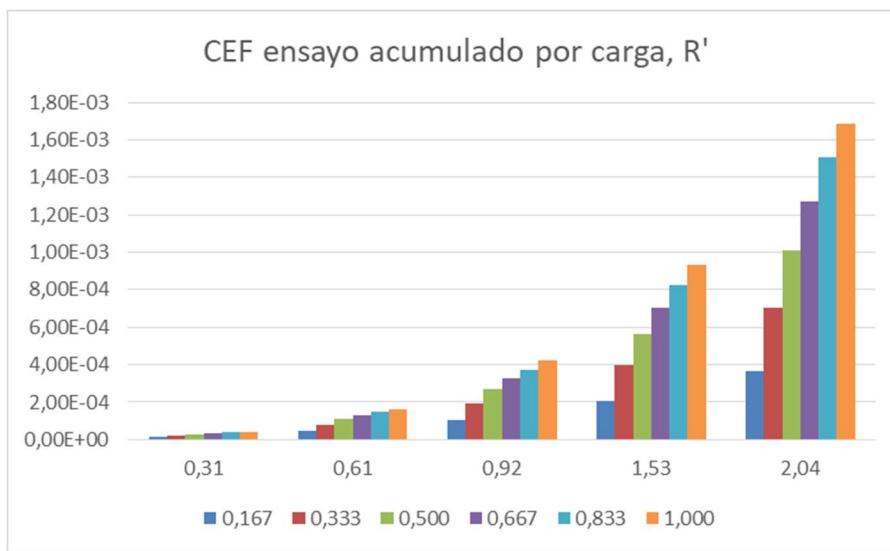


Figura 88. Evolución del CEF acumulado por carga para la muestra R'.

1.6 Conclusiones

En el presente apartado se van a exponer las conclusiones a las que se ha llegado a lo largo del desarrollo del proyecto así como un resumen de los resultados más trascendentales obtenidos.

Mediante este trabajo se ha realizado un análisis comparativo entre los recubrimientos de NiCrBSi comerciales y los recubrimientos de NiCrBSi (10% Cr) con un 10% de alúmina de forma que se estudiado cómo influye la adición de esa cantidad de alúmina al recubrimiento sobre el comportamiento tribológico de un par rozante compuesto por un pin de acero inoxidable AISI 304 rociado con los recubrimientos mencionados y un disco de acero inoxidable AISI 304 embebidos por un aceite lubricante de baja viscosidad. Para ello se ha llevado a cabo un ensayo de fricción en medio lubricado que permite obtener los valores del coeficiente de rozamiento según los parámetros de operación Con estos datos es posible modelizar la curva de Stribeck de cada uno de los pares rozantes, lo que permite estimar el comportamiento tribológico de dichos pares rozantes. Con el fin de relacionar el comportamiento tribológico con la composición de los recubrimientos se ha realizado un análisis de la microestructura de los recubrimientos. Un mejor comportamiento tribológico implica obtener elementos con mayor vida útil y de menor mantenimiento.

Por otra parte se ha llevado un estudio de consumo energético para analizar la influencia de la incorporación de la alúmina sobre este parámetro. Menores pérdidas energéticas por fricción supone obtener máquinas más eficientes y de menor impacto medioambiental.

El uso de recubrimientos NiCrBSi con adiciones de alúmina supone obtener recubrimientos que mejoran el comportamiento tribológico de los pares rozantes, ya la alúmina disminuye el coeficiente de rozamiento, mejora las propiedades mecánicas superficiales y ayuda a la formación de la película lubricante que separa las superficies, ayudando en la formación del régimen hidrodinámico. Al mismo tiempo, la incorporación de alúmina mejora el comportamiento energético de los pares rozantes haciendo que el consumo energético por fricción se vea reducido. A continuación se muestran los argumentos formulados a lo largo del proyecto que apoyan estas afirmaciones, además de otros hechos observados:

1. La presencia de alúmina micrométrica en los recubrimientos comerciales de NiCrBSi (10,1%Cr) mejora las propiedades tanto mecánicas como tribológicas del recubrimiento NiCrBSi comercial ya que fortalece la matriz blanda de Ni-Cr. Las partículas de alúmina suelen presentar una morfología poligonal con forma irregular y vértices agudos que provocan concentraciones de tensiones en los vértices de las

mismas confiriendo así mayor dureza a la matriz de Ni-Cr. Además, la alúmina provoca la formación de precipitados duros de menor tamaño en su proximidad, lo que implica un aumento de la dureza.

2. Las durezas medias obtenidas para cada recubrimiento son de 436,4HV en el caso de R y 580,4HV en el caso de R', lo que supone un aumento del 33% de media. Al comparar los valores de microdurezas de ambos perfiles, se ha observado que existe una notable variación entre la dureza de las muestras R y R' a lo largo de toda la zona del recubrimiento, siendo la dureza de la muestra R' superior en todos los puntos de medida. Este aumento de la dureza se debe a la presencia de alúmina en los recubrimientos de NiCrBSi, lo que provoca un endurecimiento de la matriz blanda de Ni-Cr así como la formación de pequeños precipitados duros.
3. En el estudio de rozamiento en medios lubricados se ha observado que para ambos recubrimientos, a medida que aumenta la velocidad para una misma carga el valor del coeficiente de rozamiento disminuye. El comportamiento que muestran ambas muestras ante la variación de velocidad es bastante parecido en ambos casos mostrando una variación generalmente lineal ante el cambio de la velocidad y bastante paralela entre ambos casos, manteniendo siempre la muestra R' menores valores de coeficiente de rozamiento en todo el rango de velocidades. Además, a medida que aumenta la carga aplicada para una misma velocidad el valor del coeficiente de rozamiento aumenta para ambos recubrimientos. Esta relación creciente entre la carga y coeficiente de rozamiento se debe a que a mayor carga aplicada, la capa de lubricación que separa las superficies que están en contacto es cada vez menor, entrando en contacto cada vez más picos de rugosidad de las superficies, lo que provoca mayor contacto entre las superficies y por ende mayor coeficiente de rozamiento. El comportamiento que muestran ambas muestras ante la variación de la carga es bastante parecido
4. También se ha observado la influencia de la alúmina en los valores del coeficiente de rozamiento obtenidos en el ensayo de rozamiento en medios lubricados. Los valores de μ obtenidos han sido siempre de menor valor para la muestra R'. Para la muestra R se ha obtenido valores de μ entre 0,085-0,201, mientras que para la muestra R' se han obtenido valores de μ entre 0,06-0,19.
5. En el análisis de la curva de Stribeck, para ambas muestras el parámetro de Hersey está comprendido entre $1,3 \cdot 10^{-9}$ y $4,35 \cdot 10^{-8}$. Aunque no se presenten grandes diferencias entre ambos recubrimientos, se puede afirmar que el recubrimiento R' presenta mayor estabilidad de la capa de lubricación desarrollando una mayor capa de lubricante capaz de aislar las dos superficies en contacto de forma que interactúan un menor número de picos de rugosidad y alcanzándose valores de rozamientos menores. Además, la muestra R' ha obtenido menores valores de μ_0 , H_{sho} , que son parámetros asociados a la

lubricación límite y al comportamiento cohesivo. La muestra R' ha mostrado una menor tendencia hacia el comportamiento cohesivo ya que presenta un n_r mayor, además de presentar una zona de lubricación mixta de menor amplitud al tener un H_{sho} más bajo.

6. Se ha llevado a cabo la modelización de la curva de Stribeck de par rozante, llegando al siguiente modelo genérico del coeficiente de rozamiento:

$$\mu = K_{\mu_0} \cdot Pa^{n_{\mu_0}} - Hs \cdot K_m \cdot Pa^{n_m} \quad (22)$$

Los pares rozantes que desarrollan una capa de lubricante de mayor estabilidad presentan menor pendiente en la zona de lubricación mixta, es decir, una mayor variación entre el coeficiente de rozamiento máximo (límite, $v=0$) y el coeficiente de rozamiento de servicio mínimo. Esto se refleja en valores bajos de K_m y n_m . Para R se ha obtenido un K_m y n_m de 82,63 y 0,8998 respectivamente y una $\Delta\mu$ de 0,053, mientras que para R' se ha obtenido un K_m y n_m de 79,072 y 0,9068 respectivamente y una $\Delta\mu$ de 0,055.

7. En el estudio de la energía consumida por fricción, el único parámetro que depende de cada muestra es el coeficiente de rozamiento ya que los demás parámetros serán iguales para ambos casos. Al ser los valores de μ mayores para la muestra R, lógicamente la muestra R mostrará mayores valores de pérdidas energéticas por fricción que la muestra R'.
8. El mayor valor de CEF obtenido para la muestra R ha sido de $8,08 \cdot 10^{-4}$ W mientras que para la muestra R' se registró un valor máximo de $7,53 \cdot 10^{-4}$ W. Esto supone una diferencia del 7%. Además, comparando los valores de CEF acumulados a lo largo de toda la prueba para cada muestra, se observa que este valor de CEF total es de $7,2 \cdot 10^{-3}$ W en el caso de R y de $6,55 \cdot 10^{-3}$ W en el caso de R', registrándose un descenso de la energía consumida en un 9% como consecuencia del uso de recibimientos de NiCrBSi con alúmina. Por otra parte, la mayor variación de CEF entre ambos recubrimiento sucede en las condiciones de 0,31 kgf (3N) y 1 rps (60 rpm) suponiendo una variación del 32%. Cabe destacar la disminución de la energía consumida a lo largo de todo el ensayo para el caso de la muestra R' frente a la muestra R, habiendo una disminución de entre el 8% y al 11% de la energía consumida acumulada para cada carga para la muestra R' respecto a R.

1.7 Bibliografía

- [1] I. Hutchings and P. Shipway, *Tribology. Friction and Wear of Engineering Materials.* 2ed., Butterworth-Heinemann, 2017.
- [2] B. Bhushan, *Introduction to Tribology*, Hoboken, United States: John Wiley & Sons, 2002.
- [3] A. Franco García, «Fundamentos Físicos,» ehu, [En línea]. Available: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/ocw-fisica/dinamica/rozamiento/general/rozamiento.xhtml>.
- [4] Tribonet, «Pin on Disk Test,» 2019. [En línea]. Available: <https://www.tribonet.org/wiki/pin-on-disk-test/>.
- [5] F. T. Sánchez Marín, A. Pérez González, J. L. Sancho Bru y P. J. Rodríguez Cervantes, *MANTENIMIENTO mecánico de máquinas*, Castellón de la Plana, España: Publicacions de la Universitat Jaume I, 2006.
- [6] LENNTECH, «Níquel,» [En línea]. Available: <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/ni.htm>.
- [7] Castinox, «Aleaciones base níquel,» [En línea]. Available: <https://www.castinox.net/materiales/aleaciones-base-niquel/>.
- [8] M. V. M. H. J. Ř. E. S. Z. Č. J. S. Šárka HOUDKOVÁ, «COMPARISON OF NiCrBSi COATINGS, HVOF SPRAYED, RE-MELTED BY FLAME AND BY HIGH-POWER LASER,» *Metal* 2013, 2013.
- [9] J. Rodríguez, A. Martín, R. Fernández y J. Fernández, «An experimental study of the wear performance,» *Elsevier*, 2003.
- [10] E. Mac, «Propiedades y usos del óxido de aluminio,» Geniolandia, 2019. [En línea]. Available: <https://www.geniolandia.com/13155081/propiedades-y-usos-del-oxido-de-aluminio>.
- [11] M. A. Aswad, *Residual Stress and Fracture in High*, Manchester, UK: University of Manchester, 2012.
- [12] P. Milak, F. Dagistim Minatto, A. De Noni and O. R. K. Montedo, "Wear performance of alumina-based ceramics - a review of the influence of microstructure on erosive wear," Scielo Brazil, Criciuma, Brasil, 2015.
- [13] P. a. Partners, «TE 79 MULTI-AXIS TRIBOMETER,» Kingsclere, UK.
- [14] M. Mundial, «Grados Material Mundial,» [En línea]. Available: <https://www.materialmundial.com/acero-inoxidable-ss-astm-sae-aisi-304-ficha-tecnica/>.
- [15] K. A. Habib, D. Leal Cano, J. A. Heredia y J. S. Mira, «Effect of post-coating technique on microstructure, microhardness and the,» *Surface & Coatings Technology-Elsevier*, 2019.
- [16] D. Leal Cano, *Influencia de la adición de AL₂O₃ sobre el comportamiento tribológico de recubrimientos NiCrBSi depositados mediante proyección térmica (oxy-fuel)*, Castellón de la Plana, España: Universitat Jaume I, 2020.
- [17] J. Carrascosa Alís y S. Martínez Sala, «WEB DE LA SECCIÓN LOCAL DE ALICANTE DE LA REAL SOCIEDAD ESPAÑOLA DE FÍSICA,» Real Academia Española de Física,

- [En línea]. Available:
<http://rsefalicante.umh.es/TemasRozamiento/Rozamiento02.htm>.
- [18] T. Shirai, H. Watanabe, M. Fuji and M. Takahashi, "Structural Properties and Surface Characteristics," Ceramics Research Laboratory, Nagoya Institute of Technology, Tajimi, Japón, 2009.
- [19] C. Carlson, «Alumina: Processes And Uses,» FEECO International, [En línea]. Available: <https://feeco.com/alumina-processes-and-uses/>.
- [20] H. Ruiz-Luna, K. O. Méndez-Medrano, M. Montoya Dávila y V. H. Baltazar-Hernández, «Characterization of flame sprayed NiCrBSiMo coatings deposited with different spraying parameters,» *Revista de Metalurgia*, p. 56, 2020.
- [21] CONSTRUPEDIA, «Construmática,» [En línea]. Available: <https://www.construmatica.com/construpedia/Cromo>.
- [22] L. Vanoni, Influencia de la técnica de refusión y el tipo de lubricante sobre el consumo energético por fricción de recubrimientos NiCrBSi depositados mediante proyección térmica por oxy-fuel (OF), Castellón de la Plana, España: Universitat Jaume I, 2018.
- [23] K. Ameen Habib, D. Leal Cano, J. A. Heredia and Á. Vicente-Escuder, "Effect of debris size on the tribological performance of thermally," *Tribology International-Elsevier*, 2019.

2. Anexos

Índice Anexos

2.1 Cálculos justificativos.....	121
2.1.1 Parámetro de Hersey	121
2.1.2 CEF.....	123
2.2 Fichas técnicas.....	125
2.2.1 Tribómetro TE 79 y modulo TE 79/P	125
2.2.2 Tronzadora Buehler AbrasiMet.....	126
2.2.3 Chorreadora Mega 4.....	127
2.2.4 Limpiadora ultrasonidos Branson 2210.....	128
2.2.5 Equipo de proyección térmica OF Castodyn DS 8000	129
2.2.6 Corte precisión Buehler IsoMet Los Speed Saw	130
2.2.7 Microdurómetro Buehler Micromet	131

2.1 Cálculos justificativos

2.1.1 Parámetro de Hersey

El parámetro de Hersey relaciona la velocidad de deslizamiento con la viscosidad del aceite y la carga aplicada, siendo un parámetro muy importante para el estudio de la curva de Stribeck. Para obtener el valor de H_s se hace uso de la expresión (14) el apartado 1.3.1.4.1 “Regímenes de lubricación. Curva de Stribeck”. Esta expresión se muestra a continuación:

$$H_s = \frac{\eta \cdot v}{P_a} \quad (14)$$

donde:

η : viscosidad dinámica, medida en N·s/m².

v : velocidad, medida en m/s.

P_a : presión aparente medida en N/m².

En nuestro caso se van a hacer uso de las siguientes unidades

η : viscosidad dinámica, medida en kg/m·s.

v : velocidad, medida en m/s.

P_a : presión aparente medida en kg/m².

- La viscosidad dinámica es la otorgada por el fabricante siendo igual a 0,002624 kg/m·s
- La v se obtendrá a partir de la velocidad de rotación de la pista de rodadura y del radio de deslizamiento. El radio de deslizamiento es igual a 0,04 m y las velocidades son las utilizadas en la prueba de fricción de 10, 20, 30, 40, 50 y 60 rpm y que ya proporciona el programa del tribómetro. Sin embargo, se podría calcular fácilmente con la expresión $v=w \cdot r$.

Los valores de v son los mostrados en la tabla 23:

Radio (m)	v_1 (10rpm)	v_2 (20rpm)	v_3 (30rpm)	v_4 (40rpm)	v_5 (50rpm)	v_6 (60rpm)
0,04	0,042	0,084	0,126	0,168	0,209	0,251

Tabla 23. Valores de v medidas en m/s.

- La presión aparente se calcula como el cociente entre la carga aplicada, medida en kgf, y el área aparente de contacto de la muestra. Esta área se ha estimado como un círculo con un diámetro de 0,0055 m. De esta forma con las cargas de 0,3; 0,6; 0,9; 1,5 y 2 kgf y el área de un círculo de diámetro 0,0055 m se obtienen las presiones aparentes mostradas en la tabla 24:

Área (m ²)	Pa1 (3N)	Pa2 (6N)	Pa3 (9N)	Pa1 (15N)	Pa1 (20N)
$\pi \cdot 0,0055^2 / 4$	12.633	25.267	37.900	63.167	84.223

Tabla 24. Presiones aparentes medidas en kg/m².

Obtenidos los valores de los parámetros de Hs se procede a calcular los valores de Hs para la combinación de las velocidades (10-60 rpm) y las cargas (3-20N) del ensayo. A modo de ejemplo se muestra el cálculo de Hs a 10 rpm y 3N:

$$Hs1 = \frac{\eta \cdot v}{Pa} = \frac{0,002624 \cdot 0,042}{12.633} = 8,7 \cdot 10^{-9} \quad (25)$$

Los valores de Hs obtenidos son los mostrados en la tabla 25:

Valores Hs _i		Carga (N)				
		3	6	9	15	20
Velocidad (rpm)	10	$8,7 \cdot 10^{-9}$	$4,35 \cdot 10^{-9}$	$2,9 \cdot 10^{-9}$	$1,74 \cdot 10^{-9}$	$1,3 \cdot 10^{-9}$
	20	$1,74 \cdot 10^{-8}$	$8,7 \cdot 10^{-9}$	$5,8 \cdot 10^{-9}$	$3,48 \cdot 10^{-9}$	$2,61 \cdot 10^{-9}$
	30	$2,61 \cdot 10^{-8}$	$1,3 \cdot 10^{-8}$	$8,7 \cdot 10^{-9}$	$5,22 \cdot 10^{-9}$	$3,9 \cdot 10^{-9}$
	40	$3,48 \cdot 10^{-8}$	$1,74 \cdot 10^{-8}$	$1,16 \cdot 10^{-8}$	$6,96 \cdot 10^{-9}$	$5,22 \cdot 10^{-9}$
	50	$4,35 \cdot 10^{-8}$	$2,17 \cdot 10^{-8}$	$1,45 \cdot 10^{-8}$	$8,7 \cdot 10^{-9}$	$6,5 \cdot 10^{-9}$
	60	$5,22 \cdot 10^{-8}$	$2,61 \cdot 10^{-8}$	$1,74 \cdot 10^{-8}$	$1,04 \cdot 10^{-8}$	$7,8 \cdot 10^{-9}$

Tabla 25. Valores parámetro de Hersey para la combinación de las velocidades y cargas.

2.1.2 CEF

Tal y como se introdujo en el apartado 1.3.1.3.2 “Gasto energético por rozamiento. Pérdidas mecánicas” para la estimación de las pérdidas energéticas ocasionadas por la fricción se ha hecho uso de la siguiente expresión:

$$CEF = 0,03077 \cdot \mu \cdot F_N \cdot \emptyset \cdot N \text{ [W]} \quad (13)$$

Donde:

- μ es el coeficiente de rozamiento [\emptyset]
- F_N es la fuerza normal aplicada [kgf]
- \emptyset el diámetro de rodadura [m]
- N es la velocidad de rotación del disco [rps]

Los valores de los parámetros ya son conocidos:

- Los valores de μ son los obtenidos del ensayo de fricción y serán unos para cada muestra. Estos valores pueden consultarse en las tablas 17 y 18 del apartado 1.5.3 “Ensayo de rozamiento en medios lubricados” para cada una de las muestras.
- Los valores de F_N son de 0,3; 0,6; 0,9; 1,5 y 2 kgf.
- El diámetro de rodadura es igual a 0,08 m.
- La velocidad de rotación del disco es de 0,166; 0,333; 0,5; 0,666; 0,833 y 1 rps.

De esta forma se pueden obtener los valores de CEF para cada muestra. A modo de ejemplo se muestra el cálculo del CEF de la muestra R para el caso de 10 rpm y 3N siendo $\mu=0,122$:

$$CEF_{3N,10rpm} = 0,03077 \cdot \mu \cdot F_N \cdot \emptyset \cdot N \quad (13)$$

$$CEF_{3N,10rpm} = 0,03077 \cdot 0,122 \cdot 0,3 \cdot 0,08 \cdot 0,166 = 1,53 \cdot 10^{-5} \text{ [W]}$$

En la tabla 26 se muestran los valores de CEF obtenidos para la muestra R:

CEF (W), R					
Velocidad (rps)	Carga (kgf)				
	0,31	0,61	0,92	1,53	2,04
0,167	1,53E-05	3,74E-05	6,29E-05	1,15E-04	1,68E-04
0,333	2,89E-05	7,03E-05	1,19E-04	2,26E-04	3,26E-04
0,500	4,14E-05	9,94E-05	1,69E-04	3,24E-04	4,62E-04
0,667	4,62E-05	1,24E-04	2,17E-04	4,12E-04	5,92E-04
0,833	5,33E-05	1,41E-04	2,58E-04	4,96E-04	7,07E-04
1,000	6,02E-05	1,61E-04	2,98E-04	5,65E-04	8,08E-04

Tabla 26. Valores CEF para la muestra R.

Del mismo modo se obtiene los valores de CEF obtenidos para la muestra R', que se muestran en la tabla 27:

CEF (W), R'					
Velocidad (rps)	Carga (kgf)				
	0,31	0,61	0,92	1,53	2,04
0,167	1,25E-05	3,11E-05	5,76E-05	1,07E-04	1,59E-04
0,333	2,28E-05	5,82E-05	1,13E-04	2,02E-04	3,08E-04
0,500	2,97E-05	7,90E-05	1,61E-04	2,92E-04	4,49E-04
0,667	3,61E-05	9,43E-05	1,97E-04	3,74E-04	5,72E-04
0,833	3,76E-05	1,09E-04	2,26E-04	4,55E-04	6,78E-04
1,000	4,07E-05	1,23E-04	2,60E-04	5,12E-04	7,53E-04

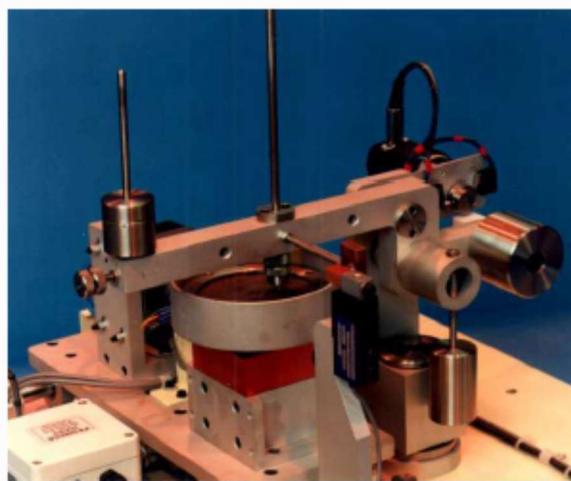
Tabla 27. Valores CEF para la muestra R'.

2.2 Fichas técnicas

2.2.1 Tribómetro TE 79 y modulo TE 79/P

TE 79 MULTI-AXIS TRIBOMETER

TE 79/P Indexing Pin on Disc Module



This Module comprises a rotating disc assembly mounted on a cross slide, thus allowing the pin sample to follow a spiral track on the disc, if required. Rotary and translatory motions are driven by stepper motors. The module locates on the base plate of the TE 79 Base Unit and is fixed in place with locating screws.

The disc specimen is mounted in a reservoir to retain lubricating fluid. The reservoir is mounted on a vertical drive shaft assembly. This is mounted on a traversing slide, which permits the radius to be changed during a test. The control software may be set to run with a constant rpm or constant velocity during a traverse.

Technical Specifications

Contact Configurations:

Ball on Flat
Pin on Flat
Customised Specimens

Normal Load:

0.1 to 50 N

Friction Force Range:

0 to 50 N

Humidity Sensor:

10 to 90% RH

Interface:

Phoenix Tribology USB micro-controller interface
COMPEND 2020

TE 79/P Indexing Pin on Disc Module

Contact Configurations:

Ball on Disc

Pin on Disc

Disc Diameter:

100 mm

Track Radius:

0 to 40 mm

Y Traverse Speed:

10 mm/min

Rotation Speed:

0 to 250 rpm

Sliding Speed:

up to 1 m/s

2.2.2 Tronzadora Buehler AbrasiMet

AbrasiMet™ 250 - Bench-Top Abrasive Cutter

Specifications

Motor Power & Consumption	4HP [3kW]
Current	13amps @ 230VAC; 6.5amps @ 460VAC; 7.5amps @ 400VAC
Wheel Speed	2800rpm @ 50Hz; 3400rpm @ 60Hz
Lighting	10 bright, high efficiency LED lights. One 18in [457mm] flexible gooseneck LED light
Sound Rating	≤76 db under no load at a distance of 39in [1m]
Coolant Tank Capacity	7gal [27l]
Abrasive Wheel Diameter & Arbor	10in [254mm] diameter; 1.25in [32mm] Arbor
Maximum Cutting Capacity	3.75in [95mm]
Side Port Dimensions	3 x 3in [76 x 76mm]
Vise Table Dimensions	9.5 W x 9.875in D [240 x 250mm]; 12mm T-slots
Compliance	CE

AbrasiMet™ 250 Abrasive Cutter

- Manual operation, 4HP
- 10in [254mm] wheel capacity
- 12mm T-Slot stainless steel bed
- Includes mechanical brake
- Compatible with PetroCut™ Vise Table & Rock Clamps

(Recirculating system and vising not included)

Part Number	Voltage/Frequency
10-10106-260	200-240VAC, 60Hz
10-10106-460	440-480VAC, 60Hz
10-10106-250	200-240VAC, 50Hz
10-10106-400	380-400VAC, 50Hz



Accessories for AbrasiMet 250

16-1497	Cart with wheels, for recirculating tank	10-2165-250 Recirculating Tank, 7gal [27l], [200-240VAC, 50Hz]
10-3531	Speed Vise Kit	10-2165-400 Recirculating Tank, 7gal [27l], [380-400VAC, 50Hz]
10-3532	Riser Block for Speed Vise	PetroCut Vise Table & Rock Clamps
95-C1702	Fastener Vise, for use in sliding vise	10-10106-000 PetroCut Vise Table and Rock Clamp Kit (includes PetroCut Vise Table, and two Rock Clamps, suitable for incorporation in AbrasiMet 250)
10-2170	Left Sliding Vise	10-10106-001 Rock Clamp Kit (includes two replacement Rock Clamps and posts suitable for mounting samples on PetroCut Vise Table)
10-2171	Right Sliding Vise	
95-C1821	Left MetKlamp™ Vise	
95-C1822	Right MetKlamp Vise	
80-10001	Heavy Duty Table with Cabinet	
10-2165-260	Recirculating Tank, 7gal [27l], [200-240VAC, 60Hz]	
10-2165-460	Recirculating Tank, 7gal [27l], [380-400VAC, 60Hz]	

Consumables for AbrasiMet 250

MetAbraze™ Abrasive Wheels 10in [254mm], 10 pack	
Recommended Use	Catalog Number
SuperAlloy	12-4205-010
HRC 60+	10-4210-010
HRC 50-60	10-4212-010
HRC 35-50	10-4216-010
HRC 15-35	10-4220-010
Delicate Cutting	10-4227-010
Non-ferrous, hard materials	10-4245-010
Non-ferrous, soft materials	10-4250-010

Cool 2 Cutting Fluid	
Size	Catalog Number
33.8oz [1l]	41-10102
1gal [3.8l]	41-10103
5gal [19l]	41-10104

2.2.3 Chorreadora Mega 4

ABRASIVOS Y MAQUINARIA, S.A.

Chorreado Cabina modelo SB y SB+



Pistola especial NPS con boquilla carburo de boro ø 8 mm
 Sistema de filtraje: grupo motor-ventilador con saco filtrante
 Compresor recomendado: 5'5-7'5 CV (500-700 litros/min)

PROVEEDOR HOMOLOGADO
 NATO OTAN
 n° fabricante 1792 B

Diseño y fabricación nacional, 40 años de experiencia.
 Cabinas robustas con componentes de primeras marcas
 Varios tipos de apertura para facilitar la carga

	CABINA DE CHORREADO MODELO SB Y SB+				
	Con 2 puertas laterales		Con apertura frontal total		
CARACTERISTICAS	SB+ 10x8	SB (+) 12x9	SB 10x8 AF	SB 12x9 AF	SB 12x12 AF
Medidas internas (mm)	1000x800x735	1200x900x600 (735)	1000x800x675	1200x900x675	1200x1200x835
Medidas útiles aprox. (mm)	950x720x735	1150x820x600 (735)	950x750x675	1150x855x675	1150x1150x835
Capacidad de carga (kg)	100	100	100	100	100
Consumo de aire (litros/min)	600	600	600	600	600
Boquilla carburo boro (mm)	Ø 8	Ø 8	Ø 8	Ø 8	Ø 8
Iluminación interior (W)	2x22	2x22	2x22	2x22	2x22
Motor grupo filtraje (kW)	0,25	0,37	0,25	0,37	0,37
Superficie filtrante (m ²)	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
Puertas laterales	2	1 o 2 modelo(+)	—	—	—

2.2.4 Limpiadora ultrasonidos Branson 2210



Bransonic® Baths

Equipment Specifications

Tank Capacity	Tank Size	Overall Size	Weight	Max Input Power	Heater Power	Max. Draw Power Req. (Watts)*
1/2 gal. (1.91 L)	L: 6" W: 5.5" D: 4"	L: 10" W: 12" D: 11.5"	7 lbs. (3.2KG)	80W	0 63 63	80 143 143
3/4 gal. (2.81 L)	L: 9.5" W: 5.5" D: 4"	L: 13.5" W: 12" D: 11.5"	9 lbs. (4. KG)	130W	0 109 109	130 239 239
1-1/2 gal. (5.71 L)	L: 11.5" W: 6" D: 6"	L: 16" W: 12" D: 14.5"	12 lbs. (5.4 KG)	130W	0 205 205	130 335 335
2-1/2 gal. (9.51 L)	L: 11.5" W: 9.5" D: 6"	L: 16" W: 15.5" D: 14.5"	14 lbs. (6.4 KG)	185W	0 284 284	185 469 469
5-1/2 gal. (20.81 L)	L: 19.5" W: 11.5" D: 6"	L: 24" W: 18" D: 14.5"	26 lbs. (11.8 KG)	320W	0 561 561	320 881 881

NOTE:

- All models have a frequency of 40kHz.
- In DTH cleaners, the temperature readout accuracy is $\pm 4^{\circ}\text{C}$.
- $120\text{V} \pm 10\%$, 60Hz is optimum voltage for all cleaners.
- All cleaners have CSA approval and comply with FCC regulations.
- All 220V units meet CE standards.
- * indicates power levels for MT, MTH and DTH cleaners, in that order.
- Units will cause GFI sockets to trip.
- All units have a ground leakage current less than .50ma.

2.2.5 Equipo de proyección térmica OF Castodyn DS 8000

CASTODYN® DS 8000



El soplete de proyección térmica CastoDyn DS 8000 está configurado en un avanzado sistema modular, que permite la proyección de una amplia gama de materiales para diversas aplicaciones que van desde las resistentes a la abrasión, hasta las barreras térmicas. El CDS 8000 puede ser incluso integrado en configuraciones totalmente automatizadas, como las de producción a larga escala.

Para la proyección térmica en caliente, de aleaciones Eutalloy RW

Para la proyección térmica en frío de aleaciones RotoTec y Proxon

Para la proyección térmica en frío de aleaciones MetaCeram

Para la proyección térmica en frío de CastoPlast, polvos plásticos termoendurecibles

Ventajas

- Máxima seguridad para el operario, soplete de muy fácil manejo
- Kit listo para puesta en marcha, con maleta para un fácil transporte
- Módulos de proyección estándar (SSM), para proyección de diferentes materiales
- Sistema único con corte rápido de llama, para mayor seguridad y fácil regulación de la llama

Kit completo 8000 con 4 módulos SSM
Ref. 8000 DS

	Caudal oxígeno/llama	Caudal acetileno	Caudal oxígeno (gas de transporte)
Módulo	Nl/MN	Nl/MN	Nl/MN
SSM10	1000	950	240
SSM20	1000	950	240
SSM30	2000	1800	80
SSM40	1000	950	330

LANZA CASTODYN SF

La Lanza CastoDyn SF incrementa nuestro rango de aplicaciones, permitiendo al soplete DS 8000 realizar una proyección térmica con fusión simultánea.

Datos Técnicos

Módulo de proyección standard	SSM 50	SSM 51	SSM 52 opcional
Tasa de deposición	4-9 kg/h	2-4 kg/h	1-2 kg/h
Rendimiento típico	>90 %	>90 %	>90 %
Caudal de oxígeno	2000 Nl/h	1000 Nl/h	500 Nl/h
Caudal de acetileno	1900 Nl/MN	950 Nl/MN	475 Nl/MN
Caudal de oxígeno (gas de transporte)	330 Nl/MN	240 Nl/MN	80 Nl/MN
Potencia de llama	~ 28 KW	~ 14 KW	~ 7 KW
Espesor del depósitoN (1 pasada)	1-3 mm	0,8-2,5 mm	0,8-2 mm



El soplete modular CastoDyn DS 8000 junto con la lanza SF es un conjunto robusto, refrigerado por agua que permite la deposición del recargue con una alta eficiencia, pudiéndose emplear tanto de forma manual como semi automizada.



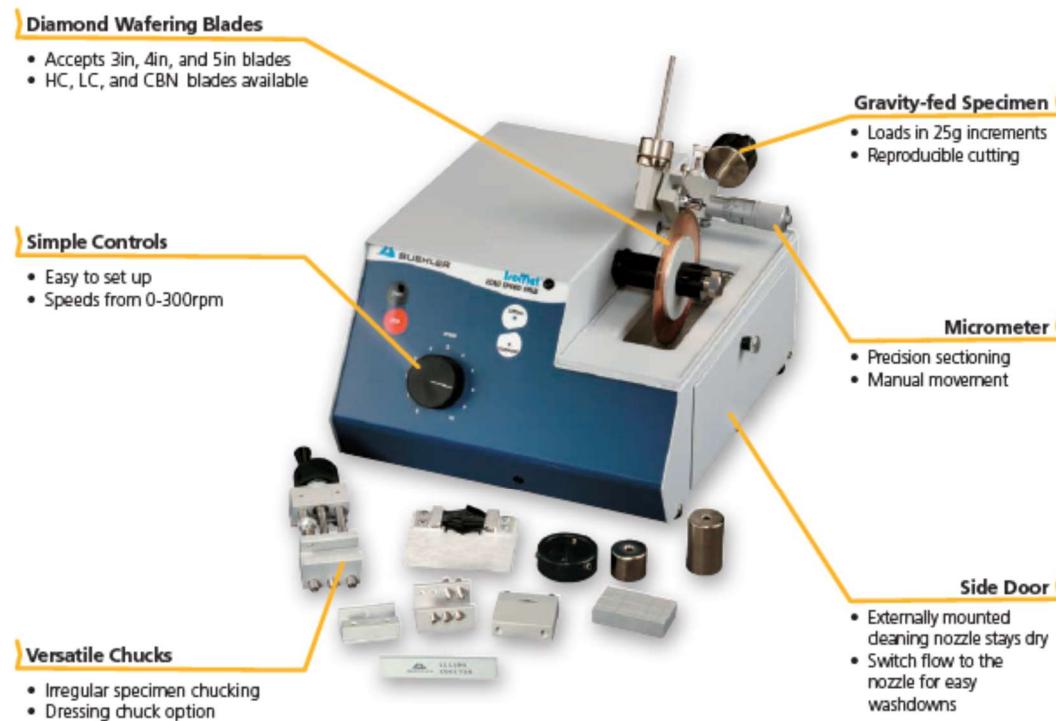
Esquema del conjunto Lanza SF, módulo y soplete CastoDyn DS 8000



2.2.6 Corte precisión Buehler IsoMet Low Speed Saw

IsoMet™ Low Speed Saw

The IsoMet Low Speed Saw is a precision sectioning saw designed for cutting various types of materials with minimal deformation. Its low kerf loss capability and great versatility in holding all types of sample shapes and configurations, gives today's laboratory a precision sectioning tool capable of cutting virtually any material including brittle or ductile metals, composites, cements, laminates, plastics, electronic devices and biomaterials.



At a Glance

- Low speeds (0-300rpm) provide quality cut surface
- Minimizes amount of induced damage
- Simple controls for set up and cutting
- Gravity-fed specimen feed for repeatability
- Adjustable cutting loads with 25g weights and sliding counterweight
- Precision Micrometer for specimen alignment
- Versatile chucks available for irregular specimens

IsoMet™ Low Speed Saw

- Compact saw uses gravity feed system to provide constant feed rate
- Produces minimum deformation
- $\pm 5\mu\text{m}$ or $\pm 0.0001\text{in}$ positioning via manual micrometer
- 0.02Hp motor
- 0-300rpm

(Includes 4in [102mm] IsoMet Blade for general sectioning, assorted weights, dressing stick, IsoCut™ Fluid, flanges and the following chucks: single saddle, irregular specimen and wafer)

Part Number	Voltage/Frequency
11-1280-160	115VAC, 50/60Hz
11-1280-250	230VAC, 50/60Hz
11-1280-170	115VAC, 50-60Hz



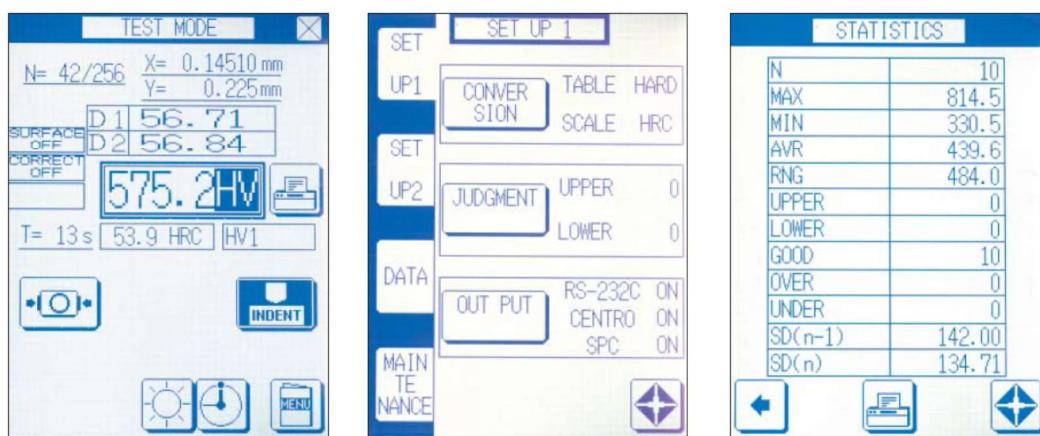
2.2.7 Microdurómetro Buehler Micromet

BUEHLER®
MICROMET® 5114
Microindentation Hardness Tester



Specifications

MICROMET® 5114 Microindentation Hardness Tester, with digital control and a thirteen step 1gf – 2000gf test load range (1gf, 2gf, 3gf, 5gf, 10gf, 25gf, 50gf, 100gf, 200gf, 300gf, 500gf, 1000gf, 2000gf). Tester features a manual turret providing three objectives (10x, 50x, and 100x), and one indenter position with choice of Vickers or Knoop mounted. Direct verification calibration of the tester and included test block is provided. A digital filar eyepiece provides measurement resolution to 0.01µm for precise measurement of microindentations with the corresponding hardness readings displayed on the large easy-to-read LCD console. Measured hardness values are displayed in Knoop or Vickers according to the indenter in use and can be displayed as converted hardness values in other scales such as Rockwell. Hardness data from batches of up to 256 indentations may be stored and statistically analyzed with report generation and printing on the maximum, minimum, average, range, standard deviation and number of values within and outside set limits of hardness. To help with the precise positioning of indentations, the tester also comes with digital readout stage XY movement micrometers with 1" (25mm) travel and 0.0004" (0.001mm) reading resolution. Digital readout of the micrometers can be set to metric or to inches. A 50W halogen illuminator with aperture diaphragm and removable green filter allows the tester to be used as a microscope. Special electronic test load application at loads 25gf and less to ensure applied load accuracy. The tester comes complete with a comprehensive instruction manual, a sample vise, dust cover and accessory kit containing: video port mount, certified test block, fuse, and tools.



Large font size for the hardness readout and icon driven menu options ensure ease-of-use.

A number of set-up screens are provided for a choice of hardness conversion, setting of limits and data

Comprehensive statistical analysis is provided for up to 256 hardness values.

3. Pliego de condiciones

Índice Pliego de condiciones

3.1 Condiciones de carácter general.....	134
3.1.1 Objeto y alcance.....	134
3.1.2 Documentos del proyecto.....	134
3.2 Condiciones particulares	135
3.2.1 Condiciones técnicas	135
3.2.1.1 Documentación de soporte	135
3.2.1.2 Equipos.....	135
3.2.1.3 Materiales	137
3.2.2 Condiciones facultativas	138
3.2.2.1 Lugar.....	138
3.2.2.2 Personal y responsabilidad	139
3.2.2.3 Seguridad	139
3.2.2.4 Normas de uso	139

3.1 Condiciones de carácter general

3.1.1 Objeto y alcance

En el presente proyecto se va a llevar a cabo una investigación sobre los efectos que supone la adición de alúmina a recubrimientos NiCrBSi en su comportamiento tribológico así como en el consumo energético de los mismos. Con este propósito se han obtenido dos tipos de muestras, uno con recubrimiento NiCrBSi y otro con NiCrBSi+alúmina con el fin comparar el comportamiento de ambos recubrimientos y poder analizar los cambios entre estos. Sobre estas muestras se han llevado a cabo ensayos de rozamiento, análisis de durezas y de microestructura, de forma que se recopila la información obtenida y se analiza obteniendo las correspondientes conclusiones.

El proyecto únicamente implica la realización de la investigación en sí, esto es la obtención de las muestras con sus respectivos recubrimientos, la realización de los diferentes ensayos sobre las muestras, el análisis de los datos recopilados y la obtención de resultados y conclusiones. Todos los equipos, elementos, materiales así como laboratorio que son necesarios para llevar a cabo el proyecto deberán de estar a disposición del equipo del proyecto.

3.1.2 Documentos del proyecto

El presente proyecto está formado por los siguientes documentos:

Documento 1. MEMORIA.

Documento 2. ANEXOS

Documento 3 PLIEGO DE CONDICIONES

Documento 4 PRESUPUESTO

3.2 Condiciones particulares

3.2.1 Condiciones técnicas

3.2.1.1 Documentación de soporte

A continuación se indican los documentos que deberán de ser entregados a la finalización del proyecto.

- Documento 1. Memoria. En este documento se definen los objetivos del proyecto, los antecedentes y todos los detalles más importantes relacionados con el ámbito del proyecto. Se incluirá una descripción del estado del arte del que se ha partido para llevar a cabo el proyecto incluyendo teoría, principios físicos y químicos, avances tecnológicos y demás información relevante sobre la tribología, los recubrimientos de NiCrBSi y la alúmina. También se describirá el procedimiento experimental de los diferentes ensayos del proyecto así como se mostrarán los resultados obtenidos con su interpretación y una conclusión la final del proyecto. Dicho de otra manera, en este documento se redacta toda la información esencial para entender el proyecto al completo.
- Documento 2. Anexos. Se desarrollarán todos los cálculos justificativos necesarios para la obtención de los resultados del proyecto. También se incluirá la documentación de los diferentes equipos utilizados en el proyecto.
- Documento 3. Pliego de condiciones. Este documento establece los requisitos, condiciones y normativa de carácter general del proyecto así como las condiciones técnicas, facultativas, económicas y legales del proyecto.
- Documento 4. Presupuesto. Es la cuantificación económica del proyecto. Se trata de un documento orientativo y sirve para tener una idea de los costes y las mediciones del proyecto en general.

3.2.1.2 Equipos

A continuación se citan los equipos utilizados para la realización de este proyecto. Todos estos equipos deberán de estar en un óptimo estado de conservación y funcionamiento haciendo posible reproducir los diferentes ensayos de este proyecto de forma correcta.

Tribómetro

El tribómetro es el equipo que permitirá reproducir el ensayo de rozamiento. Se deberá de disponer de un tribómetro que permita realizar ensayos que cumplan con las normas ASTM G-99 y DIN 50324, asegurando un contacto de configuración Clase 1 (“pin o bola cargada verticalmente contra un disco rotante horizontal”).

En el presente proyecto se ha utilizado el tribómetro Plint&Partners modelo TE-79 que incorpora el módulo P Indexing Pin on Disc Module para llevar a cabo ensayos de rozamiento del tipo Pin on Disk (PoD).

Herramienta de corte

Tronzadora de disco Buehler modelo Abrasimet 2 con refrigeración por agua.

Granalladora

Granalladora MEGA 4 fabricada por Abrasivos y Maquinaria S.A.

Equipo limpieza por ultrasonidos

Equipo de ultrasonidos Branson 2210 junto con un vaso de precipitado con acetona

Equipos de proyección térmica

Castodyn DS 8000 de Castolin Eutectics S.A. También será necesaria instalación auxiliar o bombonas de acetileno, oxígeno y aire a presión.

Equipo de refundido

Pistola de llama oxiacetilénica

Báscula

Báscula de precisión con sensibilidad menor a 0,1 mg.

Desbastadora

Cuatro desbastadoras Metaserv 2000 con discos de abrasivos de SiC con granulometrías de 240, 400, 800 y 1200 mm² respectivamente.

Pulidora

Dos pulidoras Buehler Metaserv, una con abrasivo de diamante y otra con partículas de alúmina.

Herramienta de corte de precisión

Buehler ISOMET Low speed Saw con disco de corte de diamante.

Embutidora

Embutidora Metaserv con metacrilato en polvo

Microdurómetro

Microdurómetro Buehler Micromet 1

3.2.1.3 Materiales

A continuación se presenta la composición y principales propiedades de los materiales utilizados.

NiCrBSi

Polvos de NiCrBSi de la marca Castolin Eutectic con referencia PE 3307 Eutalloy, el tamaño medio de las partículas es de entre 125 y 45 micras, una densidad de 4,3gr/Cm³ y una dureza de 330Hv30

Recubrimiento	C	Si	B	Cr	Fe	Ni
NiCrBSi(10%Cr)	0,4	3,1	1,6	10,1	2,8	81,94

Tabla 28. Composición química recubrimiento NiCrBSi(10,1% Cr)

Alúmina

Al₂O₃ micrométrica de la marca PLAXAIR con referencia ALO 101, con un tamaño medio de las partículas de 42 micras, densidad de 3,95gr/Cm³, y una dureza Vickers de entre 1500 y 1650 Kgf/mm².

Acero Inoxidable Aisi 304

ASTM	C	Si	Cr	Ni	Mn	P	S	N
A240/A240M	0,07	0,75	17,5-19,5	8-10,5	2,0	0,045	0,03	0,10

Tabla 29. Composición química acero inoxidable AISI 304 (%).

Densidad	7,93 g/cm3
Punto de fusión	1398-1454 °C
Calor específico	500 J/(Kg·K) a 20°C
Resistividad eléctrica	0,73 μΩ·m (20°C)
Permeabilidad magnética	1,02
Módulo elástico	193 GPa
Difusividad térmica	3,84 mm2/s
Coeficiente de conductividad térmica	16,3 (100 °C) 21,5 (500 °C)
Coeficiente de dilatación lineal	17,2 (0-100 °C) 17,8 (0-300 °C) 18,4 (0-500 °C)

Tabla 30. Propiedades físicas acero inoxidable AISI 304

ASTM	Resistencia a la tracción (MPa) ≥	Límite de elasticidad ≥ (MPa) 0.2%	Elongación en 50 mm (%, ≥)	Dureza Brinell (HBW) ≤	Producto
ASTM A240/ A240M	515	205	40	201	Placa de acero, hoja y tira

Tabla 31. Propiedades mecánicas acero inoxidable AISI 304

3.2.2 Condiciones facultativas

3.2.2.1 Lugar

El proyecto se ha llevado a cabo en colaboración con el Departamento de Ingeniería de Sistemas y Diseño rama Ingeniería de Fabricación de la Universidad Jaume I. Las instalaciones en las que se ha llevado la investigación han sido los laboratorios de la universidad que están dedicados a la investigación de ingeniería mecánica y materiales. Estos laboratorios cuentan con todos los equipos y elementos necesarios

para poder llevar a cabo los ensayos del proyecto, además de estar dotado de los medios de seguridad necesarios para la reproducción de dichos ensayos.

3.2.2.2 Personal y responsabilidad

Cabe destacar la labor llevada a cabo por el equipo de materiales del Departamento de Ingeniería de Sistemas y Diseño rama Ingeniería de Fabricación de la Universidad Jaume I. Este quipo está formado por investigadores doctores altamente cualificados con grandes conocimientos en la temática de este proyecto.

El Director del Proyecto y el responsable de laboratorio serán los encargados de asumir cualquier responsabilidad en todas las fases del proyecto asegurándose del correcto funcionamiento de los equipos, de la calidad de los materiales utilizados y de que los ensayos se realizan de forma segura y correcta.

3.2.2.3 Seguridad

Será necesario tomar las medidas de seguridad necesarias a la hora de llevar a cabo los diferentes ensayos, utilizando los elementos de seguridad que los equipos incorporan así como equipos de protección adicionales tales como EPI, en caso de necesitarlo.

3.2.2.4 Normas de uso

Todos los equipos, elementos y demás materiales utilizados son propiedad de la Universidad Jaume I, por lo que deberán de ser usados de forma correcta y según las indicaciones del responsable de laboratorio de forma que no se causen averías en los equipos como consecuencia de un mal uso de estos. También será necesario mantener en buenas condiciones los laboratorios en los que se llevan a cabo los ensayos y velar por la limpieza de los mismos.

4. Presupuesto

Índice Presupuesto

4.1 Coste personal.....	142
4.2 Coste material	142
4.3 Coste equipos	143
4.4 Costes totales	143

A continuación se detallan los costes repercutidos a lo largo de la realización del proyecto. El presupuesto abarca tanto el coste de los materiales, el coste del uso de los equipos así como los costes del personal que ha llevado a cabo el proyecto.

4.1 Coste personal

El equipo que ha llevado el proyecto consta de tres personas: el Ingeniero Industrial que desarrolla el proyecto, lleva a cabo las actividades del proyecto y redacta los documentos del proyecto, el Doctor Ingeniero director del proyecto y el Doctor Ingeniero que lleva a cabo labores de apoyo y de supervisión.

Las horas dedicadas por cada miembro son de:

- Ingeniero Industrial. Ha estado implicado en el proyecto durante 3 meses (12 semanas) 5 horas diarias en los días laborales, 300 horas en total.
- Director del proyecto. Ha estado implicado en el proyecto un total de 60 horas.
- Supervisor. Ha estado implicado en el proyecto un total de 150 horas.

En la tabla 32 se muestra un desglose del coste en personal del proyecto:

Personal	Tarea	Precio (€/h)	Horas	Coste (€)
Ingeniero Industrial	Realización del proyecto	12,50	300	3.750,00
Doctor Ingeniero Industrial	Director del proyecto	30,00	60	1.800,00
Doctor Ingeniero Industrial	Labores de apoyo y supervisión	20,00	150	3.000,00
Total				8.550,00

Tabla 32. Coste personal.

4.2 Coste material

En la tabla 33 se muestra el coste de los materiales utilizados en el proyecto:

Elemento	Cantidad	Precio (€)	Coste (€)
Barra AISI 304	1	10	10,00
Polvo NiCrBSi	90 gr	60 €/kg	5,40
Alúmina micrométrica	10 gr	40 €/kg	0,40
Disco AISI 304	1	40	40,00
Total			55,80 €

Tabla 33. Coste material.

4.3 Coste equipos

En la tabla 34 se muestra el coste que supone usar cada máquina utilizada a lo largo del proyecto.

Equipo	Coste Total (€)	Precio uso (€/h)	Horas de uso (h)	Coste (€)
Tronzadora Buehler Abrasimet 2	6.000,00	2,50	1	2,50
Chorreadora MEGA 4, Abrasivos y Maquinaria, S.A.	6.000,00	2,50	0,25	0,63
Limpiadora por Ultrasonidos Branson 2210	950,00	5,00	1,5	7,50
Desbastadora Buehler Metaserv 2000	850,00	3,00	5	15,00
Conjunto Proyección Térmica	10.000,00	40,00	2	80,00
Báscula de Precisión	300,00	0,50	0,5	0,25
Buehler ISOMET Low Speed Saw	5.400,00	5,00	2	10,00
Pulidora Buehler Diamante	400,00	3,00	1	3,00
Pulidora Buehler Alúmina	400,00	3,00	1	3,00
Embutidora Buehler Metaserv	600,00	3,50	1	3,50
Metacrilato en polvo Transpotic Powder	20,00	20,00	-	20,00
Microdurómetro Vickers Buehler Micromet 1	780,00	3,00	0,5	1,50
Tribometro Pin-On-Disc TE 79/P.	3.500,00	30,00	24	720,00
Microscopio electrónico de barrido (SEM)	-	12,00	2	26,00
TOTAL				893,88 €

Tabla 34. Coste equipos.

4.4 Costes totales

Finalmente, se muestra el coste total del proyecto en la tabla 35:

Costes	Valor (€)
Coste personal	8.550,00
Coste material	55,80
Coste equipos	893,88
Total costes	9.499,68
IVA (21%)	1.994,94
TOTAL	11.494,61 €

Tabla 35. Coste total proyecto.