



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

"ANÁLISIS TERMODINÁMICO DE LA SÍNTESIS Y DESGASTE DE
UN COMPÓSITO Si-SiC-FeSi₂ OBTENIDO POR EL MÉTODO DE SPS"

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

PRESENTA

ALEJANDRA MORENO BÁRCENAS

DIRIGIDA POR

M. en C. JOSÉ ANTONIO DEOLARTE POU

SINODALES

M. en C. J. ANTONIO DEOLARTE POU

DIRECTOR

Dr. J. D. OSCAR BARCEINAS SÁNCHEZ

SINODAL

Q. M. GRACIELA PAREDES ELÍAS

SINODAL

Q. M. ALEJANDRO ESQUIVEL ESTRADA

SINODAL

Agradezco a CIATEQ las facilidades y apoyo otorgado.

Especial reconocimiento al Dr. Zuhair A. Munir y su equipo de investigadores de la Universidad de California en Davis, por haber provisto las muestras necesarias para este trabajo.

Dedicada a dios

A mi familia

A las personas que me apoyaron

A la gente que me dio ánimos y esperanza de seguir

A mis compañeros y amigos por sus consejos

A todos los que no pongo sus nombres por no olvidar alguno

Muchísimas gracias.....

Resumen

Debido a los avances que ha tenido la industria aeroespacial se han puesto en el mercado nuevos materiales de alta ligereza y resistencia, llamados compuestos o compósitos. El consumo de éstos por la industria automotriz depende de su relación calidad/costo, su uso es ventajoso, desde el punto de vista comercial, cuando se utilizan como materiales sometidos a desgaste o como elementos estructurales, sin embargo, su uso principal es en elementos de fricción, como son las balatas y discos de embrague.

Este trabajo presenta un análisis termodinámico de la síntesis de un compuesto de matriz metálica, obtenido a partir de materias primas baratas, como son los polvos de silicio, carbono y hierro, preparado con la finalidad de que este material tenga una matriz blanda, que absorba la energía, que sea ligero, recordando que las nuevas tecnologías tienden a disminuir el peso, y que contenga un material reforzante, que dé rigidez y resistencia al desgaste.

Haciendo uso de las herramientas de la termodinámica básica, se determina si las reacciones absorben o generan calor, la estabilidad de las especies y la temperatura adiabática para obtención de carburo de silicio. Dicha información permite proponer las condiciones experimentales para su síntesis. Ésta se realiza en el Departamento de Ciencia de Materiales e Ingeniería Química de la Universidad de California Campus Davis, bajo la supervisión del Dr. Zuhair A. Munir, aplicando un novedoso método de activación por campo eléctrico, que utiliza el único aparato de sinterización plasma chispa (Spark Plasma Sintering - SPS) en el continente, el cual permite la obtención de materiales compuestos a una temperatura relativamente baja, en un tiempo corto, estabiliza fases de alta temperatura y controla el crecimiento de grano.

La caracterización de su resistencia al desgaste y la cuantificación de su coeficiente de fricción se realiza como una visión experimental a futuro, utilizando hierro gris como material de contraparte. Se obtuvieron resultados de fricción mayores a los convencionales, por lo que este material tiene posibilidades para su uso, además de representar un avance tecnológico en área de materiales.

DEDICADA A DIOS

Y A TODA LA GENTE QUE CREYO EN MI
A LAS PERSONAS QUE ME APOYARON

GRACIAS

Índice de Figuras

	Página
1. Los materiales y los procesos de fabricación.	4
2. Visión de conjunto para el C-17.	6
3. Puente entre las disciplinas.	9
4. Piezas de una nueva generación de materiales.	11
5. Esquema del equipo SPS.	20
6. Transición de fase.	25
7. Fenómenos que ocurren en el desgaste.	29
8. Mecanismo de desgaste adhesivo.	33
9. Arreglo geométrico.	37
10. Contacto de desgaste.	39
11. Prueba de desgaste usando cuatro balines.	40
12. Curva típica de desgaste.	43
13. Curva de desgaste para diferentes regímenes.	45
14. Tipos de ruedas.	48
15. Transiciones de fase.	51
16. Método gráfico para la determinación de la temperatura adiabática.	53
17. Método "block on ring".	56
18. Máquina de desgaste.	56
19. Esquema del brazo para la aplicación de la carga.	58
20. Diagrama de Ellingham para el sistema silicio.	64
21. Temperatura adiabática para la formación del carburo de silicio.	65
22. Representación gráfica del Siliciuro de Hierro.	67
23. Representación gráfica del Disiliciuro de Hierro.	68
24. Representación gráfica del Sistema Hierro.	69
25. Curva de desgaste para la muestra 1.	70
26. Curva de desgaste para el anillo de la muestra 1.	71
27. Gráfica que muestra el comportamiento del coeficiente de fricción para la muestra 1.	72
28. Curva de desgaste para la muestra 2.	73
29. Curva de desgaste para el anillo de la muestra 2.	74
30. Gráfica que muestra el comportamiento del coeficiente de fricción para la muestra 2.	75
31. Curva de desgaste para la muestra 3.	76
32. Curva de desgaste para el anillo de la muestra 3.	77
33. Gráfica que muestra el comportamiento del coeficiente de fricción para la muestra 3.	78
34. Curva de desgaste para la muestra 4.	79
35. Curva de desgaste para el anillo de la muestra 4.	80
36. Gráfica que muestra el comportamiento del coeficiente de fricción para la muestra 4.	81

Índice General

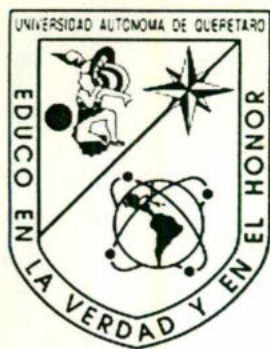
	Página
Índice General	i
Índice de Figuras	ii
Índice de Cuadros	iv
Resumen	
1. Introducción	1
2. Revisión bibliográfica	
2. 1. Antecedentes	3
2. 2. Materiales compósitos	12
2. 3. Técnicas de obtención del SiC	16
2. 4. Termodinámica	21
2. 5. Desgaste	27
2. 6. Fricción	46
3. Objetivos	49
3. 1. Objetivo general	49
3. 2. Objetivos particulares	49
4. Método experimental	
4.1. Termodinámica	50
4.2. Síntesis	54
4.3. Desgaste	55
4.4. Fricción	60
5. Resultados	
5.1. Termodinámica	62
5.2. Desgaste y fricción	70
6. Discusión	
6. 1. Discusión termodinámica	88
6. 2. Discusión de desgaste y fricción	88
7. Conclusiones	91
8. Bibliografía	93
Anexos	98

Índice de Figuras (continuación)

	Página
37. Curva de desgaste para la muestra 5.	82
38. Curva de desgaste para el anillo de la muestra 5.	83
39. Gráfica que muestra el comportamiento del coeficiente de fricción para la muestra 5.	84
40. Gráfica comparativa de los coeficientes de desgaste.	85
41. Gráfica comparativa de los coeficientes de fricción.	85
42. Gráfica de variabilidad del coeficiente de fricción durante la prueba.	86
43. Variabilidad promedio del coeficiente de fricción para cada muestra.	86
44. Comportamiento del coeficiente de fricción durante toda la prueba.	87

Índice de Cuadros

	Página
1. Composición química de las muestras.	54
2. Carga aplicada a cada muestra.	57
3. Condiciones de prueba para cada una de las Muestras.	60
4. Reacciones y entalpías del sistema silicio.	62
5. Energía libre de Gibbs para el silicio.	63
6. Energía libre de Gibbs para el hierro.	66
7. Resultados experimentales para la muestra 1.	70
8. Resultados experimentales para el anillo de la muestra 1.	71
9. Resultados experimentales para la muestra 2.	73
10. Resultados experimentales para el anillo de la muestra 2.	74
11. Resultados experimentales para la muestra 3.	76
12. Resultados experimentales para el anillo de la muestra 3.	77
13. Resultados experimentales para la muestra 4.	79
14. Resultados experimentales para el anillo de la muestra 4.	80
15. Resultados experimentales para la muestra 5.	82
16. Resultados experimentales para el anillo de la muestra 5.	83



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

FACULTAD DE QUÍMICA

**"ANÁLISIS TERMODINÁMICO DE LA SÍNTESIS Y DESGASTE DE UN
COMPÓSITO Si-SiC-FeSi₂ OBTENIDO POR EL MÉTODO DE SPS"**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

PRESENTA

ALEJANDRA MORENO BÁRCENAS

DIRIGIDA POR

M. en C. JOSÉ ANTONIO DEOLARTE POU

FACULTAD DE
QUÍMICA



BIBLOTECA

SANTIAGO DE QUERÉTARO, QUERÉTARO, 2003

1. Introducción

Entre las aleaciones de uso industrial se encuentran las aleaciones Fe-C (aceros y fundiciones), aleaciones base cobre, aluminio, plomo, cinc, níquel, etc. De éstas las más usadas son las Fe-C, las que a lo largo del tiempo han mostrado una gran versatilidad en cuanto a sus propiedades. Sin embargo, estas aleaciones tienen una densidad alta.

Durante los últimos años se han realizado innumerables investigaciones referentes a la creación de nuevos materiales. La mayoría de éstos se consideran como materiales compuestos o compósitos, los cuales combinan sus propiedades individuales para ser: ligeros, resistentes a la corrosión, al impacto, a la flexión o al choque térmico. Además de que en algunos casos resultan ser más baratos, el secreto de estos nuevos materiales reside en los cambios que se presentan durante su conformación. La densificación de polvos metálicos y cerámicos por chispazo eléctrico o plasma chispa, ha resultado apropiado para la fabricación de materiales con propiedades antes no logradas. Actualmente estas técnicas son exploradas principalmente por investigadores y empresarios japoneses. La producción de compuestos por este método permite obtener estructuras que no pueden ser preparadas por técnicas ordinarias, controla el crecimiento de grano, además de que se realiza a una temperatura relativamente baja y en un tiempo corto.

El compósito sintetizado está formado de silicio, carburo de silicio y disiliciuro de hierro, obtenido a partir de materias primas baratas: polvos de silicio, carbono y hierro.

Haciendo uso de las herramientas de la termodinámica básica, que estudia las interacciones que tienen lugar dentro de un sistema, sus leyes son aplicables a todos los fenómenos naturales, y se cumplen rigurosamente ya que están basadas en la conducta de los elementos o compuestos de un sistema. Sin embargo, la termodinámica no considera la cinética, es decir el tiempo de transformación, debido a que su interés se centra en los estados inicial y final

de un sistema. Por lo que no se obtienen tiempos, sino solo afirmaciones de lo que es factible que ocurra.

La evaluación de las entalpías de reacción determina si las reacciones que ocurren durante la síntesis son exotérmicas o endotérmicas. La temperatura adiabática indica si es posible obtener carburo de silicio a temperaturas relativamente bajas, por último los diagramas de Ellingham muestran la estabilidad y espontaneidad de las especies posibles.

La ventaja que el compuesto como un material de fricción es evidente, mediante la evaluación de la resistencia al desgaste, la experimentación se basa en muestras de distinta composición química, utilizando las mismas condiciones de prueba y el mismo material de contraparte, mostrando que el carburo de silicio y la matriz formada podrían tener una aplicación importante como compuesto de fricción.

Revisión Bibliográfica

2. 1. Antecedentes

Historia del uso de los materiales compuestos

La competencia entre los materiales es evidente en la composición de un automóvil americano. En 1978 éste pesaba al rededor 1800 Kg, y estaba compuesto de aproximadamente 60% de hierro y acero, de 10 a 20% de polímeros y de 3 a 5% de aluminio. En comparación con 1985 pesaba 1400 Kg, y constaba de 50 a 60% de hierro y acero, 10 a 20% de polímeros y un 5 a 10% de aluminio. Así, en el periodo de 1978 a 1985 el porcentaje de acero descendió, el de aluminio se incremento y el de los polímeros permaneció constante. Este tipo de automóvil en 1992 muestra una disminución sustancial en el uso de hierro y acero, y un aumento en el uso de otros materiales.

En la década pasada, ha hecho su aparición una nueva familia de cerámicos de ingeniería a base de nitruros, carburos y óxidos. Se están encontrando constantemente nuevas aplicaciones para estos materiales, particularmente para usos a alta temperatura y electrónica.

Este tipo de materiales estan siendo intensamente investigados en los últimos años, lo que ha hecho posible la producción de una multitud de materiales con relaciones altamente favorables de peso-resistencia, lo que incrementa la eficiencia de máquinas y equipos, como se muestra en la Figura 1. La mayoría de estos materiales han sido desarrollados para la industria aerospacial, pero algunos han tenido otras aplicaciones, como en los motores de automóviles.

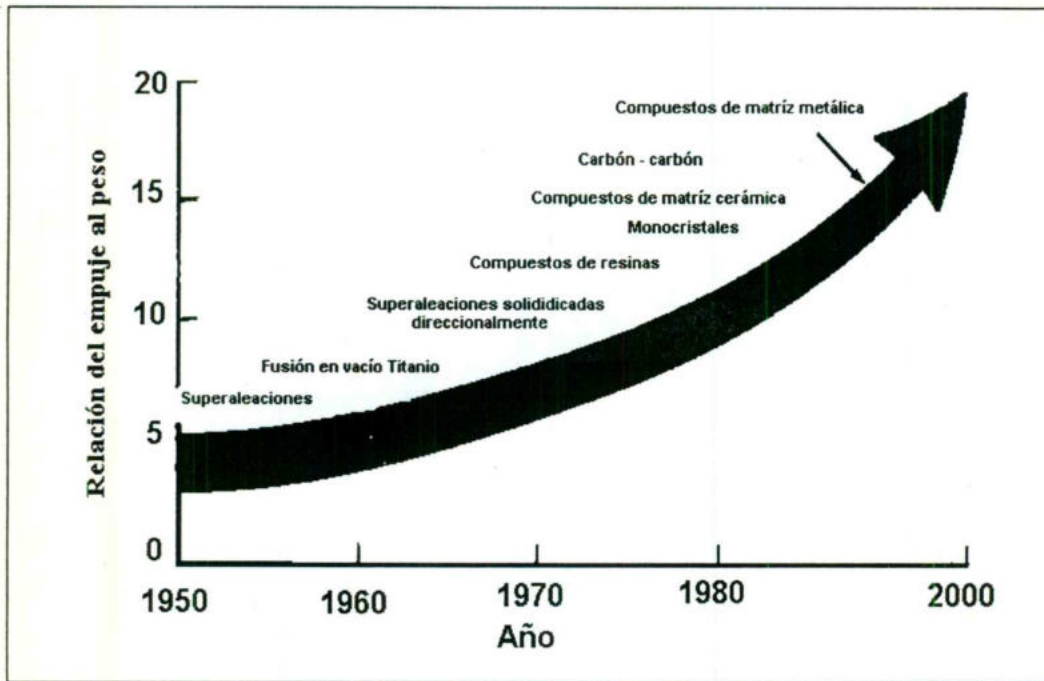


Figura 1. Los materiales y los procesos de fabricación en los pasados años han estado asociados al aumento en la eficiencia de los equipos.

Los materiales compuestos, como las combinaciones de resinas epóxicas con fibra de vidrio o grafito, se están haciendo cada vez más importantes en aplicaciones estructurales críticas. Se ha pronosticado una ganancia anual media del 5% en el uso de estos materiales. Por ejemplo, el C-17 para la década de los 90 estaba construido con 7.5 toneladas de materiales compuestos. Este aparato tiene una envergadura de 50 metros y utiliza 7.5 toneladas de materiales compuestos avanzados, Figura 2. Asimismo, se espera que los aviones comerciales se construyan con materiales compuestos cada vez más avanzados en el futuro (Smith, 1993).

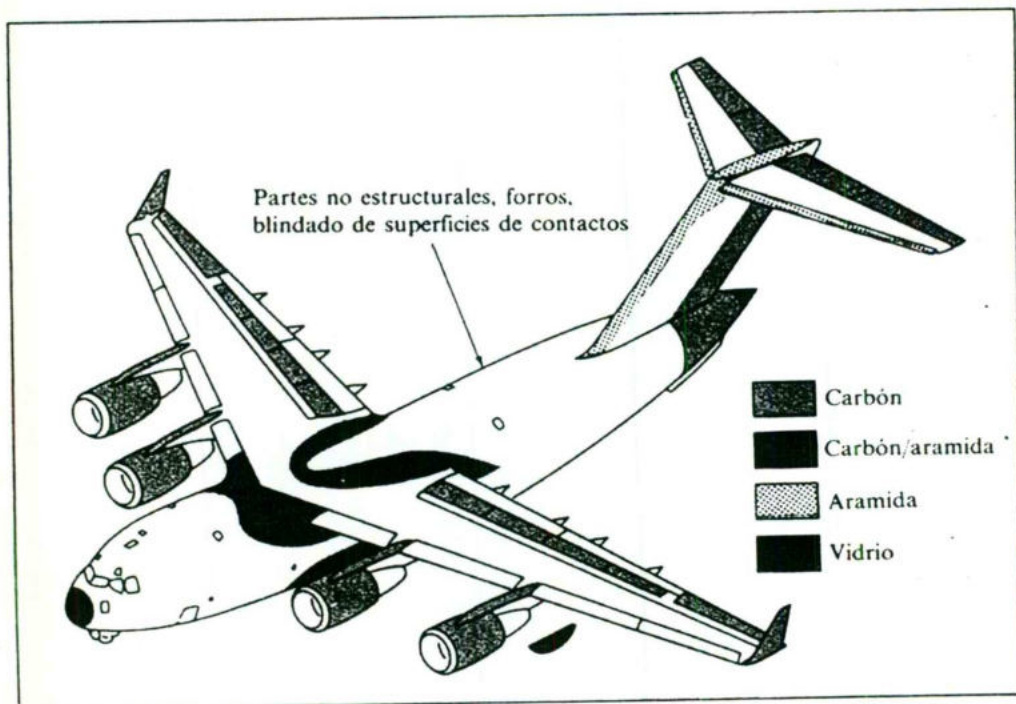


Figura 2. Visión de conjunto de una amplia variedad de piezas de materiales compuestos utilizados en un avión de transporte C - 17.

Situación actual

La incorporación de nuevas tecnologías en México depende mucho del grado de desarrollo de las distintas especialidades de la ingeniería, pero también de factores económicos y de mercado. Aunque no se ha hecho, hasta donde se sabe, una investigación exhaustiva de la utilización de nuevas tecnologías en las distintas ramas industriales, sí se conoce la situación general algunas de ellas (González, 2001).

La producción de nuevos materiales y su procesamiento hasta convertirlos en productos acabados, constituyen una parte importante de nuestra economía actual. Investigadores e ingenieros trabajan en el desarrollo de nuevos materiales o en modificar las propiedades de los ya existentes.

La investigación en 1989 estaba retrasada en lo que se refiere al desarrollo de compuestos de matriz metálica y otros tipos de compuestos inter metálicos refractarios, que ahora son objeto de investigación para ser usados en vehículos de vuelo hipersónico (Smith, 1993).

El CONICYT (Comisión Nacional de Investigación Tecnológica de Chile) realizó el primer "Pan American Advanced Studies Institute" (PA ASI), Este encuentro fue patrocinado conjuntamente con: Office of Energy Research, National Science Foundation y University of Tennessee, Estados Unidos; Universidad de Yucatán y Academia Mexicana de Materiales, México; y Brasil. El tema elegido para el primer PA ASI fue "Synthesis and Processing of Advanced Materials", abordando áreas tales como: Materiales Estructurales, Materiales Nanoestructurados, Biomateriales, Compósitos, y Superconductores de alta temperatura, entre otros, teniendo como objetivo difundir los últimos conocimientos en el área, desarrollar proyectos de investigación internacionales, y establecer vínculos dentro de la Comunidad Científica Panamericana.

La aplicación de las ciencias básicas da como resultado el desarrollo de nuevas tecnologías, las ciencias básicas marcan un pauta en la aplicación de cada una de las áreas del conocimiento, como se muestra en la Figura 3.

Situación actual

La incorporación de nuevas tecnologías en México depende mucho del grado de desarrollo de las distintas especialidades de la ingeniería, pero también de factores económicos y de mercado. Aunque no se ha hecho, hasta donde se sabe, una investigación exhaustiva de la utilización de nuevas tecnologías en las distintas ramas industriales, sí se conoce la situación general algunas de ellas (González, 2001).

La producción de nuevos materiales y su procesamiento hasta convertirlos en productos acabados, constituyen una parte importante de nuestra economía actual. Investigadores e ingenieros trabajan en el desarrollo de nuevos materiales o en modificar las propiedades de los ya existentes.

La investigación en 1989 estaba retrasada en lo que se refiere al desarrollo de compuestos de matriz metálica y otros tipos de compuestos intermetálicos refractarios, que ahora son objeto de investigación para ser usados en vehículos de vuelo hipersónico (Smith, 1993).

El CONICYT (Comisión Nacional de Investigación Tecnológica de Chile) realizó el primer "Pan American Advanced Studies Institute" (PA ASI), Este encuentro fue patrocinado conjuntamente con: Office of Energy Research, National Science Foundation y University of Tennessee, Estados Unidos; Universidad de Yucatán y Academia Mexicana de Materiales, México; y Brasil. El tema elegido para el primer PA ASI fue "Synthesis and Processing of Advanced Materials", abordando áreas tales como: Materiales Estructurales, Materiales Nanoestructurados, Biomateriales, Compósitos, y Superconductores de alta temperatura, entre otros, teniendo como objetivo difundir los últimos conocimientos en el área, desarrollar proyectos de investigación internacionales, y establecer vínculos dentro de la Comunidad Científica Panamericana.

La aplicación de las ciencias básicas da como resultado el desarrollo de nuevas tecnologías, las ciencias básicas marcan un pauta en la aplicación de cada una de las áreas del conocimiento, como se muestra en la Figura 3.

Esto es sólo un ejemplo de la búsqueda de materiales nuevos y optimizados e utilidad práctica. En muchos casos lo que hoy es imposible mañana será realidad (McHague, 2000).

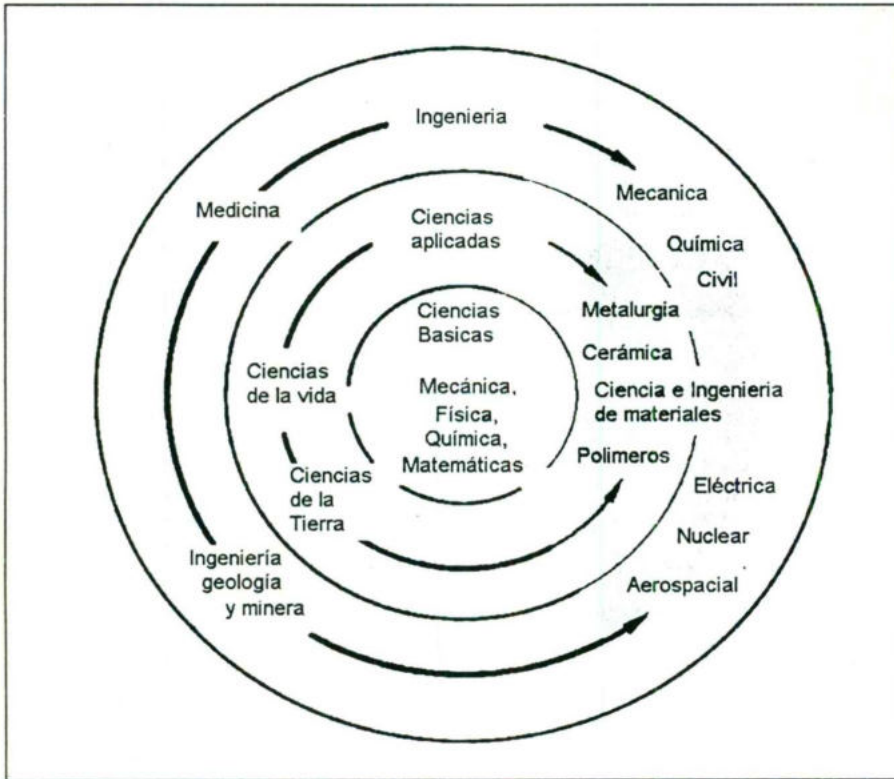


Figura 3. Diagrama que muestra como la metalurgia, la ciencia e ingeniería de los materiales forman un puente que una las ciencias básicas con las disciplinas de la ingeniería, teniendo como fin básico el conocimiento de los materiales.

Origen de la viabilidad

Los materiales compiten unos con otros por su existencia en los nuevos mercados. De un periodo de tiempo a otro, aparecen muchos factores que hacen posible la sustitución de un material por otro, evidentemente el costo es uno de los factores más importantes.

Si se hace una innovación importante en el procesamiento de un cierto tipo de material, de manera que su costo se abarate sustancialmente, éste puede reemplazar a otro. Un ejemplo de la sustitución de un material por otro se muestra en la Figura 4. Estos son unos ejemplos de la nueva generación de materiales compósitos cerámicos recientemente desarrollados para su aplicación en motores de última generación. Otro factor que da lugar al reemplazamiento de los materiales, es el desarrollo de un nuevo material con propiedades especiales. Como resultado, a la vuelta de un cierto tiempo, encontramos que los materiales han cambiado.

Aunque los materiales cerámicos han sido de costo bajo, anteriormente su procesamiento era lento y laborioso, además, de que la mayoría de éstos se dañaban fácilmente por impacto a causa de su baja o nula ductilidad. Actualmente existen técnicas para producir compuestos cerámicos de alta resistencia al impacto, por lo que estos materiales muestran un resurgimiento para aplicaciones en ingeniería, especialmente donde existen altas temperaturas o condiciones extremas (Smith, 1993).

El desarrollo de nuevos materiales continuara en el futuro, ya que se desarrollan otros materiales y nuevos procesos.

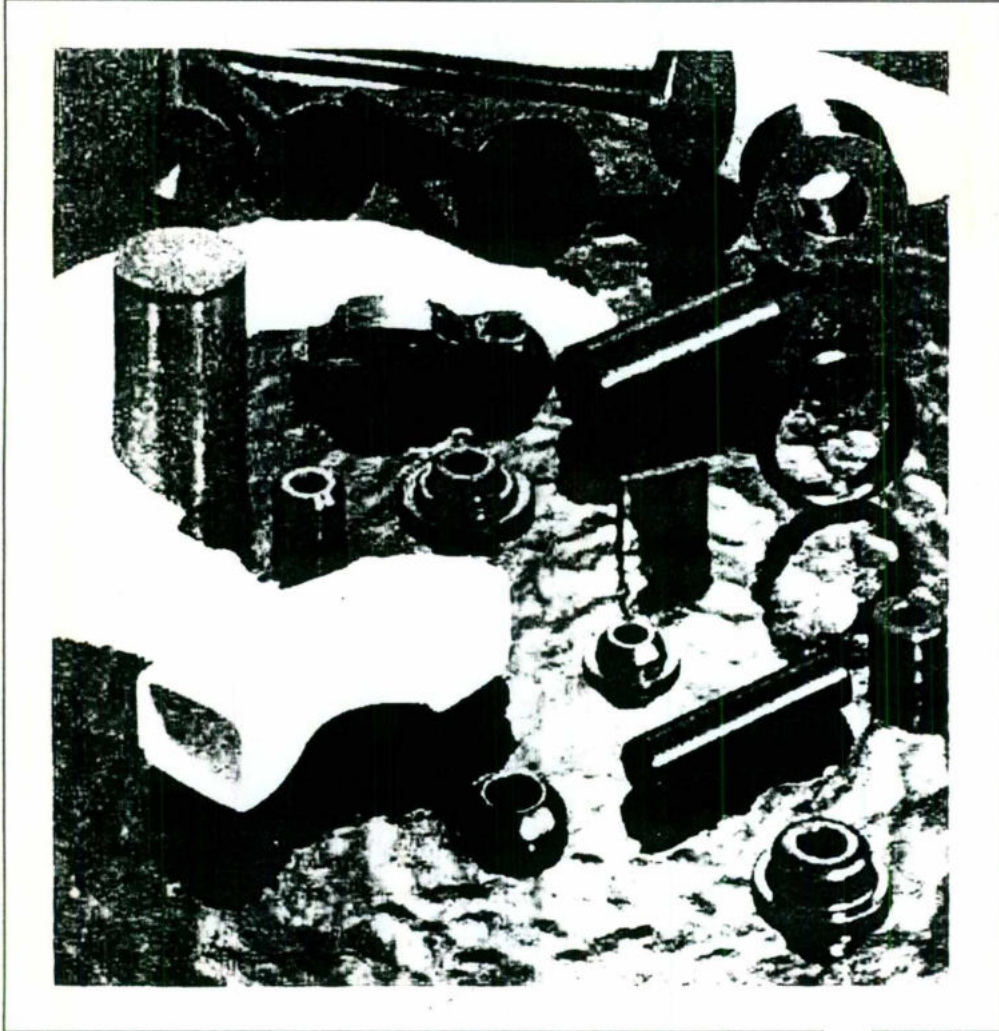


Figura 4. Las piezas en negro son válvulas, asientos de válvula y pernos de pistón hechos de nitruro de silicio. La pieza en blanco es una abertura para el colector hecha de un material compuesto por alúmina.

2. 2. Materiales compósitos

Definición de Compósito

Un compósito es un grupo de materiales constituidos por una mezcla o combinación de dos o más micro/macro constituyentes que difieren en forma y composición química, además de ser esencialmente insolubles uno en el otro.

Clasificación de los Compósitos

Los compósitos pueden clasificarse en tres tipos: compósitos de matriz metálica (CMM), de matriz cerámica (CMC), (Smith, 1993) y de matriz polimérica (CMP) (Jennings, 2002). Unos de los principales compósitos son los reforzados con fibras continuas, reforzados con fibras discontinuas o con partículas, regulares o irregulares.

CMM reforzados con fibras continuas: en este tipo de compósitos los filamentos continuos, que están embebidos en la matriz, proporcionan una rigidez (módulo de elasticidad) y alta resistencia.

CMC reforzados con fibras continuas de SiC: las fibras de SiC son encapsuladas en un material vitro-cerámico. Estos materiales encuentran utilidad en tubos para intercambiadores de calor, sistemas de protección térmica y materiales para ambientes de corrosión-erosión.

CMM reforzados con partículas o fibras discontinuas: éstos tienen una resistencia, rigidez y estabilidad dimensional mayor que las aleaciones metálicas no reforzadas. Los CMM reforzados con partículas se preparan principalmente por pulvimetalurgia y procesos de infiltración.

CMC reforzados con fibras discontinuas: las fibrillas de cerámica pueden incrementar significativamente la tenacidad de los cerámicos monolíticos. La adición de un 20% en volumen de fibrillas de SiC puede incrementar la tenacidad de la alúmina de 4.5 a 8.5 MPa m^{1/2} (Smith, 1993).

CMP reforzados: éstos se conocen ampliamente como plásticos reforzados. Específicamente, estos compósitos son fibras que refuerzan una matriz

polimérica. Lo más comúnmente es que el refuerzo sea fibra de vidrio. Las fibras que más refuerzan son aquellas como las de armida y carbón. La matriz polimérica puede ser una resina termofija, como el poliéster, y éster del vinilo, o resinas epóxicas. Las resinas como las fenólicas, el poliuretano y el silicón, son de uso general (Jennings, 2002).

Bibliografía relevante

Dentro del tema de materiales compósitos existen numerosos artículos que se encargan de divulgar las cualidades de éstos. Sin embargo en este apartado sólo se detallarán aquellos que han dado pauta para el desarrollo de este trabajo en cuanto a sus ventajas y con ello su posible aplicación industrial.

Durante 1976, el equipo de Brahma dentro de la "Formula Uno" utilizó frenos con disco de carbono en su modelo BT45, las ventajas de éste radicaban en el ahorro de más de 25 kilos y en el hecho de que no sufren pérdidas de eficiencia trabajando a elevadas temperaturas a las que son sometidos. Después de tan sólo 2 grandes premios recurrieron a los discos tradicionales de hierro, debido a que el exceso de temperatura hacía hervir el líquido de frenos. El equipo Brahma continuó desarrollando este tipo de frenos durante los siguientes 6 años, tratando de encontrar soluciones al problema de altas temperaturas generadas. Concluyendo que esto se producía debido al elevado grado de fricción del carbono, pero el coeficiente de fricción a la vez era responsable de que las distancias de frenado se redujeran notablemente. Por eso el resto de los equipos de la categoría comenzó a seguir el paso de Brahma en cuanto a la utilización de carbono en los frenos, luego que en la temporada de 1982 dicha escudería equipó un modelo BT49/D con discos de carbono, habiendo ya superado los problemas de origen térmico.

Por tanto los discos de carbono continuaron usándose unos cuantos años más en la Formula Uno, hasta la aparición de un nuevo material de características superiores (Wells, 2002).

Mientras tanto en el instituto de manufactura tecnológica de componentes cerámicos y compósitos de la universidad de Stuttgart. Trabajaban en la

producción de un material cerámico carbono-silicio. Basados en que un compuesto cerámico, con fibras de carbón y metal adicional, desarrollan una combinación de alta resistencia, bajo peso, estabilidad a altas temperaturas, resistencia a la corrosión y sobre todo un coeficiente de fricción estable.

En el uso de silicio enriquecido con aleaciones de FeSi_{85} o FeSi_{90} , se observaron que las propiedades estructurales son mucho mejores y que las fibras de carbón se preservan por más tiempo. La aplicación de estas aleaciones reduce el volumen de las fases de hierro, estableciendo la preservación de las fibras de carbono y de la estructura de la matriz.

Los resultados mostrados por pruebas tribológicas muestran que la distancia de prueba determina un comportamiento estable asintótico, cuando el coeficiente de fricción (μ) se eleva por un mayor contacto, donde la matriz es rígida y la fricción es controlada por el carbón. Esta observación se confirmó en los resultados de FeSi_{75} aleada con Si-SiC, del cual el compuesto aumenta su coeficiente de fricción.

Por lo tanto los discos de freno pueden ser aplicados en autos convencionales tomando ciertas consideraciones. El uso de compuestos intermetálicos hierro-silicio no es sólo para reducir el costo de los materiales, sino que además reduce la reactividad química de los metales, finalmente un componente con matriz intermetálica mejora el comportamiento de la fricción (William, 1992).

Actualmente Porsche AG ha iniciado la instalación del sistema de frenos cerámicos Porsche Ceramic Composite Brake (PCCB), el cual consta de un disco cerámico de SiC, dotado de unos conductos de ventilación y se empezará a ofrecer en el modelo turbo como elemento opcional a partir del diciembre del 2002. Aun cuando los frenos convencionales de disco utilizados por Porsche son de fundición gris, este material proporciona incomparables valores de desaceleración y ha quedado probado en innumerables pruebas, la utilización de un nuevo material compuesto que ofrece una capacidad y eficacia mayores, y marca un nuevo punto de referencia en el campo de la tecnología de frenos.

El sistema PCCB proporciona el coeficiente de fricción más alto en el mercado (0.5), lo que representa un incremento en la fase inicial de frenada de un 25% con relación a los discos convencionales de fundición. Los discos de freno cerámicos llegan a alcanzar temperaturas de hasta 800 °C, muy por encima de la temperatura de los discos convencionales. Estos últimos se dilatan a alta temperatura y su superficie se ondula. Estas deformaciones impiden que las pastillas de freno se “apoyen” sobre los discos, y en consecuencia producen molestas vibraciones en el volante de dirección al frenar. Efecto que en el sistema PCCB no sucede, además de asegurar una resistencia a la abrasión notablemente superior y una vida útil de aproximadamente 300 000 kilómetros (Manual Técnico, 2002).

2. 3. Técnicas de obtención de compósitos de SiC

El procesamiento de compósitos puede llevarse a cabo por varios métodos, desde los más sencillos hasta los más sofisticados, pasando desde la dispersión del material de refuerzo por agitación mecánica en metal fundido (Hallen y *col*, 1997), hasta procesos que involucran activación de campo.

El carburo de silicio (SiC) está entre los materiales de refuerzo más frecuentemente utilizados en la fabricación de compósitos de matriz metálica o cerámica, sus propiedades más atractivas son su alta resistencia al desgaste y una resistencia a la corrosión buena. Además, puede desarrollar interfases fuertes con algunas aleaciones metálicas, como las base aluminio, magnesio, níquel y hierro. El carburo de silicio de mayor pureza se utiliza en componentes electrónicos y el restante en herramientas abrasivas (Richerson, 1992).

Infiltración

Es la infiltración de una preforma cerámica con el metal o aleación fundida, que embargo, el proceso para elaborar la preforma representa un reto en sí. La infiltración puede limitarse debido a la presencia de porosidad cerrada. La carburización directa por infiltración de una preforma de carbón con silicio fundido, resulta en un compósito de Si-SiC que posee una excelente resistencia a la flexión (Shin y *col*, 1999).

Respecto al control dimensional, se ha encontrado que el desarrollo in situ de compósitos, ofrece una ventaja enorme en la obtención de partes con sus dimensiones finales o que pueden maquinarse en una condición de presinterización (Citak y *col*, 1999).

Proceso Acheson

El SiC se produce industrialmente mediante el proceso Acheson, en el cual se obtienen simultáneamente SiC de bajo grado, para abrasivos y grado alto, para aplicaciones eléctricas.

Este proceso consiste en calentar, por resistencia eléctrica, un montículo de una mezcla de arena sílica y coque hasta 2200°C. A ésta temperatura el coque reacciona con la sílice para producir SiC más CO. Al final del proceso se rompe el

montículo y separan los fragmentos. Al interior se observa un ciclo de cristales hexagonales verdes de SiC con un bajo contenido de impurezas; Alrededor del núcleo el nivel de impurezas es mayor. La capa exterior contiene material sin reaccionar que es agregado en un siguiente lote a procesar (Juárez, 2002).

Prensado en caliente (HP)

El prensado en caliente es el proceso ideal para la fabricación de estructuras laminadas intrincadas (Refrac, 2002). Esta técnica consiste en el calentamiento por inducción de formas de aproximadamente 125 milímetros de diámetro por 100 milímetros de largo, esto se puede realizar en dados de grafito, a una temperatura máxima de 1900°C y una carga máxima de 20 toneladas en una atmósfera de nitrógeno o argón. Los polvos se pueden consolidar axialmente antes de ser prensados en caliente, en la matriz se aplica una capa de polvo de nitruro de boro para prevenir la reacción entre el dado de grafito y el polvo de SiC (Dan, 2001).

Para el Si₃N₄ en un experimento realizado por Ordoñez, se mezclaron los polvos en seco, fueron compactados de forma axial y densificados a 1750°C a una presión de 100 MPa en atmósfera de argón, manteniendo estas condiciones por un tiempo de 15 minutos para posteriormente esperar el enfriamiento (Ordoñez y col, 2000).

El prensado en caliente (HP) y prensado isostático en caliente (HIP) son dos de las mejores técnicas disponibles en la actualidad para la densificación de polvos cerámicos, metálicos y/o combinación de éstos, logrando piezas volumétricas "relativamente" densas con granos desarrollados. Dichas técnicas sin embargo presentan limitantes importantes como elevados precios de equipo y operación, y velocidades de calentamiento / enfriamiento lentas, por lo que se requieren largos tiempos de densificado (aprox. 2 horas). Durante el calentamiento y en paralelo con la difusión del material, al cerrar los poros entre partículas, se genera la difusión de especies presentes con el respectivo crecimiento de grano (Rodríguez, 1999).

Síntesis auto propagada a alta temperatura (SHS)

También llamada síntesis por combustión. Esta técnica basada en la iniciación de una reacción auto sostenida por interacción sólido-sólido y sólido-gas. Estas interacciones son típicamente pequeñas, pero que producen una velocidad de desplazamiento elevada, y que está asociada a las altas temperaturas.

Por el proceso de SHS se sinterizan estructuras cúbicas metaestables, partiendo de una solución sólida tetragonal (Munir y *col*, 2000). La síntesis de compósitos por combustión se basa en la temperatura adiabática de reacción, así ésta se autopropaga a una velocidad relativamente alta a pesar de la compleja naturaleza que estas tengan. Sin embargo, puesto que existe una diferencia en la velocidad de enfriamiento dentro de la muestra no es posible controlar la morfología (Xia y *col*, 2000)

Sinterización plasma chispa (SPS)

También conocida como sinterización por pulsos eléctricos (PECS) fue desarrollada en Japón en 1990. En algunas investigaciones la llaman como sinterización activada por plasma (PAS), si bien el SPS involucra la activación de campo que ha mostrado ser útil en el desarrollo de materiales monolíticos, compósitos que es imposible obtener por otros métodos (Shon y *col*, 1998), es comúnmente usada para producir materiales de ingeniería densos como los cerámicos; aun así existen relativamente pocos reportes en la aplicación de éste proceso (Takeuchi y *col*, 2000). SPS permite una consolidación del polvo suelto o el producto de una reacción de síntesis, dentro de una matriz, para ser sinterizado bajo un calentamiento uniforme hasta obtener una densidad alta, a temperaturas relativamente bajas y cortos periodos de sinterización. Esta técnica se basa en la aplicación de pulsos eléctricos de alta corriente y bajo voltaje DC a un polvo confinado en una matriz que se encuentra en una cámara de vacío o con atmósfera inerte, como se muestra en la Figura 5. Los parámetros que influyen la síntesis y densificación incluyen al calentamiento por el efecto Joule, el plasma generado dentro de las cavidades existentes, el efecto de electro migración y la presión aplicada acelera el proceso. Típicamente en pocos minutos, comparados con la sinterización convencional y un calentamiento de 600 K por minuto, nos lleva a periodos de sinterización de hasta 15 minutos, que

suelen ser ventajosos dando una superioridad en el control del crecimiento de grano, lo que hace al SPS el proceso más adecuado para el procesamiento de materiales nanométricos (Rodríguez, 1999). Los resultados por Tomanari muestran que cortos periodos de sinterización son un factor esencial en la obtención de granos nanométricos, es efectivo también para estabilizar fases cúbicas a temperatura ambiente, esto significa que el proceso puede estabilizar fases de elevada temperatura (Tomanari y col, 1999). La mayoría de los otros procesos convencionales para el procesamiento de este tipo de materiales promueven el crecimiento de grano con el concomitante deterioro de sus propiedades (Rodríguez, 1999).

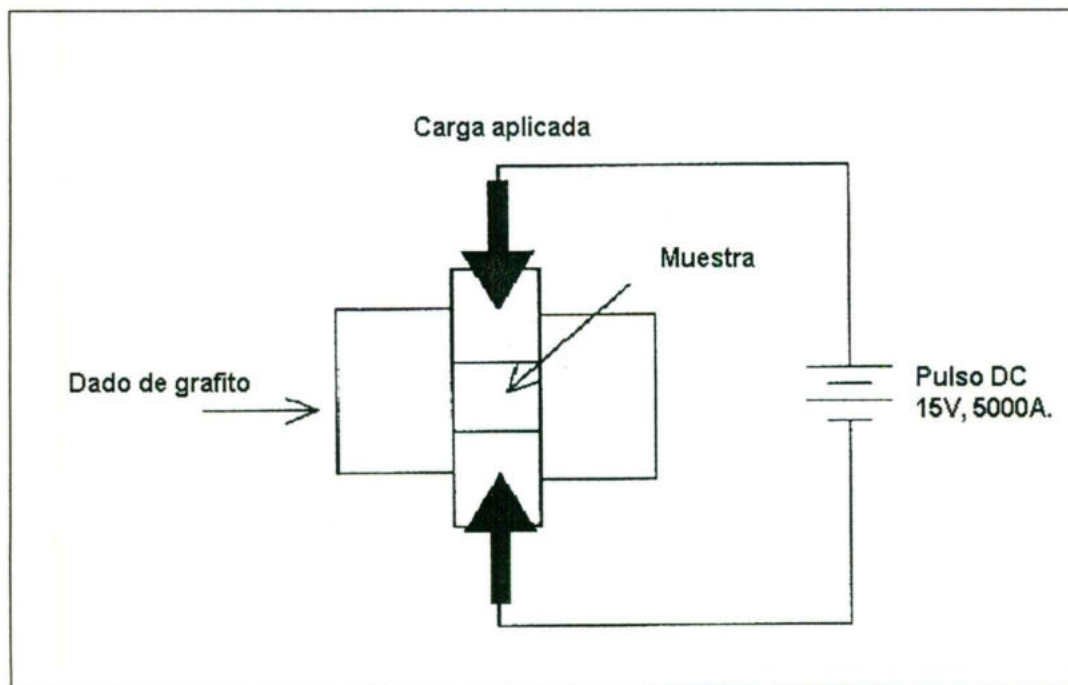


Figura 5. Diagrama esquemático de la muestra en el equipo de SPS.

2. 4. Termodinámica

Una de las manifestaciones más fundamentales de la naturaleza es la energía que acompaña a todos los cambios y transformaciones. Es materia de la termodinámica estudiar las interacciones que tienen lugar en los sistemas, sus leyes son aplicables a todos los fenómenos naturales, y se cumplen rigurosamente ya que están basadas en la conducta de los sistemas. Sin embargo la termodinámica no considera el tiempo de transformación, su interés se centra en los estados inicial y final de un sistema (Maron y col, 1973).

Capacidad Calorífica

La capacidad calorífica se define como el calor absorbido por grado de aumento en la temperatura para un sistema. Simbólicamente está dado por el límite:

$$\lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{q}{\Delta T} \quad (1)$$

Si el proceso tiene lugar a volumen constante, no se efectúa trabajo de expansión.

$$\left(\frac{\delta q}{\delta T} \right)_v = C_v \quad (2)$$

Donde q es el calor, T la temperatura y C_v la capacidad calorífica a volumen constante. Para la adición de calor a presión constante, $dH = dq$ y la ecuación 3 es la definición termodinámica de C_p (John, 1998).

$$\left(\frac{\delta H}{\delta T} \right)_p = C_p \quad (3)$$

H es la entalpía, C_p el cambio de entalpía a presión constante.

$C_p = C_v$ son iguales para sólidos y líquidos, sin embargo $C_p = C_v + R$ para gases donde R es precisamente la constante de los gases (Maron y col, 1973).

Casi todas las ecuaciones para la capacidad calorífica de sólidos, líquidos y gases son empíricas. Se acostumbra expresar la capacidad calorífica a presión constante, como una función de la temperatura mediante una serie de potencias.

$$C_p = a + bT + cT^{-2} + dT^2 \quad (4)$$

$$\text{ó } \Delta C_p = \Delta a + \Delta bT + \Delta cT^{-2} + \Delta dT^2 \quad (5)$$

En donde ΔC_p es la diferencia de productos menos reactivos para una reacción (Himmelblau, 1995).

Entalpía

La primera ley de la termodinámica establece la conservación de la energía, es decir, ésta ni se crea ni se destruye, solo se transforma.

Los cambios térmicos a presión constante se expresan más adecuadamente mediante la función H , llamada entalpía o contenido calorífico de un sistema. Esta función se define por la relación;

$$H = U + PV \quad (6)$$

Donde U es la energía interna, P es la presión y V es el volumen (Maron y col, 1973). La entalpía de una sola fase se puede expresar excesivamente en términos de temperatura y presión.

$$H = H(T, P) \quad (7)$$

A fin de calcular la entalpía por unidad de masa, aprovechamos la propiedad de que ésta también es un diferencial exacto. Si obtenemos la derivada total de H podemos formar una expresión análoga a la ecuación:

$$dH = \left(\frac{\delta H}{\delta T} \right)_P dT + \left(\frac{\delta H}{\delta P} \right)_T dP \quad (8)$$

Por definición, $(\delta H / \delta T)_P$ es la capacidad calorífica a presión constante, denotada con el símbolo C_p . Para casi todos los propósitos prácticos, $(\delta H / \delta T)_T$ es tan pequeño a presiones moderadas que podemos ignorar el segundo término del miembro derecho de la ecuación 8. Así podemos calcular los cambios de entalpía si integramos la ecuación como sigue:

$$H = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \quad (9)$$

o para $\Delta H = H_2 - H_1$

$$H_2 - H_1 = \int_{T_1}^{T_2} \Delta C_p dT \quad (10)$$

A menudo se utiliza un conjunto de condiciones de referencia, puesto que la entalpía no tiene un valor absoluto, sin embargo se ha asignado en forma arbitraria un valor de cero a la entalpía para elementos puros a una atmósfera y 25 °C, como referencia, al calcular los cambios, las condiciones de referencia se cancelan, como puede verse a continuación:

Estado inicial del sistema

Estado final del sistema

$$\text{entalpía} = H_1 - H_{ref}$$

$$\text{entalpía} = H_2 - H_{ref}$$

Cambio de entalpía neta

$$(H_2 - H_{ref}) - (H_1 - H_{ref}) = H_2 - H_1 \quad (11)$$

El cambio de entalpía depende sólo de los estados inicial y final del sistema (Himmelblau, 1995). Un valor positivo de $\Delta H = H_2 - H_1$ muestra que el calor es absorbido (endotérmico) durante el proceso, mientras que uno negativo muestra que desprende calor (exotérmico) (Maron y col, 1973).

Los Cambios de entalpía que tienen lugar en una sola fase se conocen como cambios de calor sensible, Los cambios de entalpía para las transiciones de fase se denominan calor de fusión y calor de vaporización o calor latente, Los cambios de entalpía para una sustancia pura en función de la temperatura se muestra en la Figura 6.

Dada la ecuación 5 para la diferencia de capacidad calorífica, podemos calcular el cambio de entalpía por mol, integrando dicha ecuación respecto a la temperatura.

$$\Delta H = \int_{T_1}^{T_2} (\Delta a + \Delta bT + \Delta cT^{-2} + \Delta dT^2) dT \quad (12)$$

Con el fin de dar cuenta de los cambios de energía causados por una reacción química, se incorpora la entalpía de cada constituyente individual una cantidad adicional denominada, cantidad que analizaremos detalladamente (el subíndice F denota formación). Así, para el caso de una sola especie A que no contiene efecto de presión alguna sobre la entalpía, y omite cambios de fase, el cambio de la entalpía específica respecto al estado estándar de referencia está dado por;

$$\Delta H_A = \Delta H_{FA} + \int_{T_{ref}}^T \Delta C_{p,A} dT \quad (13)$$

Para varias especies, tendríamos la ecuación;

$$\Delta H_{MEZCLA} = \sum_{i=1}^S n_i \Delta H_{Fi} + \sum_{i=1}^S \int_{T_{ref}}^T n_i \Delta C_{p_i} dT \quad (14)$$

Donde i , designa a cada especie, n_i es el numero de moles de la especie i , y S es el numero total de especies, a esta ecuación se le puede agregar \pm las entalpías asociadas a los cambios de fase (Himmelblau, 1995).

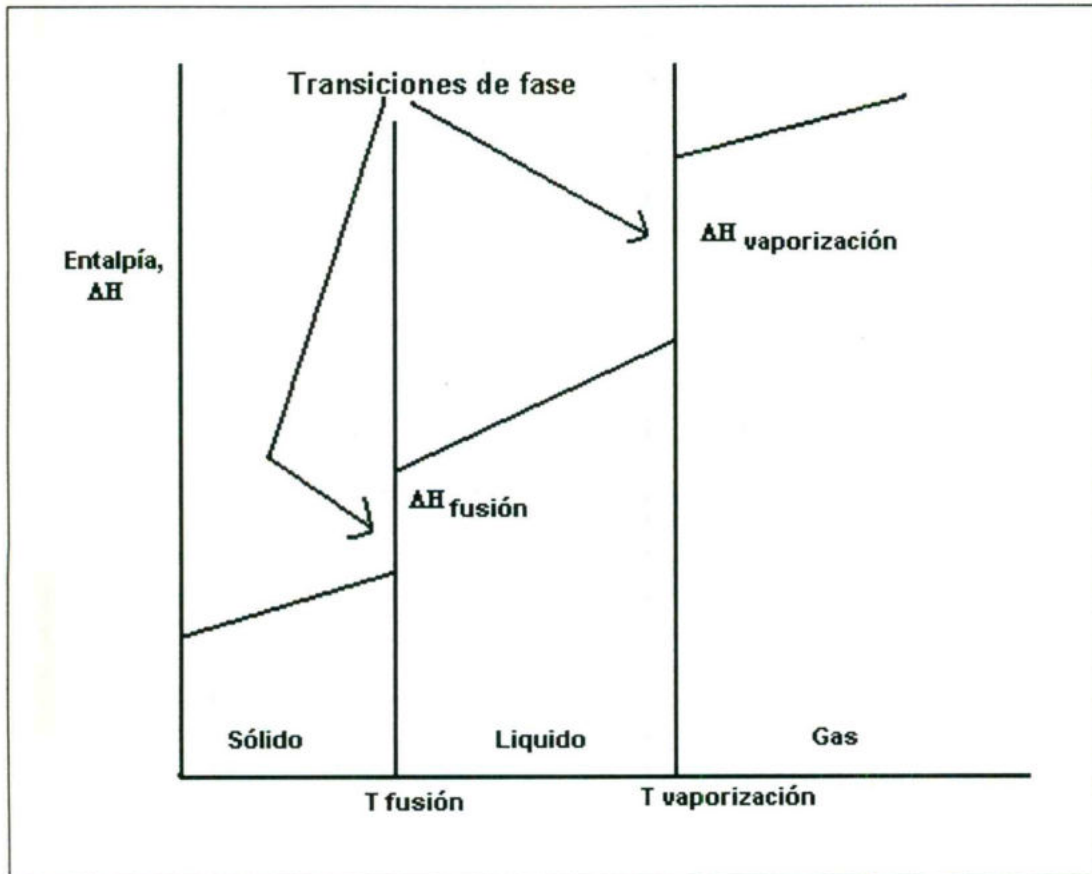


Figura 6. Las líneas verticales representan los cambios de calor latente que ocurren durante una transición de fase.

Temperatura de adiabática

Se define como la temperatura que se alcanza dentro del proceso cuando la reacción se efectúa en condiciones adiabáticas, es decir, cuando no hay intercambio de calor entre el recipiente en el que ocurre y el entorno. La temperatura de reacción adiabática nos indica el límite superior de la temperatura de un proceso. No podemos llegar a más, pero la temperatura real si puede ser menor. La temperatura de reacción adiabática nos ayuda a escoger los tipos de materiales y el equipo en el que se llevará a cabo la reacción (Himmelblau, 1995).

A fin de determinar la temperatura de inicio para una mezcla de compuestos, en un proceso exotérmico se determina la temperatura de inicio de la combustión que se calcula a partir de la temperatura a la cual la entalpía es igual a cero.

Como no hay intercambio de calor entre el sistema y sus alrededores, cualquier trabajo que se realiza en un proceso adiabático, se hace a expensas de la energía interna. Sí se hace trabajo sobre el sistema, todo él incrementa su energía interna y en consecuencia su temperatura. Por el contrario, si la energía interna de un sistema disminuye en consecuencia su temperatura también (Upadyaya y col, 1979).

Energía libre de Gibbs

La energía libre de Gibbs está dada por

$$G = H - TS \quad (15)$$

$$\text{ó } \Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (16)$$

En condiciones de presión y temperatura constantes, un proceso sólo puede ocurrir en la dirección en que haya disminución de la energía libre de Gibbs, es decir, Un proceso espontáneo conduce a un valor mínimo de ΔG , y el signo de ΔG debe ser negativo, un valor positivo de ΔG indica que el proceso tiende a llevarse a cabo espontáneamente en la dirección opuesta.

La energía libre de Gibbs normal de formación, ΔG_f^0 (a 298.15 K), se define como el cambio de energía libre de Gibbs correspondiente a la formación de la sustancia en su estado normal a partir de los elementos en sus estados normales.

El cambio de energía libre de Gibbs con la temperatura está dado por la ecuación de Gibbs-Helmholtz (John, 1998)

$$\left[\frac{\delta \left(\frac{G}{T} \right)}{\delta T} \right]_P = \frac{-H}{T^2} \quad (17)$$

o bien

$$\left[\frac{\delta \left(\frac{\Delta G}{T} \right)}{\delta (1/T)} \right]_P = \Delta H \quad (18)$$

La energía libre de Gibbs, proporciona una referencia confiable para predecir el comportamiento de reacciones químicas en función de la temperatura. Se establece que para una reacción que posea un valor más pequeño de ΔG que otra, los productos de la primera reacción serán más estables que los de la segunda.

Por otra parte Ellingham graficó datos experimentales de ΔG contra T , para la oxidación y desulfuración de algunos metales. A pesar de que las funciones de energía libre incluyen términos cuadráticos o logarítmicos, éstas se aproximan a líneas rectas sobre rangos de temperatura en los cuales no ocurren cambios físicos. Por lo que esta relación se puede expresar como:

$$\Delta G = A + BT \quad (19)$$

En donde A es el cambio de entalpía de la reacción, B es el cambio de entropía. La gráfica obtenida con esta ecuación se conoce como diagrama de Ellingham (Gaskell, 1982).

2. 5. Desgaste

Definición de desgaste

Un sistema tribológico está formado por dos o más cuerpos en contacto dinámico o estático, que se afectan mutuamente en una gran variedad de formas. La tribología involucra el estudio de la adhesión, abrasión, fricción, desgaste y lubricación entre dos o más cuerpos en contacto. Una definición aceptada de desgaste es: remoción de material de la superficie de un sistema tribológico resultado de su movimiento relativo y contacto. Otros fenómenos como la

deformación, reacciones químicas o fatiga son sólo casos particulares de determinados sistemas tribológicos.

Durante el desgaste ocurren muchos fenómenos que resultan en interacciones complejas como se muestra en la Figura 7 (Archard, 1999).

El desgaste sigue una relación simple llamada ecuación de Archard, que se expresa como:

$$K = V/S = W*P/H \quad (20)$$

Donde K es el coeficiente de desgaste, V el volumen perdido, P es la presión o carga aplicada, S la distancia recorrida, H la dureza por indentación y W es la constante que dependerá del material y las condiciones de prueba. Esta constante, según el mecanismo de que se trate toma diferentes valores y significados, y se puede calcular al realizar pruebas de desgaste (Sarkar, 1977).

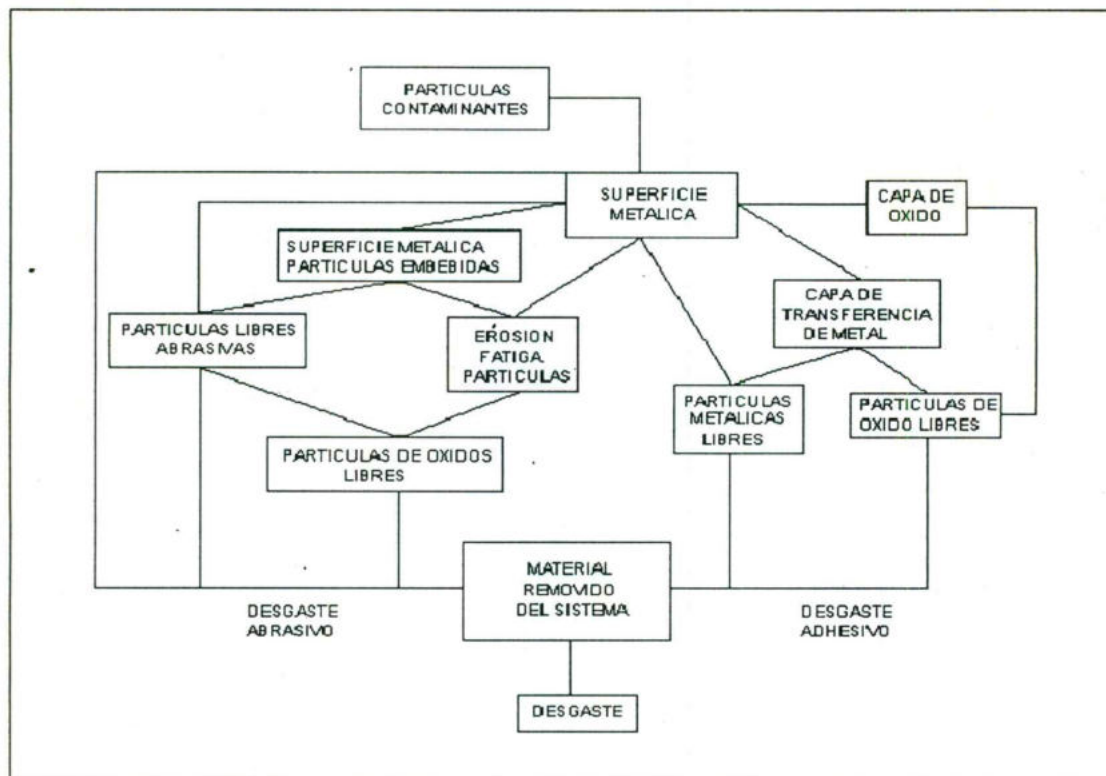


Figura 7. Esquema de la relación entre varios fenómenos que ocurren en el desgaste.

Mecanismos de Desgaste

Las superficies de los sólidos no son perfectamente planas, sino que muestran irregularidades o asperezas. Solo los materiales frágiles, que experimentan clivaje a lo largo de ciertos planos cristalinos, o los monocristales, presentan superficies regulares y planas. Cuando dos sólidos entran en contacto las asperezas estarán soportando la carga aplicada, existiendo la posibilidad de que ocurra deformación elástica y plástica en éstas. Tales deformaciones continuarán hasta que el área de contacto real sea lo suficientemente grande para soportar la carga. Los puntos de contacto pueden formar uniones de acuerdo con las teorías de adhesión. Los contactos atómicos con o sin contaminantes de la superficie, admiten fuerzas de cohesión para crear uniones entre las contrapartes. Durante el movimiento deslizante las uniones se deforman continuamente, plásticamente hasta producir grietas que resultan en fracturas, produciéndose el desprendimiento de material y consecuentemente el desgaste. Este es el fenómeno básico del desgaste; la componente de la fuerza que actúa en la dirección del deslizamiento es la fuerza de fricción.

Se ha observado que puede haber intercambio de material entre las contrapartes del sistema tribológico. Este es el mecanismo de adhesión presente en el desgaste, el cual depende principalmente de la naturaleza química de los sólidos en contacto. Otro de los mecanismos que producen fractura y pérdida de material es el microcorte. Si una aspereza dura o partícula, producto del desgaste, se desliza sobre la superficie de un material suave, ésta actuará como micro-herramienta de corte, removiendo el material en forma de rebabas o fragmentos. La profundidad y tamaño del surco dependerá del elemento cortante y la carga aplicada.

El impacto de partículas sobre una superficie constituye otro mecanismo de desgaste. Las condiciones de impacto que se establecen en la superficie de contacto son la velocidad, número de partículas y ángulo de incidencia. Si la energía transferida a la superficie no puede ser disipada como calor o deformación plástica, la superficie se relaja formando grietas por impacto.

Durante movimientos cíclicos las superficies de un tribosistema pueden estar sujetas a fenómenos de fatiga. Las fluctuaciones de carga pueden iniciar la

nucleación y crecimiento de grietas por fatiga y terminar en falla. Numerosas clases de fenómenos físicos y químicos pueden promover el agrietamiento.

Parte del trabajo de fricción se disipa, generalmente, como calor y el incremento de temperatura en pequeñas áreas de contacto pueden ser alto, dando lugar a otros fenómenos como la soldadura y en general a desviaciones de lo esperado a temperatura ambiente.

Una combinación de una alta concentración de deformación y temperatura elevada activa una serie de cambios en la capa debajo de la superficie de contacto. Los fenómenos internos que se pueden presentar son: deformación plástica, cambios microestructurales, como la transformación de fases, y de composición química.

Además existen fenómenos externos que dependen de la interacción con la atmósfera que rodea al sistema tribológico, resultando en la formación de una capa superficial, que se puede deber a: a) reacciones químicas; en el aire las superficies limpias se cubren con una capa de óxido o productos de corrosión; y b) adsorción; las moléculas de gases, predominantemente vapor de agua, se fijan a la superficie formando una segunda capa sobre la anterior. Algunas veces estas capas pueden evitar la formación de uniones minimizando el desgaste en sistemas aparentemente no lubricados.

La pérdida de los gases adsorbidos por calentamiento y la ruptura de la capa de óxido cuando se aplica una carga normal alta, expone la superficie de las contrapartes incrementando el desgaste (Sarkar, 1977).

Tipos de Desgaste

Durante el desgaste, el movimiento relativo entre las contrapartes puede ser unidireccional o bidireccional, deslizante o rodante. Un material puede interactuar con otro o con líquidos tales como aceite lubricante o humedad. Dependiendo de la naturaleza del medio envolvente y su interacción bajo carga, el desgaste puede ser clasificado en adhesivo y abrasivo.

Desgaste Adhesivo

Se caracteriza por la deformación y agrietamiento de uniones adhesivas. Eventualmente grietas por fatiga nuclean y se propagan hasta que se desprenden fragmentos de material. También puede ocurrir la adhesión y transferencia de material en ambas direcciones, que finalmente resulte en la pérdida de fragmentos. Dependiendo de la geometría, el mecanismo de adhesión produce protuberancias en la superficie sometida a desgaste, formadas por el material transferido de una superficie a la otra. En la Figura 8 se muestra este mecanismo de desgaste.

El desgaste adhesivo se puede expresar como:

$$V = Z \cdot A \cdot S \quad (21)$$

Donde Z es el número de átomos removidos por evento, A área total, V volumen removido y S es la distancia recorrida; pero como

$$A = P/\sigma \quad (22)$$

Donde P es la carga aplicada y σ el esfuerzo de fluencia del material suave.

Sustituyendo en (2) obtenemos:

$$V/S = Z \cdot P/\sigma \quad (23)$$

Que tiene la forma de la relación de Archard. Ahora bien utilizando la relación del esfuerzo de fluencia y la dureza se obtiene:

$$H = 3 \cdot \sigma \quad (24)$$

Llegamos finalmente a la relación de Archard, solo que en este caso la constante tiene que ver con el número de átomos removidos por evento

$$V/S = 3 \cdot Z \cdot P/H \quad (25)$$

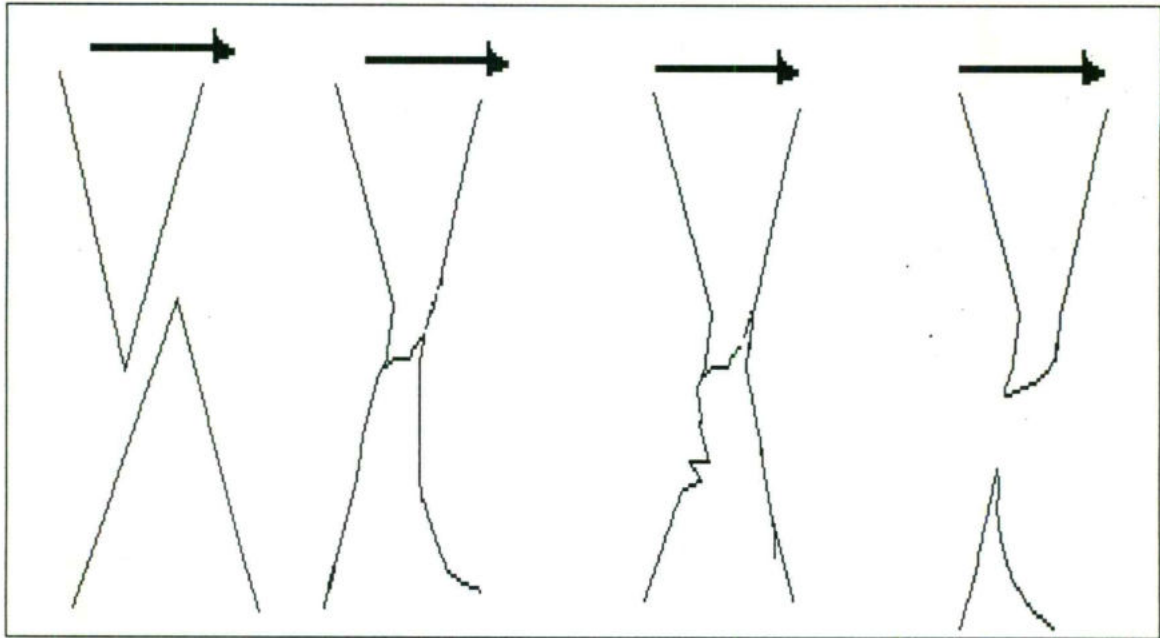


Figura 8. Mecanismo de desgaste adhesivo.

Desgaste Abrasivo

El desgaste abrasivo se caracteriza por la formación de surcos que se producen por micro corte acompañado por una deformación plástica, que resulta del deslizamiento de un elemento abrasivo duro sobre una superficie menos dura. La deformación plástica se refleja en la formación de una cresta al mismo tiempo que el fragmento corta la superficie. Las partículas abrasivas pueden provenir de material desprendido, polvo de los alrededores o de partículas de impurezas que quedan atrapadas en la interfase de deslizamiento. En algunos casos este tipo de desgaste se utiliza para evaluar agentes abrasivos en forma sistematizada siguiendo un proceso estandarizado por ASTM G56-82.

El desgaste abrasivo sigue también una relación similar a las anteriores, solo que la constante se considera como un coeficiente de desgaste y toma valores de acuerdo a la geometría de la partícula que incide sobre la superficie.

$$V/S = \beta * P/H \quad (26)$$

Donde β es el término que contiene las consideraciones geométricas del modelo.

Para calcular la resistencia al desgaste abrasivo de un material sometido a estudio se puede usar la relación siguiente:

$$R_1/R_2 = A * H/P \quad (27)$$

Donde R_1 es la resistencia al desgaste de un material de referencia, R_2 la resistencia del material bajo estudio, A una constante, P la presión aparente de contacto y H la dureza del material bajo estudio (Sarkar, 1977).

Fatiga

Los fenómenos de fatiga son generalmente importantes en todos los tipos de desgaste. Las grietas son el resultado de la acumulación de defectos sub-superficiales debido a fluctuaciones cíclicas de carga. Es común observar que el material removido sea predominantemente producido por fracturas de tipo fatiga que se producen por el crecimiento de las micro grietas. Puede ocurrir desgaste por fatiga cuando hay desgaste abrasivo e impacto.

La propagación de grietas por fatiga está concentrada en dos direcciones, una perpendicular y la otra paralela a la superficie de contacto. Al avanzar estas grietas partes del material de la superficie es removido en forma de hojuelas relativamente grandes. La exfoliación por fatiga es un ejemplo de esto. Este proceso es similar cuando las capas de material intercambiado se remueven por rompimiento durante el desgaste adhesivo. Este proceso es llamado "delaminación".

Erosión

La erosión ocurre cuando una superficie es golpeada por una corriente de partículas. Si las partículas son gotas líquidas el desgaste es llamado erosión por cavitación y cuando son partículas sólidas se denomina erosión. Los sistemas tribológicos erosivos son también llamados sistemas de desgaste de tres cuerpos. Las contrapartes son el primer y segundo cuerpos, las partículas en contacto momentáneo con la superficie constituyen el tercer cuerpo. Este último es el medio por el cual la carga se transfiere entre las contrapartes.

Vibración

Los sistemas tribológicos de este tipo se caracterizan por estar sometidos a oscilaciones de frecuencia alta y amplitudes pequeñas. Dependiendo del material y las condiciones de la superficie, la adhesión puede actuar como un mecanismo de activación para la abrasión, siendo la fatiga es un componente inherente.

Dependiendo del diseño del sistema, éste puede desprender partículas que no pueden escapar del área de contacto y tomen una función abrasiva. Al mismo tiempo la dificultad de mantener una lubricación continua puede provocar adhesión. Para materiales metálicos los efectos adicionales de la corrosión son muy severos, incrementándose el factor de desgaste. Una mezcla de partículas metálicas y partículas provenientes del rompimiento de la capa de corrosión es un medio abrasivo efectivo el cual previene la adhesión y reemplaza al lubricante (Gwindog y col, 1994).

Métodos de Prueba

Existen diferentes pruebas para el estudio del desgaste. Investigaciones de laboratorio son realizadas para la obtención de datos de desgaste y coeficiente

de fricción. Para ambos el control y la medición de todas las variables, cuya influencia es de suma importancia, se precisa para lograr cierto régimen de desgaste. Evidentemente un cambio de dichas condiciones puede cambiar radicalmente el régimen de desgaste y los mecanismos asociados.

En la Figura 9 se muestran los dos tipos de contacto: simétrico y asimétrico. En el primero el área de contacto entre las superficies no cambia, mientras que en el segundo el área de contacto cambiará según progrese el ensayo, además de que puede inducirse un cambio en el régimen de desgaste.

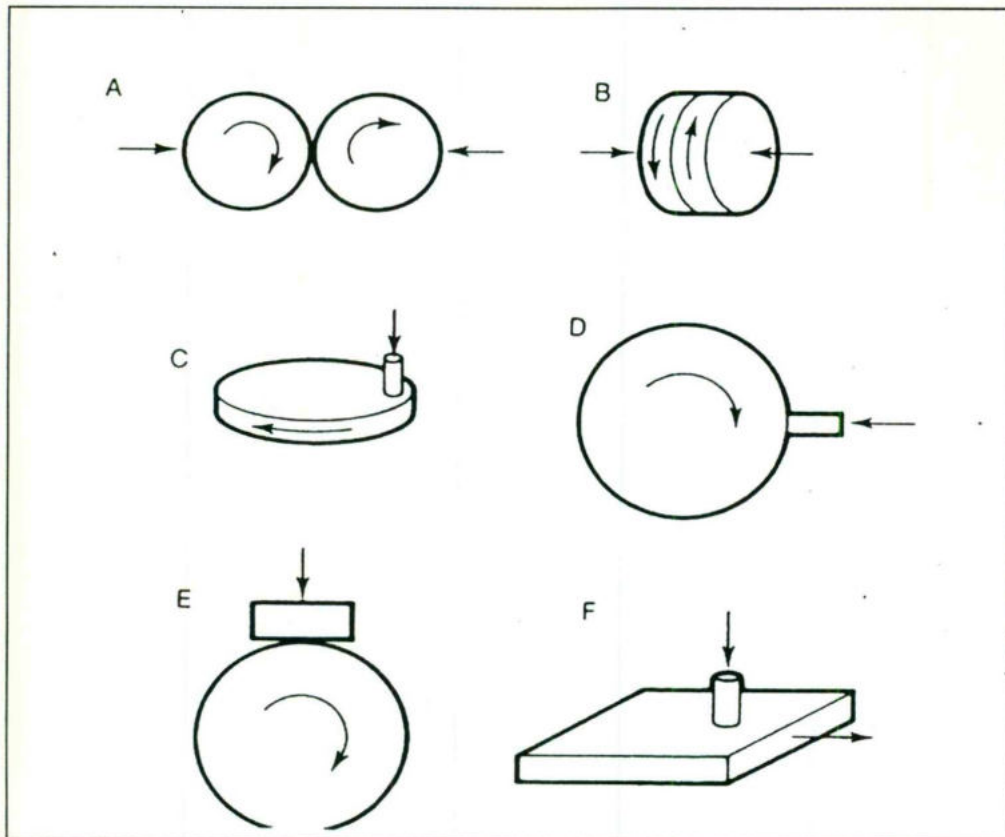


Figura 9. Arreglo geométrico de varios aparatos para la prueba de desgaste.

Los arreglos simétricos son usados con poca frecuencia para el estudio del desgaste, sin embargo, si se realiza experimentación en un dispositivo de dos discos, a lo largo su borde que equivale a un contacto sobre una línea (Figura 9.A.) o cara sobre cara (Figura 9.B.). El equipo de prueba más comúnmente empleado es el de presión en un punto sobre un disco, en la cara (Figura 9.C.), en el borde (Figura 9.D.), bloque sobre un anillo (Figura 9.E.) o punto en un plano (Figura 9.F.). En estos casos el contacto puede realizarse sobre la misma área o línea. Detalles de este tipo de contacto son mostrados en la Figura 10.

Un par de componentes simétricamente acoplados en un punto pueden ser analizados como una muestra, la variable a medir es la velocidad de desgaste del borde o cara del disco. Los arreglos de la Figura 10 (a) se denominan contactos conformes porque el área de contacto no cambia conforme la prueba progresa, mientras que los del inciso (b) son no-conformes debido a que área cambia con el tiempo. Algunas veces un contacto no-conforme puede terminar siendo conforme.

Otra prueba muy utilizada es la de los cuatro balines, ilustrada en la Figura 11. Los balines inferiores giran juntos, el balín superior está fijo y presiona hacia abajo. Estos balines son usualmente fabricados de acero alto cromo alto carbono, y el objetivo de la prueba es evaluar el desempeño de un lubricante más que para estudiar el comportamiento del material.

Existen varios métodos de desgaste que están sujetos a estándares internacionales, por ejemplo, bloque sobre anillo en ASTM G77, cilindros transversales en ASTM G83, punta sobre disco en ASTM G99, esferas sobre disco en DIN50324 y punta sobre plano rotatorio en ASTM G98.

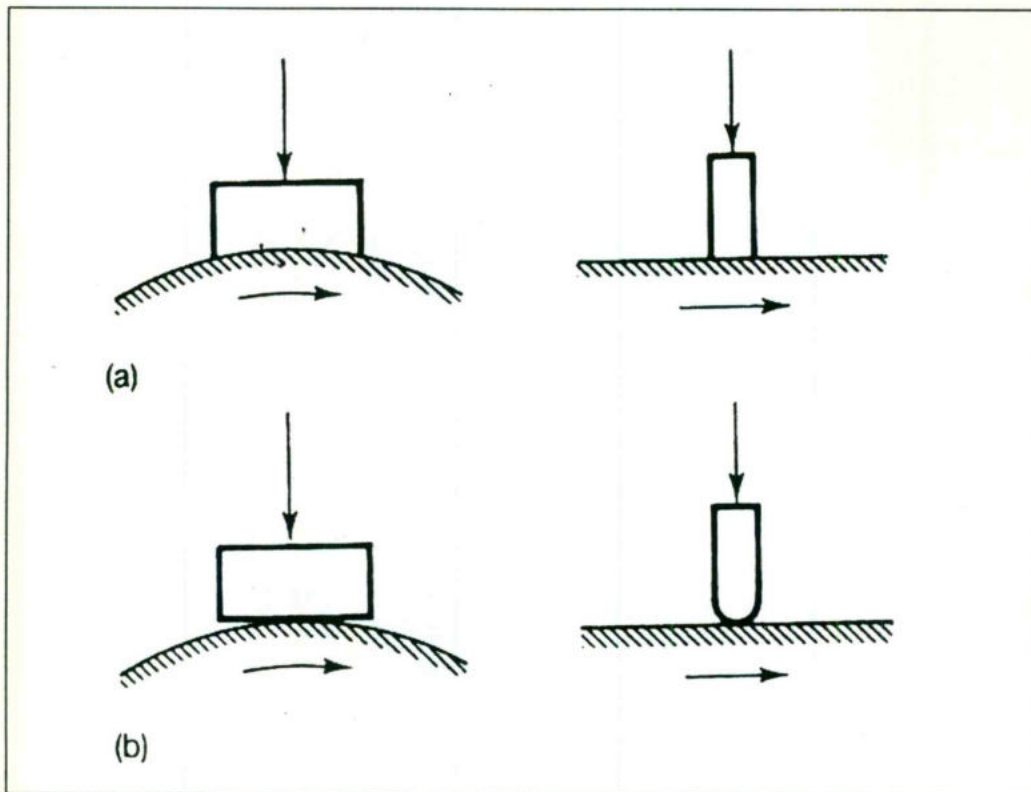


Figura 10. (a) Contacto conforme, y (b) Contacto no-conforme.

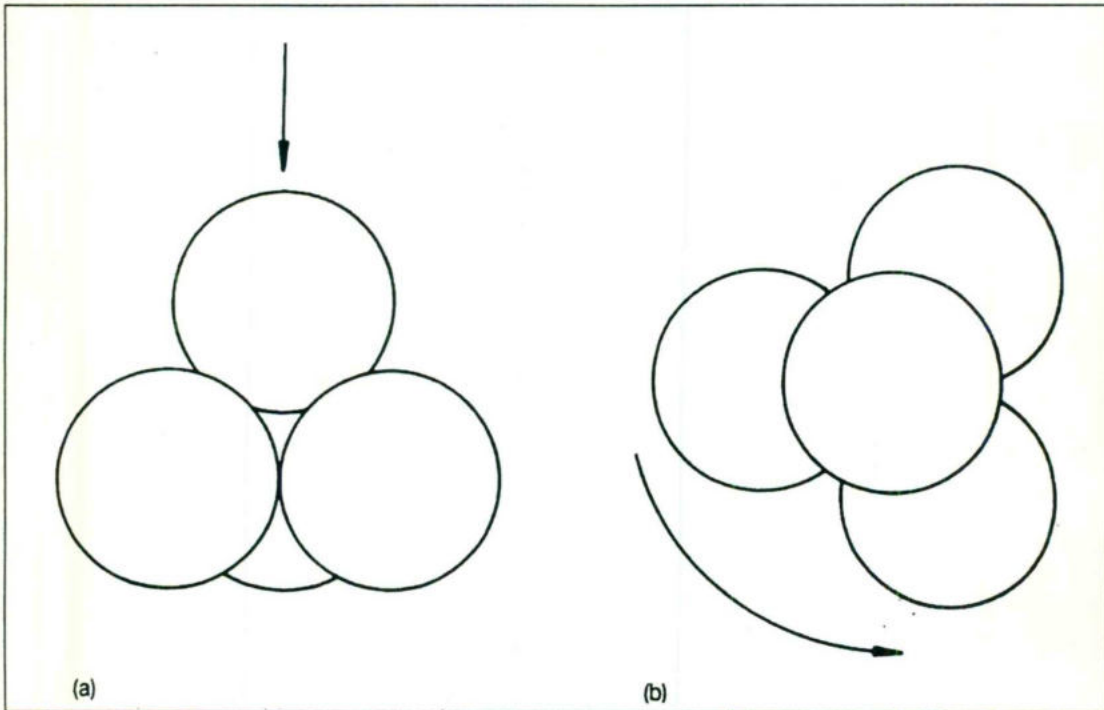


Figura 11. Prueba de desgaste usando cuatro balines.

El desgaste usualmente se mide por la cantidad de material removido, expresado como pérdida en peso o en volumen, o como una medida continua de la posición del aditamento de sujeción de la muestra, que lo traduce en una magnitud de desgaste. En el caso de contacto sobre el borde de disco o anillo, el desgaste produce un área de contacto en forma de raya, por lo que medir el tamaño de la marca en la muestra puede dar una lectura confiable del desgaste.

En alguna interrupción de la prueba, para medir o pesar la muestra, ésta se tiene que reemplazar en exactamente la misma posición. Por otra parte, la fricción no es solo una propiedad numérica evaluada por μ , sino que también permite estimar un cambio en las características del deslizamiento y por lo tanto en el régimen de desgaste. El régimen de desgaste se asocia con los cambios topográficos en la superficie y al mecanismo de desgaste prevaleciente.

Para un mayor control de la prueba es necesario controlar la temperatura, lubricación carga normal, velocidad de deslizamiento, tiempo de prueba y otros factores. La temperatura de la prueba es importante ya que ésta tiene influencia sobre las propiedades mecánicas de los materiales y en las reacciones químicas que puedan ocurrir. Un sistema de lubricación es igualmente necesario para evaluar la efectividad de una lubricación en capa límite o hidrodinámica. La orientación de la muestra puede igualmente afectar los resultados de una prueba. Un comportamiento diferente puede ser observado si el material removido por el desgaste cae dentro o fuera del área de contacto.

La extensa lista de influencias sugiere que no es posible producir una simulación válida para una aplicación práctica, a menos que siempre se esté consiente de las posibles consecuencias y desviaciones de las condiciones con las que se simula. Los resultados de pruebas de laboratorio pueden ser aplicados para la resolución práctica de un problema real (Hutchings, 1992).

Curva de Desgaste

Si el volumen o el peso perdido es graficado continuamente contra la distancia, se obtiene una curva característica como la mostrada en la Figura 12. La pérdida en peso inicial es curva decreciendo hasta el punto A, a partir del cual sigue una línea recta AB. El aumento del volumen o peso perdido en el desgaste inicial está dado por OA, mientras que AB corresponde al estado estable. En esta región se determina el coeficiente de desgaste de un material.

Cuando dos materiales entran en contacto bajo la acción de una carga, ésta se concentra en las áreas de contacto verdadero, que son las asperezas. Algunas veces esta concentración rebasa el límite de cedencia del material más suave, produciendo flujo plástico y crecimiento del área de contacto a un tamaño proporcional a la carga aplicada. Si ambos materiales son duros (frágiles), las asperezas pueden ser removidas por agrietamiento y fractura, adquiriendo la superficie una apariencia llana donde el área de contacto verdadera se ha incrementado. Esta puede ser la razón más común por la cual el desgaste inicial ocurre y es superado al lograrse un área de equilibrio. Pero esto no explica todos los casos, ya que algunas veces hay evidencia de formación de óxidos o un incremento en la dureza de la superficie de las contrapartes, por lo que el mecanismo de desgaste estará gobernado por un gran número de factores interrelacionados.

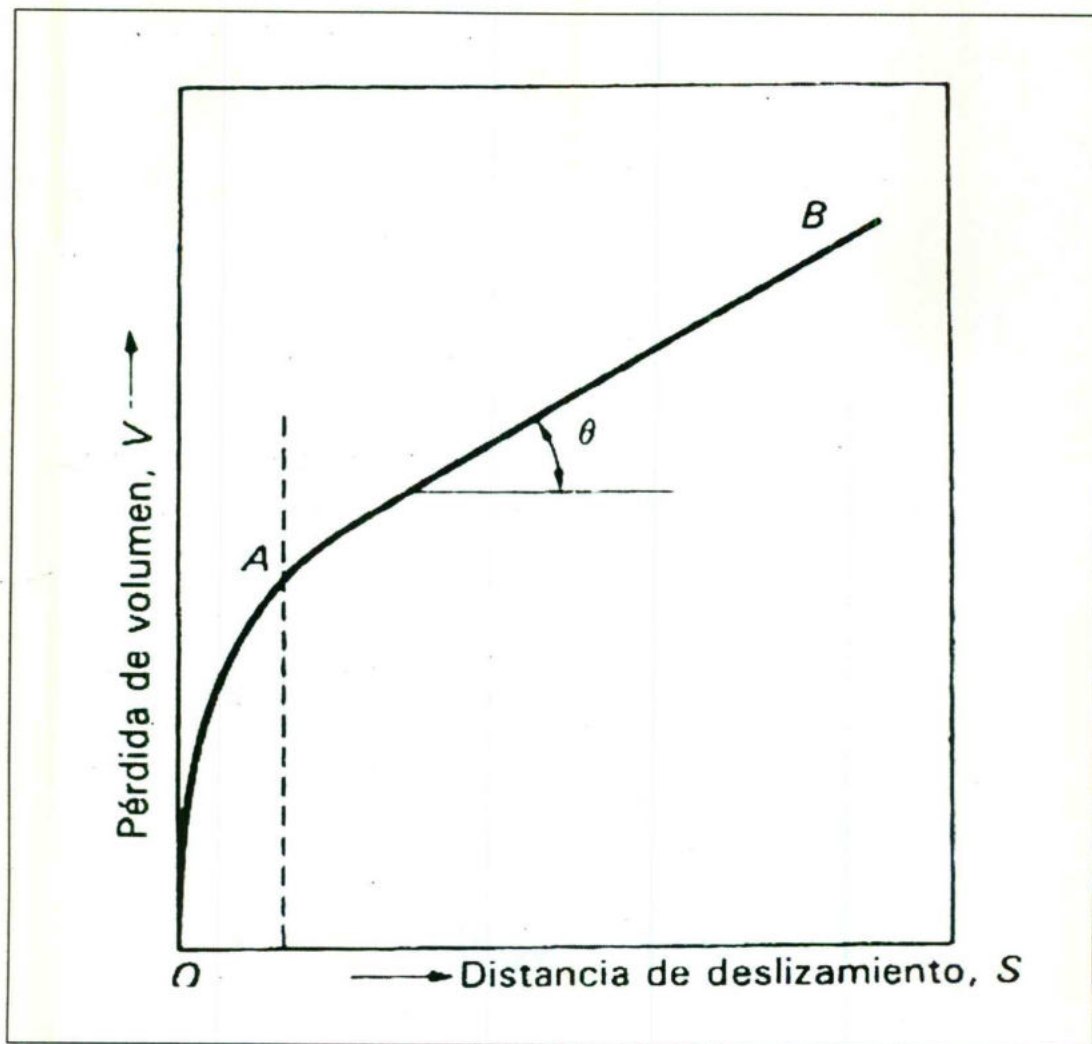


Figura 12. Curva típica de desgaste.

Coefficiente de Desgaste

Cuando un nuevo material de fricción es investigado, la primera fase del trabajo es usualmente la evaluación de la cantidad de desgaste en función de la carga aplicada. Para cargas bajas, al inicio prevalece un régimen de desgaste severo, el cual cambia a un régimen de desgaste medio o bajo, Figura 13. Si posteriormente la carga se incrementa el coeficiente de desgaste se incrementa, volviendo a decrecer a un valor más bajo cuando el tiempo aumenta (Sarkar, 1977).

En la bibliografía revisada se ha encontrado que el desgaste puede expresarse de diferentes formas, como coeficientes adimensionales, valores netos del volumen o peso perdido en función de la distancia recorrida, o el tiempo, y coeficientes que dependen del volumen o peso perdido, la carga aplicada y distancia recorrida. Todos ellos determinados para dar una interpretación adecuada a la investigación.

En una investigación realizada por Gwindon, W. 1994 el desgaste se mide en función del promedio de las diferencias de los flancos de desgaste o tamaño promedio del cráter formado en la muestra, antes y después de la prueba, dividiendo entre la distancia recorrida.

Otro coeficiente de uso común es el reportado por Hutchings, I. 1992. Dicho coeficiente de desgaste es una relación entre de distancia recorrida, la dureza Brinell y la carga aplicada.

Por otra parte la norma ASTM G77-98 relaciona el coeficiente de desgaste con el esfuerzo de compresión, la carga aplicada, la relación de Poisson y el modulo de Young, de los materiales sometidos a desgaste.

Las relaciones de Archard también pueden expresarse como un función de la carga aplicada, la dureza Brinell y la densidad. De ellas la de mayor utilización es la que relaciona el volumen perdido y la distancia recorrida, a la cual también puede agregarse la carga aplicada.

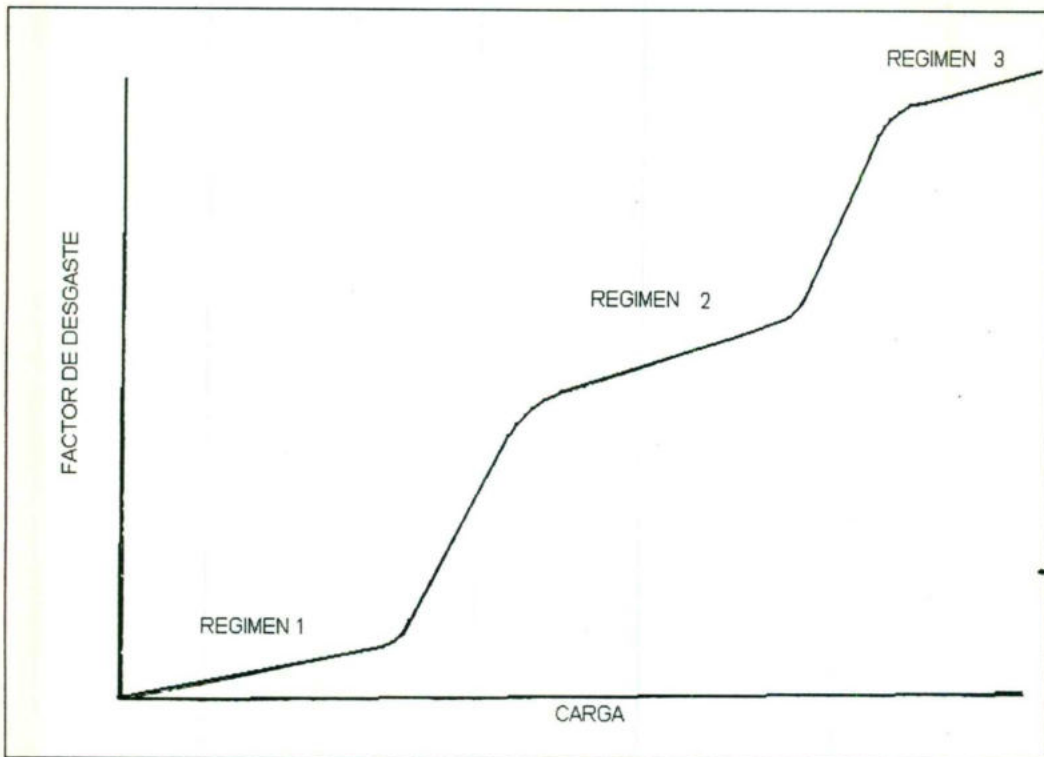


Figura 13. Curva de desgaste para diferentes regímenes.

2. 6. Fricción

Siempre que un cuerpo se desliza sobre otro, las fuerzas de fricción opuestas al movimiento, se desarrollan entre ellos. Tales fuerzas se deben, en gran parte, a las fuerzas de atracción atómicas y moleculares en las pequeñas áreas de contacto. Dentro de ciertos límites, la lisura de las superficies no afecta grandemente a la fuerza de fricción deslizante f . Si las superficies son lisas habrá muchas áreas pequeñas de contacto, mientras que si son ásperas, habrá muy pocas, pero más grandes.

Definición

La fricción estática o fricción de arranque, es mayor que la fricción cinética. Sin embargo, una vez que el cuerpo se mueve, la fuerza de fricción por deslizamiento solo crece ligeramente al aumentar la rapidez y permanece casi constante en un intervalo limitado de velocidades.

Medida de fricción

Siempre que hay movimiento hay fricción y todas las formas de fricción se pueden clasificar dentro de una de estas tres clases:

Fricción por deslizamiento

Fricción por rotación

Fricción en fluidos

De las cuales esta última no revisaremos por ser exclusiva para líquidos.

La fricción por deslizamiento y la fricción por rotación están limitadas corrientemente a los sólidos, mientras que la fricción en fluidos se aplica a los líquidos y gases. En general, la fricción por deslizamiento es mayor que la fricción en fluidos a bajas velocidades, mientras que a grandes velocidades, es lo contrario.

La fuerza de fricción por deslizamiento f es directamente proporcional a la fuerza total hacia abajo o fuerza normal N .

$$f \propto N \quad (28)$$

Introduciendo la letra griega μ como una constante de proporcionalidad, la ecuación se convierte en:

$$f = \mu N \quad (29)$$

Donde μ es llamado coeficiente de fricción, y está definido como el cociente entre la fuerza de fricción y la fuerza normal.

$$\mu = \frac{f}{N} \quad (30)$$

Fricción por rotación

Cuanto más dura sea una rueda o una bola, y cuanto más dura sea una superficie sobre la que ruedan, menor es la fuerza de fricción por rotación. Una mejor comprensión del origen de esta fricción se obtiene al comparar las diferentes clases de ruedas que se muestran en la Figura 14.

Las mismas ecuaciones que sirven para la fricción por deslizamiento, son válidas para la fricción por rotación, la única diferencia es que los coeficientes de fricción por rotación son sumamente pequeños (Harvey, 1965).

$$f = \mu N \quad (31)$$

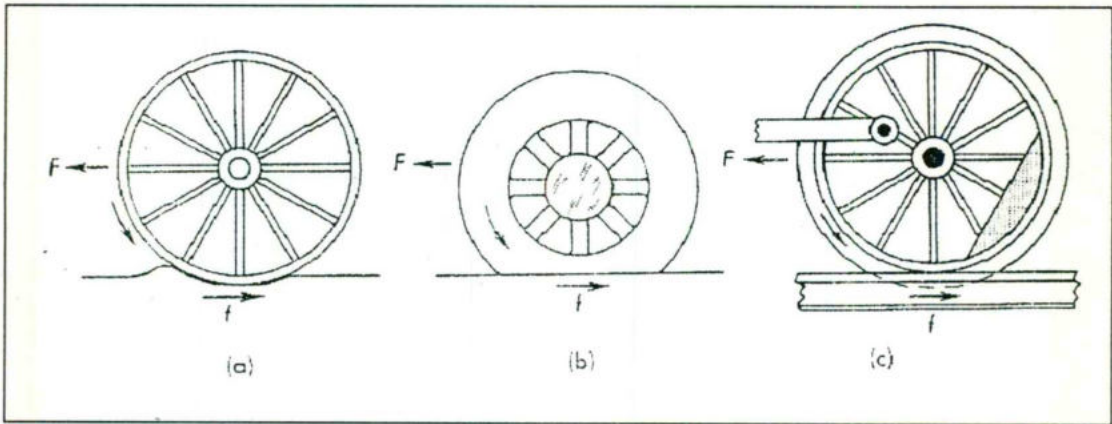


Figura 14. Tipos de ruedas

Revisión Bibliográfica

2. 1. Antecedentes

Historia del uso de los materiales compuestos

La competencia entre los materiales es evidente en la composición de un automóvil americano. En 1978 éste pesaba alrededor 1800 Kg, y estaba compuesto de aproximadamente 60% de hierro y acero, de 10 a 20% de polímeros y de 3 a 5% de aluminio. En comparación con 1985 pesaba 1400 Kg, y constaba de 50 a 60% de hierro y acero, 10 a 20% de polímeros y un 5 a 10% de aluminio. Así, en el periodo de 1978 a 1985 el porcentaje de acero descendió, el de aluminio se incremento y el de los polímeros permaneció constante. Este tipo de automóvil en 1992 muestra una disminución sustancial en el uso de hierro y acero, y un aumento en el uso de otros materiales.

En la década pasada, ha hecho su aparición una nueva familia de cerámicos de ingeniería a base de nitruros, carburos y óxidos. Se están encontrando constantemente nuevas aplicaciones para estos materiales, particularmente para usos a alta temperatura y electrónica.

Este tipo de materiales estan siendo intensamente investigados en los últimos años, lo que ha hecho posible la producción de una multitud de materiales con relaciones altamente favorables de peso-resistencia, lo que incrementa la eficiencia de máquinas y equipos, como se muestra en la Figura 1. La mayoría de estos materiales han sido desarrollados para la industria aerospacial, pero algunos han tenido otras aplicaciones, como en los motores de automóviles.

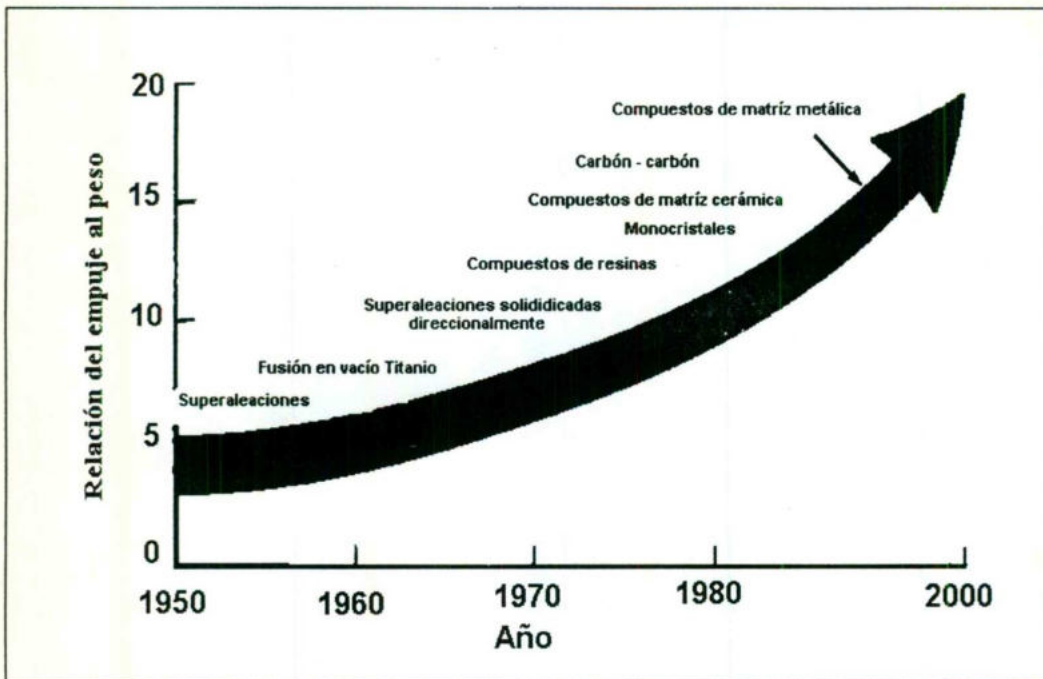


Figura 1. Los materiales y los procesos de fabricación en los pasados años han estado asociados al aumento en la eficiencia de los equipos.

Los materiales compuestos, como las combinaciones de resinas epóxicas con fibra de vidrio o grafito, se están haciendo cada vez más importantes en aplicaciones estructurales críticas. Se ha pronosticado una ganancia anual media del 5% en el uso de estos materiales. Por ejemplo, el C-17 para la década de los 90 estaba construido con 7.5 toneladas de materiales compuestos. Este aparato tiene una envergadura de 50 metros y utiliza 7.5 toneladas de materiales compuestos avanzados, Figura 2. Asimismo, se espera que los aviones comerciales se construyan con materiales compuestos cada vez más avanzados en el futuro (Smith, 1993).

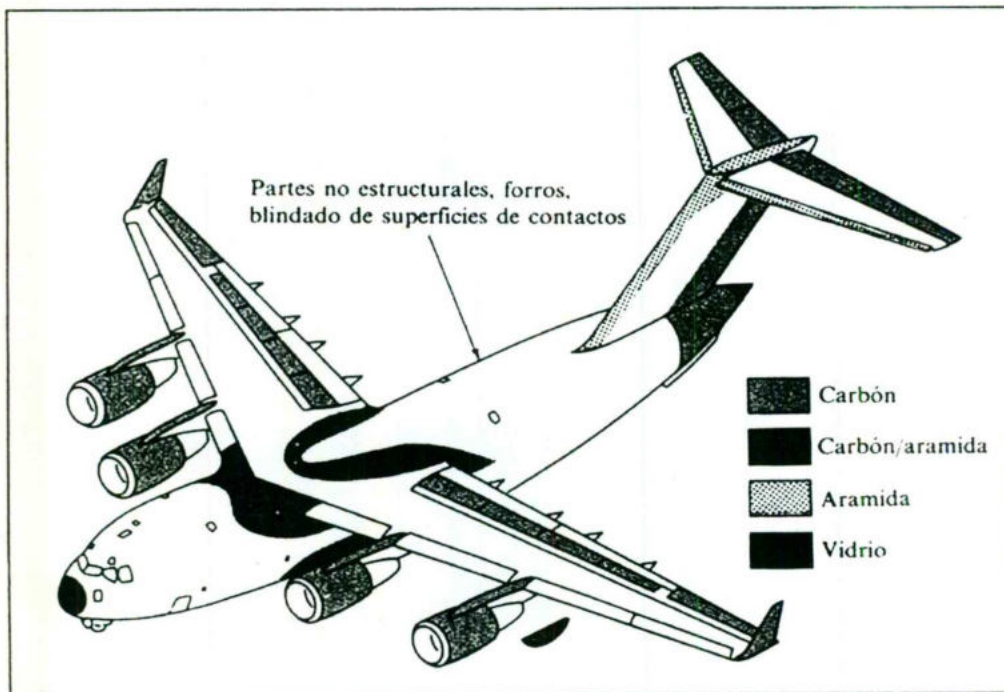


Figura 2. Visión de conjunto de una amplia variedad de piezas de materiales compuestos utilizados en un avión de transporte C - 17.

Situación actual

La incorporación de nuevas tecnologías en México depende mucho del grado de desarrollo de las distintas especialidades de la ingeniería, pero también de factores económicos y de mercado. Aunque no se ha hecho, hasta donde se sabe, una investigación exhaustiva de la utilización de nuevas tecnologías en las distintas ramas industriales, sí se conoce la situación general algunas de ellas (González, 2001).

La producción de nuevos materiales y su procesamiento hasta convertirlos en productos acabados, constituyen una parte importante de nuestra economía actual. Investigadores e ingenieros trabajan en el desarrollo de nuevos materiales o en modificar las propiedades de los ya existentes.

La investigación en 1989 estaba retrasada en lo que se refiere al desarrollo de compuestos de matriz metálica y otros tipos de compuestos inter metálicos refractarios, que ahora son objeto de investigación para ser usados en vehículos de vuelo hipersónico (Smith, 1993).

El CONICYT (Comisión Nacional de Investigación Tecnológica de Chile) realizó el primer "Pan American Advanced Studies Institute" (PA ASI), Este encuentro fue patrocinado conjuntamente con: Office of Energy Research, National Science Foundation y University of Tennessee, Estados Unidos; Universidad de Yucatán y Academia Mexicana de Materiales, México; y Brasil. El tema elegido para el primer PA ASI fue "Synthesis and Processing of Advanced Materials", abordando áreas tales como: Materiales Estructurales, Materiales Nanoestructurados, Biomateriales, Compósitos, y Superconductores de alta temperatura, entre otros, teniendo como objetivo difundir los últimos conocimientos en el área, desarrollar proyectos de investigación internacionales, y establecer vínculos dentro de la Comunidad Científica Panamericana.

La aplicación de las ciencias básicas dá como resultado el desarrollo de nuevas tecnologías, las ciencias básicas marcan un pauta en la aplicación de cada una de las áreas del conocimiento, como se muestra en la Figura 3.

Esto es sólo un ejemplo de la búsqueda de materiales nuevos y optimizados e utilidad práctica. En muchos casos lo que hoy es imposible mañana será realidad (McHague, 2000).

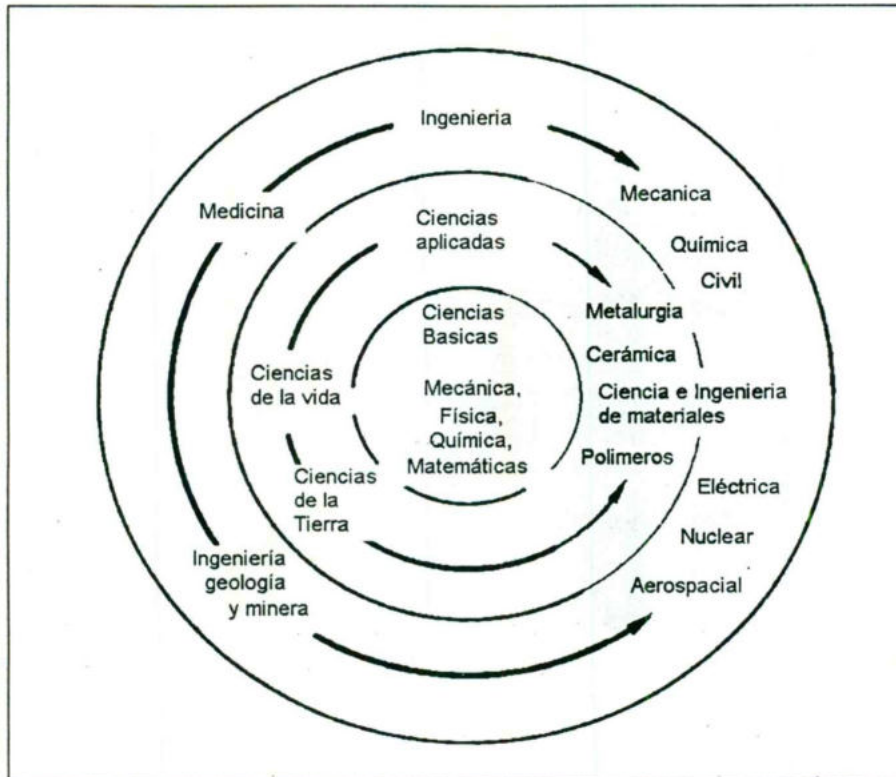


Figura 3. Diagrama que muestra como la metalurgia, la ciencia e ingeniería de los materiales forman un puente que una las ciencias básicas con las disciplinas de la ingeniería, teniendo como fin básico el conocimiento de los materiales.

Origen de la viabilidad

Los materiales compiten unos con otros por su existencia en los nuevos mercados. De un periodo de tiempo a otro, aparecen muchos factores que hacen posible la sustitución de un material por otro, evidentemente el costo es uno de los factores más importantes.

Si se hace una innovación importante en el procesamiento de un cierto tipo de material, de manera que su costo se abarate sustancialmente, éste puede reemplazar a otro. Un ejemplo de la sustitución de un material por otro se muestra en la Figura 4. Estos son unos ejemplos de la nueva generación de materiales compósitos cerámicos recientemente desarrollados para su aplicación en motores de última generación. Otro factor que da lugar al reemplazamiento de los materiales, es el desarrollo de un nuevo material con propiedades especiales. Como resultado, a la vuelta de un cierto tiempo, encontramos que los materiales han cambiado.

Aunque los materiales cerámicos han sido de costo bajo, anteriormente su procesamiento era lento y laborioso, además, de que la mayoría de éstos se dañaban fácilmente por impacto a causa de su baja o nula ductilidad. Actualmente existen técnicas para producir compuestos cerámicos de alta resistencia al impacto, por lo que estos materiales muestran un resurgimiento para aplicaciones en ingeniería, especialmente donde existen altas temperaturas o condiciones extremas (Smith, 1993).

El desarrollo de nuevos materiales continuara en el futuro, ya que se desarrollan otros materiales y nuevos procesos.

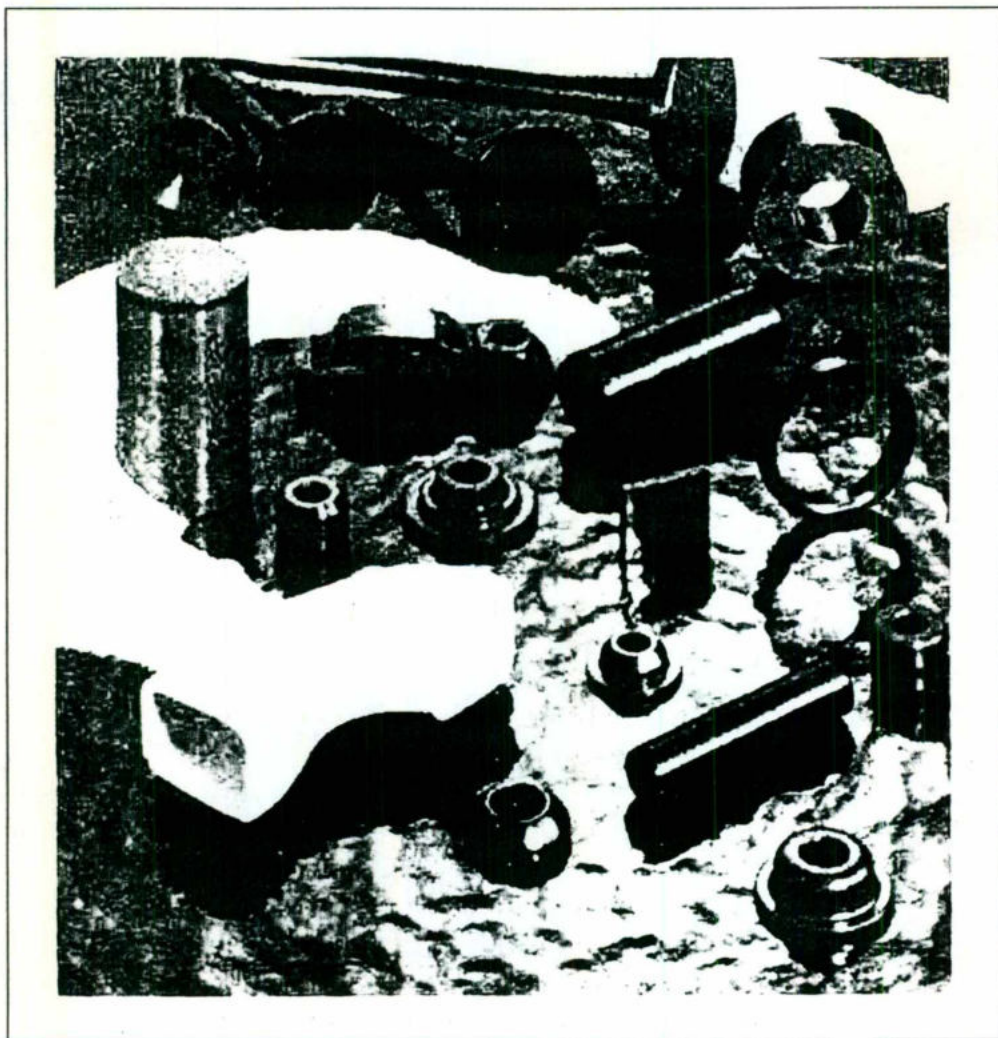


Figura 4. Las piezas en negro son válvulas, asientos de válvula y pernos de pistón hechos de nitruro de silicio. La pieza en blanco es una abertura para el colector hecha de un material compuesto por alúmina.

2. 2. Materiales compósitos

Definición de Compósito

Un compósito es un grupo de materiales constituidos por una mezcla o combinación de dos o más micro/macro constituyentes que difieren en forma y composición química, además de ser esencialmente insolubles uno en el otro.

Clasificación de los Compósitos

Los compósitos pueden clasificarse en tres tipos: compósitos de matriz metálica (CMM), de matriz cerámica (CMC), (Smith, 1993) y de matriz polimérica (CMP) (Jennings, 2002). Unos de los principales compósitos son los reforzados con fibras continuas, reforzados con fibras discontinuas o con partículas, regulares o irregulares.

CMM reforzados con fibras continuas: en este tipo de compósitos los filamentos continuos, que están embebidos en la matriz, proporcionan una rigidez (módulo de elasticidad) y alta resistencia.

CMC reforzados con fibras continuas de SiC: las fibras de SiC son encapsuladas en un material vitro-cerámico. Estos materiales encuentran utilidad en tubos para intercambiadores de calor, sistemas de protección térmica y materiales para ambientes de corrosión-erosión.

CMM reforzados con partículas o fibras discontinuas: éstos tienen una resistencia, rigidez y estabilidad dimensional mayor que las aleaciones metálicas no reforzadas. Los CMM reforzados con partículas se preparan principalmente por pulvimetalurgia y procesos de infiltración.

CMC reforzados con fibras discontinuas: las fibrillas de cerámica pueden incrementar significativamente la tenacidad de los cerámicos monolíticos. La adición de un 20% en volumen de fibrillas de SiC puede incrementar la tenacidad de la alúmina de 4.5 a 8.5 MPa m^{1/2} (Smith, 1993).

CMP reforzados: éstos se conocen ampliamente como plásticos reforzados. Específicamente, estos compósitos son fibras que refuerzan una matriz

polimérica. Lo más comúnmente es que el refuerzo sea fibra de vidrio. Las fibras que más refuerzan son aquellas como las de armida y carbón. La matriz polimérica puede ser una resina termofija, como el poliéster, y éster del vinilo, o resinas epóxicas. Las resinas como las fenólicas, el poliuretano y el silicón, son de uso general (Jennings, 2002).

Bibliografía relevante

Dentro del tema de materiales compósitos existen numerosos artículos que se encargan de divulgar las cualidades de éstos. Sin embargo en este apartado sólo se detallarán aquellos que han dado pauta para el desarrollo de este trabajo en cuanto a sus ventajas y con ello su posible aplicación industrial.

Durante 1976, el equipo de Brahma dentro de la "Formula Uno" utilizo frenos con disco de carbono en su modelo BT45, las ventajas de éste radicaban en el ahorro de más de 25 kilos y en el hecho de que no sufren perdidas de eficiencia trabajando a elevadas temperaturas a las que son sometidos. Después de tan sólo 2 grandes premios recurrieron a los discos tradicionales de hierro, debido a que el exceso de temperatura hacia hervir el líquido de frenos. El equipo Brahma continuo desarrollando este tipo de frenos durante los siguientes 6 años, tratando de encontrar soluciones al problema de altas temperaturas generadas. Concluyendo que esto se producía debido al elevado grado de fricción del carbono, pero el coeficiente de fricción a la vez era responsable de que las distancias de frenado se redujeran notablemente. Por eso el resto de los equipos de la categoría comenzó a seguir el paso de Brahma en cuanto a la utilización de carbono en los frenos, luego que en la temporada de 1982 dicha escudería equipó un modelo BT49/D con discos de carbono, habiendo ya superado los problemas de origen térmico.

Por tanto los discos de carbono continuaron usándose unos cuantos años más en la Formula Uno, hasta la aparición de un nuevo material de características superiores (Wells, 2002).

Mientras tanto en el instituto de manufactura tecnológica de componentes cerámicos y compósitos de la universidad de Stuttgart. Trabajaban en la

producción de un material cerámico carbono-silicio. Basados en que un compuesto cerámico, con fibras de carbón y metal adicional, desarrollan una combinación de alta resistencia, bajo peso, estabilidad a altas temperaturas, resistencia a la corrosión y sobre todo un coeficiente de fricción estable.

En el uso de silicio enriquecido con aleaciones de FeSi_{85} o FeSi_{90} , se observaron que las propiedades estructurales son mucho mejores y que las fibras de carbón se preservan por más tiempo. La aplicación de estas aleaciones reduce el volumen de las fases de hierro, estableciendo la preservación de las fibras de carbono y de la estructura de la matriz.

Los resultados mostrados por pruebas tribológicas muestran que la distancia de prueba determina un comportamiento estable asintótico, cuando el coeficiente de fricción (μ) se eleva por un mayor contacto, donde la matriz es rígida y la fricción es controlada por el carbón. Esta observación se confirmó en los resultados de FeSi_{75} aleada con Si-SiC, del cual el compuesto aumenta su coeficiente de fricción.

Por lo tanto los discos de freno pueden ser aplicados en autos convencionales tomando ciertas consideraciones. El uso de compuestos inter metálicos hierro-silicio no es sólo para reducir el costo de los materiales, sino que además reduce la reactividad química de los metales, finalmente un componente con matriz inter metálica mejora el comportamiento de la fricción (William, 1992).

Actualmente Porsche AG ha iniciado la instalación del sistema de frenos cerámicos Porsche Ceramic Composite Brake (PCCB), el cual consta de un disco cerámico de SiC, dotado de unos conductos de ventilación y se empezará a ofrecer en el modelo turbo como elemento opcional a partir del diciembre del 2002. Aun cuando los frenos convencionales de disco utilizados por Porsche son de fundición gris, este material proporciona incomparables valores de desaceleración y ha quedado probado en innumerables pruebas, la utilización de un nuevo material compuesto que ofrece una capacidad y eficacia mayores, y marca un nuevo punto de referencia en el campo de la tecnología de frenos.

El sistema PCCB proporciona el coeficiente de fricción más alto en el mercado (0.5), lo que representa un incremento en la fase inicial de frenada de un 25% con relación a los discos convencionales de fundición. Los discos de freno cerámicos llegan a alcanzar temperaturas de hasta 800 °C, muy por encima de la temperatura de los discos convencionales. Estos últimos se dilatan a alta temperatura y su superficie se ondula. Estas deformaciones impiden que las pastillas de freno se "apoyen" sobre los discos, y en consecuencia producen molestas vibraciones en el volante de dirección al frenar. Efecto que en el sistema PCCB no sucede, además de asegurar una resistencia a la abrasión notablemente superior y una vida útil de aproximadamente 300 000 kilómetros (Manual Técnico, 2002).

2. 3. Técnicas de obtención de compósitos de SiC

El procesamiento de compósitos puede llevarse a cabo por varios métodos, desde los más sencillos hasta los más sofisticados, pasando desde la dispersión del material de refuerzo por agitación mecánica en metal fundido (Hallen y *col*, 1997), hasta procesos que involucran activación de campo.

El carburo de silicio (SiC) está entre los materiales de refuerzo más frecuentemente utilizados en la fabricación de compósitos de matriz metálica o cerámica, sus propiedades más atractivas son su alta resistencia al desgaste y una resistencia a la corrosión buena. Además, puede desarrollar interfases fuertes con algunas aleaciones metálicas, como las base aluminio, magnesio, níquel y hierro. El carburo de silicio de mayor pureza se utiliza en componentes electrónicos y el restante en herramientas abrasivas (Richerson, 1992).

Infiltración

Es la infiltración de una preforma cerámica con el metal o aleación fundida, que embargo, el proceso para elaborar la preforma representa un reto en sí. La infiltración puede limitarse debido a la presencia de porosidad cerrada. La carburización directa por infiltración de una preforma de carbón con silicio fundido, resulta en un compósito de Si-SiC que posee una excelente resistencia a la flexión (Shin y *col*, 1999).

Respecto al control dimensional, se ha encontrado que el desarrollo in situ de compósitos, ofrece una ventaja enorme en la obtención de partes con sus dimensiones finales o que pueden maquinarse en una condición de presinterización (Citak y *col*, 1999).

Proceso Acheson

El SiC se produce industrialmente mediante el proceso Acheson, en el cual se obtienen simultáneamente SiC de bajo grado, para abrasivos y grado alto, para aplicaciones eléctricas.

Este proceso consiste en calentar, por resistencia eléctrica, un montículo de una mezcla de arena sílica y coque hasta 2200°C. A ésta temperatura el coque reacciona con la sílice para producir SiC más CO. Al final del proceso se rompe el

montículo y separan los fragmentos. Al interior se observa un ciclo de cristales hexagonales verdes de SiC con un bajo contenido de impurezas; Alrededor del núcleo el nivel de impurezas es mayor. La capa exterior contiene material sin reaccionar que es agregado en un siguiente lote a procesar (Juárez, 2002).

Prensado en caliente (HP)

El prensado en caliente es el proceso ideal para la fabricación de estructuras laminadas intrincadas (Refrac, 2002). Esta técnica consiste en el calentamiento por inducción de formas de aproximadamente 125 milímetros de diámetro por 100 milímetros de largo, esto se puede realizar en dados de grafito, a una temperatura máxima de 1900°C y una carga máxima de 20 toneladas en una atmósfera de nitrógeno o argón. Los polvos se pueden consolidar axialmente antes de ser prensados en caliente, en la matriz se aplica una capa de polvo de nitruro de boro para prevenir la reacción entre el dado de grafito y el polvo de SiC (Dan, 2001).

Para el Si_3N_4 en un experimento realizado por Ordoñez, se mezclaron los polvos en seco, fueron compactados de forma axial y densificados a 1750°C a una presión de 100 MPa en atmósfera de argón, manteniendo estas condiciones por un tiempo de 15 minutos para posteriormente esperar el enfriamiento (Ordoñez y col, 2000).

El prensado en caliente (HP) y prensado isostático en caliente (HIP) son dos de las mejores técnicas disponibles en la actualidad para la densificación de polvos cerámicos, metálicos y/o combinación de éstos, logrando piezas volumétricas "relativamente" densas con granos desarrollados. Dichas técnicas sin embargo presentan limitantes importantes como elevados precios de equipo y operación, y velocidades de calentamiento / enfriamiento lentas, por lo que se requieren largos tiempos de densificado (aprox. 2 horas). Durante el calentamiento y en paralelo con la difusión del material, al cerrar los poros entre partículas, se genera la difusión de especies presentes con el respectivo crecimiento de grano (Rodríguez, 1999).

Síntesis auto propagada a alta temperatura (SHS)

También llamada síntesis por combustión. Esta técnica basada en la iniciación de una reacción auto sostenida por interacción sólido-sólido y sólido-gas. Estas interacciones son típicamente pequeñas, pero que producen una velocidad de desplazamiento elevada, y que está asociada a las altas temperaturas.

Por el proceso de SHS se sinterizan estructuras cúbicas metaestables, partiendo de una solución sólida tetragonal (Munir y *col*, 2000). La síntesis de compósitos por combustión se basa en la temperatura adiabática de reacción, así ésta se autopropaga a una velocidad relativamente alta a pesar de la compleja naturaleza que estas tengan. Sin embargo, puesto que existe una diferencia en la velocidad de enfriamiento dentro de la muestra no es posible controlar la morfología (Xia y *col*, 2000)

Sinterización plasma chispa (SPS)

También conocida como sinterización por pulsos eléctricos (PECS) fue desarrollada en Japón en 1990. En algunas investigaciones la llaman como sinterización activada por plasma (PAS), si bien el SPS involucra la activación de campo que ha mostrado ser útil en el desarrollo de materiales monolíticos, compósitos que es imposible obtener por otros métodos (Shon y *col*, 1998), es comúnmente usada para producir materiales de ingeniería densos como los cerámicos; aun así existen relativamente pocos reportes en la aplicación de éste proceso (Takeuchi y *col*, 2000). SPS permite una consolidación del polvo suelto o el producto de una reacción de síntesis, dentro de una matriz, para ser sinterizado bajo un calentamiento uniforme hasta obtener una densidad alta, a temperaturas relativamente bajas y cortos periodos de sinterización. Esta técnica se basa en la aplicación de pulsos eléctricos de alta corriente y bajo voltaje DC a un polvo confinado en una matriz que se encuentra en una cámara de vacío o con atmósfera inerte, como se muestra en la Figura 5. Los parámetros que influyen la síntesis y densificación incluyen al calentamiento por el efecto Joule, el plasma generado dentro de las cavidades existentes, el efecto de electro migración y la presión aplicada acelera el proceso. Típicamente en pocos minutos, comparados con la sinterización convencional y un calentamiento de 600 K por minuto, nos lleva a periodos de sinterización de hasta 15 minutos, que

suelen ser ventajosos dando una superioridad en el control del crecimiento de grano, lo que hace al SPS el proceso más adecuado para el procesamiento de materiales nanométricos (Rodríguez, 1999). Los resultados por Tomanari muestran que cortos periodos de sinterización son un factor esencial en la obtención de granos nanométricos, es efectivo también para estabilizar fases cúbicas a temperatura ambiente, esto significa que el proceso puede estabilizar fases de elevada temperatura (Tomanari y col, 1999). La mayoría de los otros procesos convencionales para el procesamiento de este tipo de materiales promueven el crecimiento de grano con el concomitante deterioro de sus propiedades (Rodríguez, 1999).

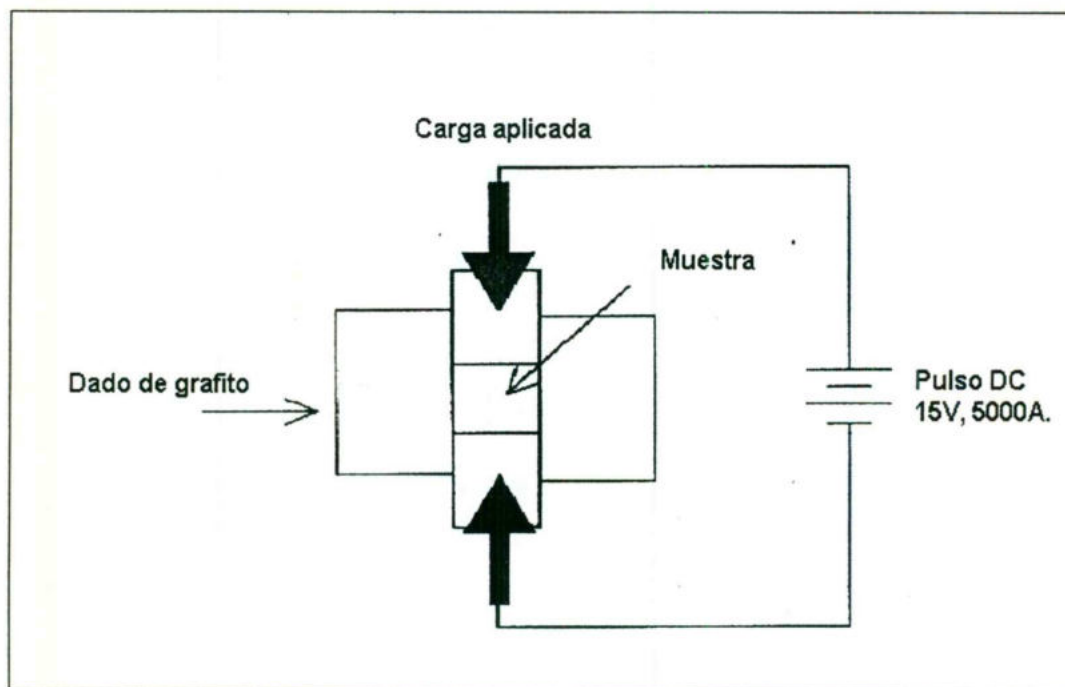


Figura 5. Diagrama esquemático de la muestra en el equipo de SPS.

2. 4. Termodinámica

Una de las manifestaciones más fundamentales de la naturaleza es la energía que acompaña a todos los cambios y transformaciones. Es materia de la termodinámica estudiar las interacciones que tienen lugar en los sistemas, sus leyes son aplicables a todos los fenómenos naturales, y se cumplen rigurosamente ya que están basadas en la conducta de los sistemas. Sin embargo la termodinámica no considera el tiempo de transformación, su interés se centra en los estados inicial y final de un sistema (Maron y col, 1973).

Capacidad Calorífica

La capacidad calorífica se define como el calor absorbido por grado de aumento en la temperatura para un sistema. Simbólicamente está dado por el límite:

$$\lim_{\Delta T \rightarrow 0} \frac{q}{\Delta T} \quad (1)$$

Si el proceso tiene lugar a volumen constante, no se efectúa trabajo de expansión.

$$\left(\frac{\delta q}{\delta T} \right)_v = C_v \quad (2)$$

Donde q es el calor, T la temperatura y C_v la capacidad calorífica a volumen constante. Para la adición de calor a presión constante, $dH = dq$ y la ecuación 3 es la definición termodinámica de C_p (John, 1998).

$$\left(\frac{\delta H}{\delta T} \right)_p = C_p \quad (3)$$

H es la entalpía, C_p el cambio de entalpía a presión constante.

$C_p = C_v$ son iguales para sólidos y líquidos, sin embargo $C_p = C_v + R$ para gases donde R es precisamente la constante de los gases (Maron y col, 1973).

Casi todas las ecuaciones para la capacidad calorífica de sólidos, líquidos y gases son empíricas. Se acostumbra expresar la capacidad calorífica a presión constante, como una función de la temperatura mediante una serie de potencias.

$$C_p = a + bT + cT^{-2} + dT^2 \quad (4)$$

$$\text{ó } \Delta C_p = \Delta a + \Delta bT + \Delta cT^{-2} + \Delta dT^2 \quad (5)$$

En donde ΔC_p es la diferencia de productos menos reactivos para una reacción (Himmelblau, 1995).

Entalpía

La primera ley de la termodinámica establece la conservación de la energía, es decir, ésta ni se crea ni se destruye, solo se transforma.

Los cambios térmicos a presión constante se expresan más adecuadamente mediante la función H , llamada entalpía o contenido calorífico de un sistema. Esta función se define por la relación;

$$H = U + PV \quad (6)$$

Donde U es la energía interna, P es la presión y V es el volumen (Maron y col, 1973). La entalpía de una sola fase se puede expresar excesivamente en términos de temperatura y presión.

$$H = H(T, P) \quad (7)$$

A fin de calcular la entalpía por unidad de masa, aprovechamos la propiedad de que ésta también es un diferencial exacto. Si obtenemos la derivada total de H podemos formar una expresión análoga a la ecuación:

$$dH = \left(\frac{\delta H}{\delta T} \right)_P dT + \left(\frac{\delta H}{\delta P} \right)_T dP \quad (8)$$

Por definición, $(\delta H / \delta T)_P$ es la capacidad calorífica a presión constante, denotada con el símbolo C_p . Para casi todos los propósitos prácticos, $(\delta H / \delta T)_T$ es tan pequeño a presiones moderadas que podemos ignorar el segundo término del miembro derecho de la ecuación 8. Así podemos calcular los cambios de entalpía si integramos la ecuación como sigue:

$$H = \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \quad (9)$$

o para $\Delta H = H_2 - H_1$

$$H_2 - H_1 = \int_{T_1}^{T_2} \Delta C_p dT \quad (10)$$

A menudo se utiliza un conjunto de condiciones de referencia, puesto que la entalpía no tiene un valor absoluto, sin embargo se ha asignado en forma arbitraria un valor de cero a la entalpía para elementos puros a una atmósfera y 25 °C, como referencia, al calcular los cambios, las condiciones de referencia se cancelan; como puede verse a continuación:

Estado inicial del sistema

$$\text{entalpía} = H_1 - H_{ref}$$

Estado final del sistema

$$\text{entalpía} = H_2 - H_{ref}$$

Cambio de entalpía neta

$$(H_2 - H_{ref}) - (H_1 - H_{ref}) = H_2 - H_1 \quad (11)$$

El cambio de entalpía depende sólo de los estados inicial y final del sistema (Himmelblau, 1995). Un valor positivo de $\Delta H = H_2 - H_1$ muestra que el calor es absorbido (endotérmico) durante el proceso, mientras que uno negativo muestra que desprende calor (exotérmico) (Maron y col, 1973).

Los Cambios de entalpía que tienen lugar en una sola fase se conocen como cambios de calor sensible, Los cambios de entalpía para las transiciones de fase se denominan calor de fusión y calor de vaporización o calor latente, Los cambios de entalpía para una sustancia pura en función de la temperatura se muestra en la Figura 6.

Dada la ecuación 5 para la diferencia de capacidad calorífica, podemos calcular el cambio de entalpía por mol, integrando dicha ecuación respecto a la temperatura.

$$\Delta H = \int_{T_1}^{T_2} (\Delta a + \Delta bT + \Delta cT^{-2} + \Delta dT^2) dT \quad (12)$$

Con el fin de dar cuenta de los cambios de energía causados por una reacción química, se incorpora la entalpía de cada constituyente individual una cantidad adicional denominada, cantidad que analizaremos detalladamente (el subíndice F denota formación). Así, para el caso de una sola especie A que no contiene efecto de presión alguna sobre la entalpía, y omite cambios de fase, el cambio de la entalpía específica respecto al estado estándar de referencia está dado por;

$$\Delta H_{.A} = \Delta H_{FA} + \int_{T_{ref}}^T \Delta C_{p,A} dT \quad (13)$$

Para varias especies, tendríamos la ecuación;

$$\Delta H_{MEZCLA} = \sum_{i=1}^S n_i \Delta H_{Fi} + \sum_{i=1}^S \int_{T_{ref}}^T n_i \Delta C_{p_i} dT \quad (14)$$

Donde i , designa a cada especie, n_i es el numero de moles de la especie i , y S es el numero total de especies, a esta ecuación se le puede agregar \pm las entalpías asociadas a los cambios de fase (Himmelblau, 1995).

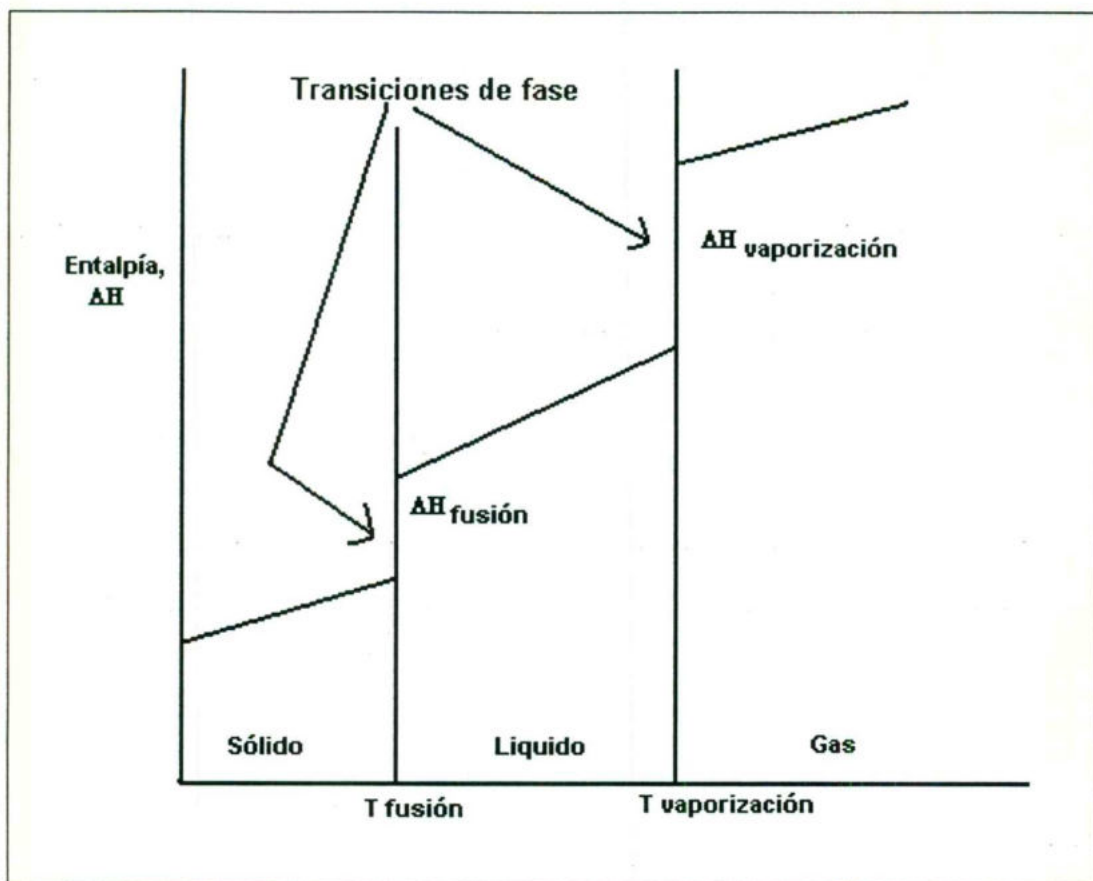


Figura 6. Las líneas verticales representan los cambios de calor latente que ocurren durante una transición de fase.

Temperatura de adiabática

Se define como la temperatura que se alcanza dentro del proceso cuando la reacción se efectúa en condiciones adiabáticas, es decir, cuando no hay intercambio de calor entre el recipiente en el que ocurre y el entorno. La temperatura de reacción adiabática nos indica el límite superior de la temperatura de un proceso. No podemos llegar a más, pero la temperatura real si puede ser menor. La temperatura de reacción adiabática nos ayuda a escoger los tipos de materiales y el equipo en el que se llevará a cabo la reacción (Himmelblau, 1995).

A fin de determinar la temperatura de inicio para una mezcla de compuestos, en un proceso exotérmico se determina la temperatura de inicio de la combustión que se calcula a partir de la temperatura a la cual la entalpía es igual a cero.

Como no hay intercambio de calor entre el sistema y sus alrededores, cualquier trabajo que se realiza en un proceso adiabático, se hace a expensas de la energía interna. Si se hace trabajo sobre el sistema, todo él incrementa su energía interna y en consecuencia su temperatura. Por el contrario, si la energía interna de un sistema disminuye en consecuencia su temperatura también (Upadyaya y col, 1979).

Energía libre de Gibbs

La energía libre de Gibbs está dada por

$$G = H - TS \quad (15)$$

$$\text{ó } \Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (16)$$

En condiciones de presión y temperatura constantes, un proceso sólo puede ocurrir en la dirección en que haya disminución de la energía libre de Gibbs, es decir, Un proceso espontáneo conduce a un valor mínimo de ΔG , y el signo de ΔG debe ser negativo, un valor positivo de ΔG indica que el proceso tiende a llevarse a cabo espontáneamente en la dirección opuesta.

La energía libre de Gibbs normal de formación, ΔG_f^0 (a 298.15 K), se define como el cambio de energía libre de Gibbs correspondiente a la formación de la sustancia en su estado normal a partir de los elementos en sus estados normales.

El cambio de energía libre de Gibbs con la temperatura está dado por la ecuación de Gibbs-Helmholtz (John, 1998)

$$\left[\frac{\delta \left(\frac{G}{T} \right)}{\delta T} \right]_P = \frac{-H}{T^2} \quad (17)$$

o bien

$$\left[\frac{\delta \left(\frac{\Delta G}{T} \right)}{\delta (1/T)} \right]_P = \Delta H \quad (18)$$

La energía libre de Gibbs, proporciona una referencia confiable para predecir el comportamiento de reacciones químicas en función de la temperatura. Se establece que para una reacción que posea un valor más pequeño de ΔG que otra, los productos de la primera reacción serán más estables que los de la segunda.

Por otra parte Ellingham graficó datos experimentales de ΔG contra T , para la oxidación y desulfuración de algunos metales. A pesar de que las funciones de energía libre incluyen términos cuadráticos o logarítmicos, éstas se aproximan a líneas rectas sobre rangos de temperatura en los cuales no ocurren cambios físicos. Por lo que esta relación se puede expresar como:

$$\Delta G = A + BT \quad (19)$$

En donde A es el cambio de entalpía de la reacción, B es el cambio de entropía. La gráfica obtenida con esta ecuación se conoce como diagrama de Ellingham (Gaskell, 1982).

2. 5. Desgaste

Definición de desgaste

Un sistema tribológico está formado por dos o más cuerpos en contacto dinámico o estático, que se afectan mutuamente en una gran variedad de formas. La tribología involucra el estudio de la adhesión, abrasión, fricción, desgaste y lubricación entre dos o más cuerpos en contacto. Una definición aceptada de desgaste es: remoción de material de la superficie de un sistema tribológico resultado de su movimiento relativo y contacto. Otros fenómenos como la

deformación, reacciones químicas o fatiga son sólo casos particulares de determinados sistemas tribológicos.

Durante el desgaste ocurren muchos fenómenos que resultan en interacciones complejas como se muestra en la Figura 7 (Archard, 1999).

El desgaste sigue una relación simple llamada ecuación de Archard, que se expresa como:

$$K = V/S = W*P/H \quad (20)$$

Donde K es el coeficiente de desgaste, V el volumen perdido, P es la presión o carga aplicada, S la distancia recorrida, H la dureza por indentación y W es la constante que dependerá del material y las condiciones de prueba. Esta constante, según el mecanismo de que se trate toma diferentes valores y significados, y se puede calcular al realizar pruebas de desgaste (Sarkar, 1977).

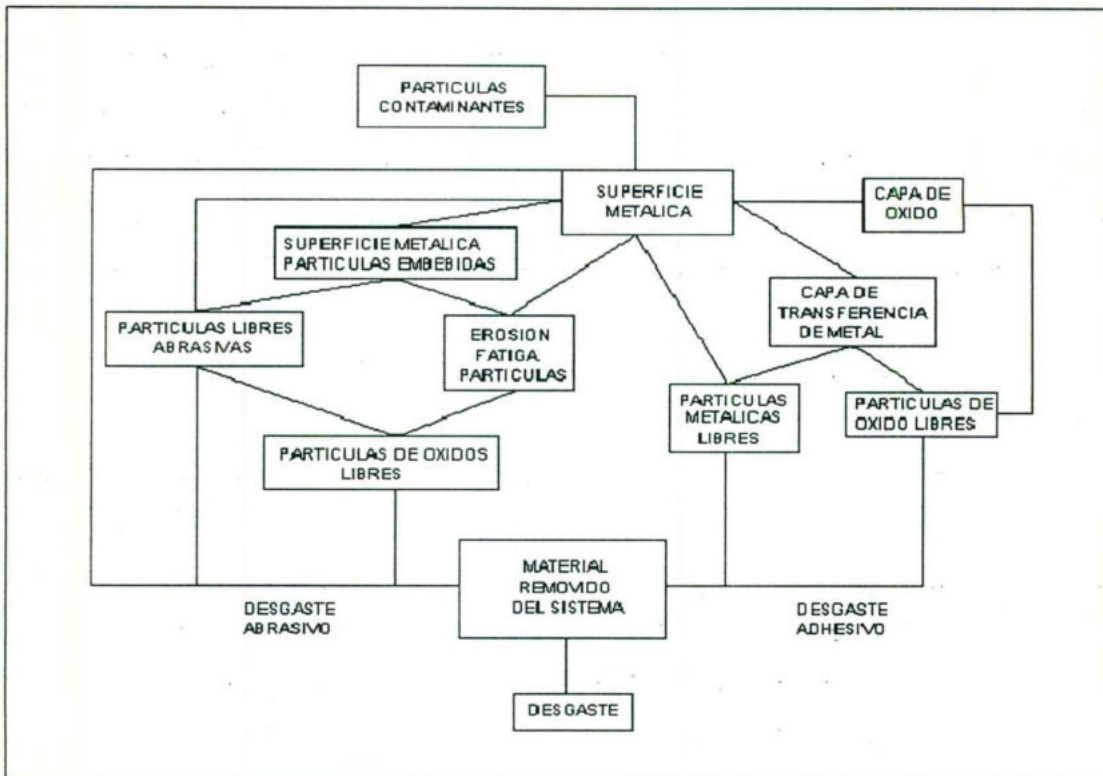


Figura 7. Esquema de la relación entre varios fenómenos que ocurren en el desgaste.

Mecanismos de Desgaste

Las superficies de los sólidos no son perfectamente planas, sino que muestran irregularidades o asperezas. Solo los materiales frágiles, que experimentan clivaje a lo largo de ciertos planos cristalinos, o los monocristales, presentan superficies regulares y planas. Cuando dos sólidos entran en contacto las asperezas estarán soportando la carga aplicada, existiendo la posibilidad de que ocurra deformación elástica y plástica en éstas. Tales deformaciones continuarán hasta que el área de contacto real sea lo suficientemente grande para soportar la carga. Los puntos de contacto pueden formar uniones de acuerdo con las teorías de adhesión. Los contactos atómicos con o sin contaminantes de la superficie, admiten fuerzas de cohesión para crear uniones entre las contrapartes. Durante el movimiento deslizante las uniones se deforman continuamente, plásticamente hasta producir grietas que resultan en fracturas, produciéndose el desprendimiento de material y consecuentemente el desgaste. Este es el fenómeno básico del desgaste; la componente de la fuerza que actúa en la dirección del deslizamiento es la fuerza de fricción.

Se ha observado que puede haber intercambio de material entre las contrapartes del sistema tribológico. Éste es el mecanismo de adhesión presente en el desgaste, el cual depende principalmente de la naturaleza química de los sólidos en contacto. Otro de los mecanismos que producen fractura y pérdida de material es el microcorte. Si una aspereza dura o partícula, producto del desgaste, se desliza sobre la superficie de un material suave, ésta actuará como micro-herramienta de corte, removiendo el material en forma de rebabas o fragmentos. La profundidad y tamaño del surco dependerá del elemento cortante y la carga aplicada.

El impacto de partículas sobre una superficie constituye otro mecanismo de desgaste. Las condiciones de impacto que se establecen en la superficie de contacto son la velocidad, número de partículas y ángulo de incidencia. Si la energía transferida a la superficie no puede ser disipada como calor o deformación plástica, la superficie se relaja formando grietas por impacto.

Durante movimientos cíclicos las superficies de un tribosistema pueden estar sujetas a fenómenos de fatiga. Las fluctuaciones de carga pueden iniciar la

nucleación y crecimiento de grietas por fatiga y terminar en falla. Numerosas clases de fenómenos físicos y químicos pueden promover el agrietamiento.

Parte del trabajo de fricción se disipa, generalmente, como calor y el incremento de temperatura en pequeñas áreas de contacto pueden ser alto, dando lugar a otros fenómenos como la soldadura y en general a desviaciones de lo esperado a temperatura ambiente.

Una combinación de una alta concentración de deformación y temperatura elevada activa una serie de cambios en la capa debajo de la superficie de contacto. Los fenómenos internos que se pueden presentar son: deformación plástica, cambios microestructurales, como la transformación de fases, y de composición química.

Además existen fenómenos externos que dependen de la interacción con la atmósfera que rodea al sistema tribológico, resultando en la formación de una capa superficial, que se puede deber a: a) reacciones químicas; en el aire las superficies limpias se cubren con una capa de óxido o productos de corrosión; y b) adsorción; las moléculas de gases, predominantemente vapor de agua, se fijan a la superficie formando una segunda capa sobre la anterior. Algunas veces estas capas pueden evitar la formación de uniones minimizando el desgaste en sistemas aparentemente no lubricados.

La pérdida de los gases adsorbidos por calentamiento y la ruptura de la capa de óxido cuando se aplica una carga normal alta, expone la superficie de las contrapartes incrementando el desgaste (Sarkar, 1977).

Tipos de Desgaste

Durante el desgaste, el movimiento relativo entre las contrapartes puede ser unidireccional o bidireccional, deslizante o rodante. Un material puede interactuar con otro o con líquidos tales como aceite lubricante o humedad. Dependiendo de la naturaleza del medio envolvente y su interacción bajo carga, el desgaste puede ser clasificado en adhesivo y abrasivo.

Desgaste Adhesivo

Se caracteriza por la deformación y agrietamiento de uniones adhesivas. Eventualmente grietas por fatiga nuclean y se propagan hasta que se desprenden fragmentos de material. También puede ocurrir la adhesión y transferencia de material en ambas direcciones, que finalmente resulte en la pérdida de fragmentos. Dependiendo de la geometría, el mecanismo de adhesión produce protuberancias en la superficie sometida a desgaste, formadas por el material transferido de una superficie a la otra. En la Figura 8 se muestra este mecanismo de desgaste.

El desgaste adhesivo se puede expresar como:

$$V = Z \cdot A \cdot S \quad (21)$$

Donde Z es el número de átomos removidos por evento, A área total, V volumen removido y S es la distancia recorrida; pero como

$$A = P/\sigma \quad (22)$$

Donde P es la carga aplicada y σ el esfuerzo de fluencia del material suave.

Sustituyendo en (2) obtenemos:

$$V/S = Z \cdot P/\sigma \quad (23)$$

Que tiene la forma de la relación de Archard. Ahora bien utilizando la relación del esfuerzo de fluencia y la dureza se obtiene:

$$H = 3 \cdot \sigma \quad (24)$$

Llegamos finalmente a la relación de Archard, solo que en este caso la constante tiene que ver con el número de átomos removidos por evento

$$V/S = 3 \cdot Z \cdot P/H \quad (25)$$

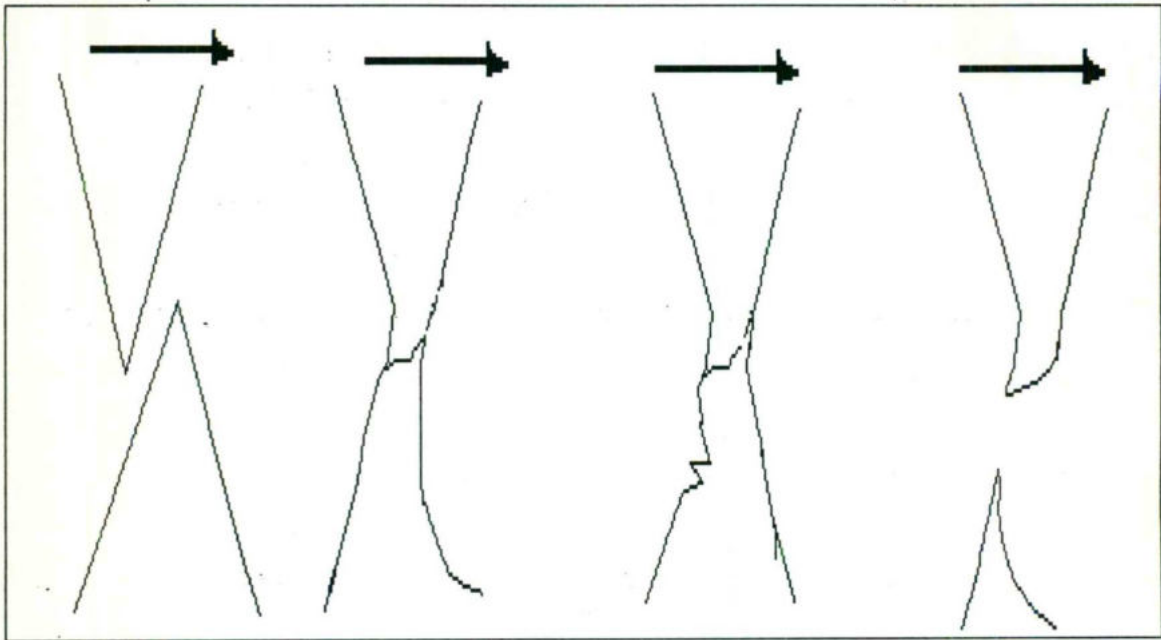


Figura 8. Mecanismo de desgaste adhesivo.

Desgaste Abrasivo

El desgaste abrasivo se caracteriza por la formación de surcos que se producen por micro corte acompañado por una deformación plástica, que resulta del deslizamiento de un elemento abrasivo duro sobre una superficie menos dura. La deformación plástica se refleja en la formación de una cresta al mismo tiempo que el fragmento corta la superficie. Las partículas abrasivas pueden provenir de material desprendido, polvo de los alrededores o de partículas de impurezas que quedan atrapadas en la interfase de deslizamiento. En algunos casos este tipo de desgaste se utiliza para evaluar agentes abrasivos en forma sistematizada siguiendo un proceso estandarizado por ASTM G56-82.

El desgaste abrasivo sigue también una relación similar a las anteriores, solo que la constante se considera como un coeficiente de desgaste y toma valores de acuerdo a la geometría de la partícula que incide sobre la superficie.

$$V/S = \beta * P/H \quad (26)$$

Donde β es el término que contiene las consideraciones geométricas del modelo.

Para calcular la resistencia al desgaste abrasivo de un material sometido a estudio se puede usar la relación siguiente:

$$R_1/R_2 = A * H/P \quad (27)$$

Donde R_1 es la resistencia al desgaste de un material de referencia, R_2 la resistencia del material bajo estudio, A una constante, P la presión aparente de contacto y H la dureza del material bajo estudio (Sarkar, 1977).

Fatiga

Los fenómenos de fatiga son generalmente importantes en todos los tipos de desgaste. Las grietas son el resultado de la acumulación de defectos sub-superficiales debido a fluctuaciones cíclicas de carga. Es común observar que el material removido sea predominantemente producido por fracturas de tipo fatiga que se producen por el crecimiento de las micro grietas. Puede ocurrir desgaste por fatiga cuando hay desgaste abrasivo e impacto.

La propagación de grietas por fatiga está concentrada en dos direcciones, una perpendicular y la otra paralela a la superficie de contacto. Al avanzar estas grietas partes del material de la superficie es removido en forma de hojuelas relativamente grandes. La exfoliación por fatiga es un ejemplo de esto. Este proceso es similar cuando las capas de material intercambiado se remueven por rompimiento durante el desgaste adhesivo. Este proceso es llamado "delaminación".

Erosión

La erosión ocurre cuando una superficie es golpeada por una corriente de partículas. Si las partículas son gotas líquidas el desgaste es llamado erosión por cavitación y cuando son partículas sólidas se denomina erosión. Los sistemas tribológicos erosivos son también llamados sistemas de desgaste de tres cuerpos. Las contrapartes son el primer y segundo cuerpos, las partículas en contacto momentáneo con la superficie constituyen el tercer cuerpo. Este último es el medio por el cual la carga se transfiere entre las contrapartes.

Vibración

Los sistemas tribológicos de este tipo se caracterizan por estar sometidos a oscilaciones de frecuencia alta y amplitudes pequeñas. Dependiendo del material y las condiciones de la superficie, la adhesión puede actuar como un mecanismo de activación para la abrasión, siendo la fatiga es un componente inherente.

Dependiendo del diseño del sistema, éste puede desprender partículas que no pueden escapar del área de contacto y tomen una función abrasiva. Al mismo tiempo la dificultad de mantener una lubricación continua puede provocar adhesión. Para materiales metálicos los efectos adicionales de la corrosión son muy severos, incrementándose el factor de desgaste. Una mezcla de partículas metálicas y partículas provenientes del rompimiento de la capa de corrosión es un medio abrasivo efectivo el cual previene la adhesión y reemplaza al lubricante (Gwindog y col, 1994).

Métodos de Prueba

Existen diferentes pruebas para el estudio del desgaste. Investigaciones de laboratorio son realizadas para la obtención de datos de desgaste y coeficiente

de fricción. Para ambos el control y la medición de todas las variables, cuya influencia es de suma importancia, se precisa para lograr cierto régimen de desgaste. Evidentemente un cambio de dichas condiciones puede cambiar radicalmente el régimen de desgaste y los mecanismos asociados.

En la Figura 9 se muestran los dos tipos de contacto: simétrico y asimétrico. En el primero el área de contacto entre las superficies no cambia, mientras que en el segundo el área de contacto cambiará según progrese el ensayo, además de que puede inducirse un cambio en el régimen de desgaste.

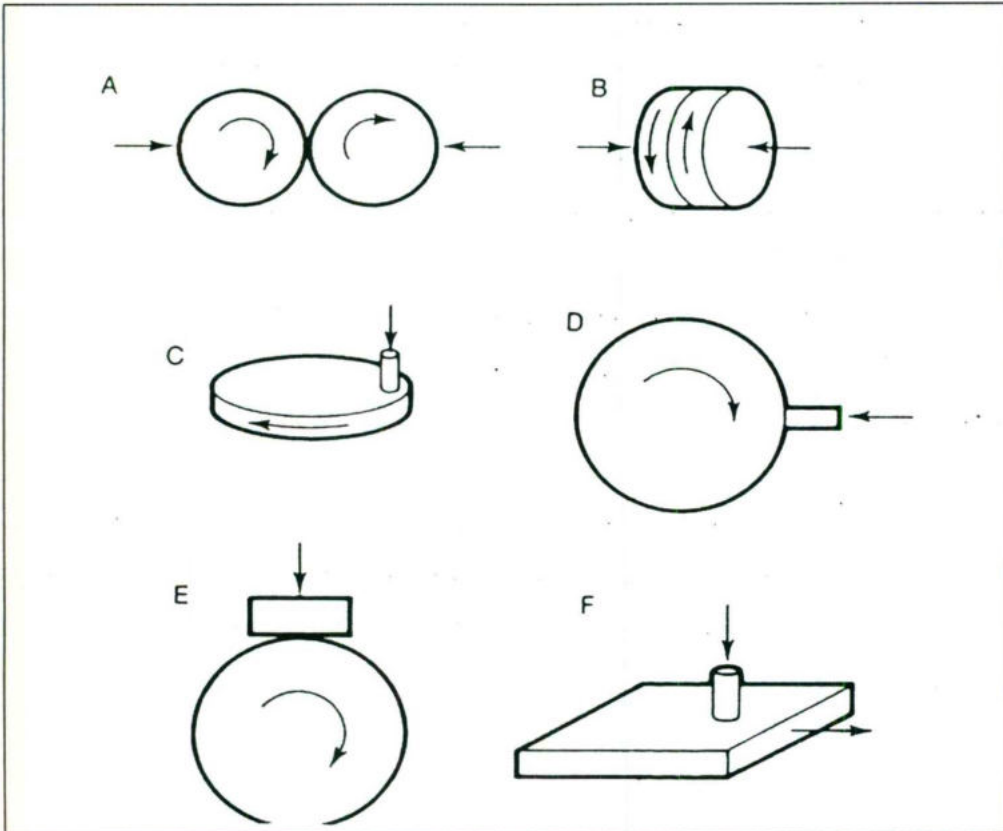


Figura 9. Arreglo geométrico de varios aparatos para la prueba de desgaste.

Los arreglos simétricos son usados con poca frecuencia para el estudio del desgaste, sin embargo, si se realiza experimentación en un dispositivo de dos discos, a lo largo su borde que equivale a un contacto sobre una línea (Figura 9.A.) o cara sobre cara (Figura 9.B.). El equipo de prueba más comúnmente empleado es el de presión en un punto sobre un disco, en la cara (Figura 9.C.), en el borde (Figura 9.D.), bloque sobre un anillo (Figura 9.E.) o punto en un plano (Figura 9.F.). En estos casos el contacto puede realizarse sobre la misma área o línea. Detalles de este tipo de contacto son mostrados en la Figura 10.

Un par de componentes simétricamente acoplados en un punto pueden ser analizados como una muestra, la variable a medir es la velocidad de desgaste del borde o cara del disco. Los arreglos de la Figura 10 (a) se denominan contactos conformes porque el área de contacto no cambia conforme la prueba progresa, mientras que los del inciso (b) son no-conformes debido a que área cambia con el tiempo. Algunas veces un contacto no-conforme puede terminar siendo conforme.

Otra prueba muy utilizada es la de los cuatro balines, ilustrada en la Figura 11. Los balines inferiores giran juntos, el balín superior está fijo y presiona hacia abajo. Estos balines son usualmente fabricados de acero alto cromo alto carbono, y el objetivo de la prueba es evaluar el desempeño de un lubricante más que para estudiar el comportamiento del material.

Existen varios métodos de desgaste que están sujetos a estándares internacionales, por ejemplo, bloque sobre anillo en ASTM G77, cilindros transversales en ASTM G83, punta sobre disco en ASTM G99, esferas sobre disco en DIN50324 y punta sobre plano rotatorio en ASTM G98.

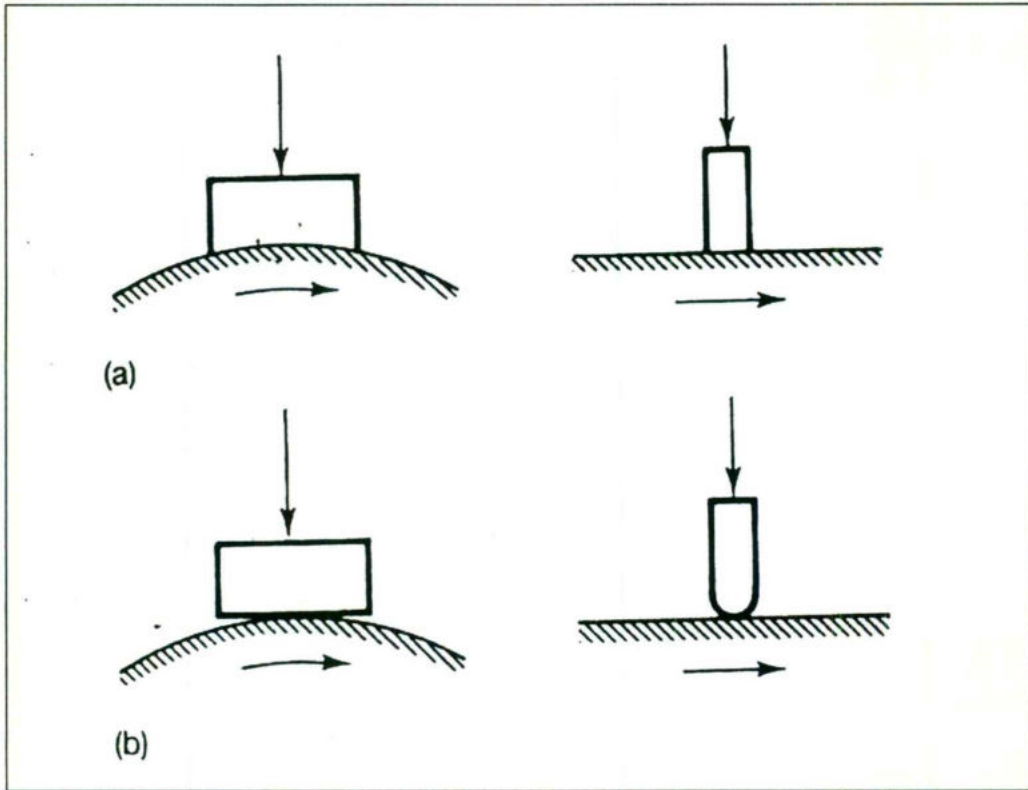


Figura 10. (a) Contacto conforme, y (b) Contacto no-conforme.

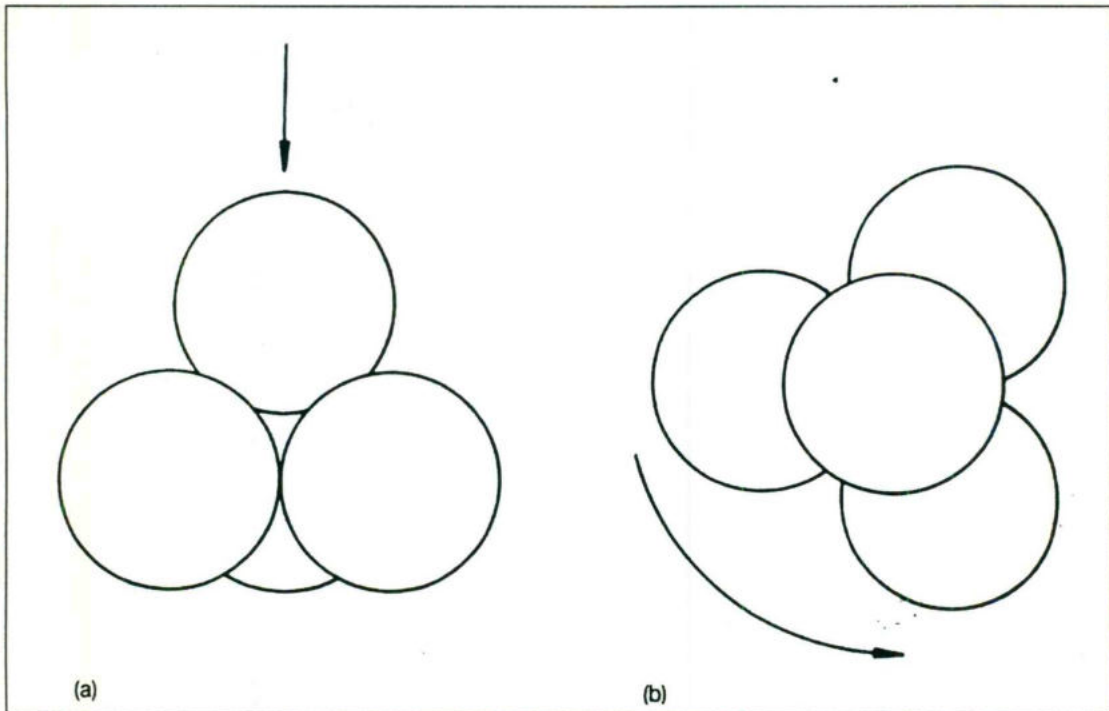


Figura 11. Prueba de desgaste usando cuatro balines.

El desgaste usualmente se mide por la cantidad de material removido, expresado como pérdida en peso o en volumen, o como una medida continua de la posición del aditamento de sujeción de la muestra, que lo traduce en una magnitud de desgaste. En el caso de contacto sobre el borde de disco o anillo, el desgaste produce un área de contacto en forma de raya, por lo que medir el tamaño de la marca en la muestra puede dar una lectura confiable del desgaste.

En alguna interrupción de la prueba, para medir o pesar la muestra, ésta se tiene que reemplazar en exactamente la misma posición. Por otra parte, la fricción no es solo una propiedad numérica evaluada por μ , sino que también permite estimar un cambio en las características del deslizamiento y por lo tanto en el régimen de desgaste. El régimen de desgaste se asocia con los cambios topográficos en la superficie y al mecanismo de desgaste prevaleciente.

Para un mayor control de la prueba es necesario controlar la temperatura, lubricación carga normal, velocidad de deslizamiento, tiempo de prueba y otros factores. La temperatura de la prueba es importante ya que ésta tiene influencia sobre las propiedades mecánicas de los materiales y en las reacciones químicas que puedan ocurrir. Un sistema de lubricación es igualmente necesario para evaluar la efectividad de una lubricación en capa límite o hidrodinámica. La orientación de la muestra puede igualmente afectar los resultados de una prueba. Un comportamiento diferente puede ser observado si el material removido por el desgaste cae dentro o fuera del área de contacto.

La extensa lista de influencias sugiere que no es posible producir una simulación válida para una aplicación práctica, a menos que siempre se esté consiente de las posibles consecuencias y desviaciones de las condiciones con las que se simula. Los resultados de pruebas de laboratorio pueden ser aplicados para la resolución práctica de un problema real (Hutchings, 1992).

Curva de Desgaste

Si el volumen o el peso perdido es graficado continuamente contra la distancia, se obtiene una curva característica como la mostrada en la Figura 12. La pérdida en peso inicial es curva decreciendo hasta el punto A, a partir del cual sigue una línea recta AB. El aumento del volumen o peso perdido en el desgaste inicial está dado por OA, mientras que AB corresponde al estado estable. En esta región se determina el coeficiente de desgaste de un material.

Cuando dos materiales entran en contacto bajo la acción de una carga, ésta se concentra en las áreas de contacto verdadero, que son las asperezas. Algunas veces esta concentración rebasa el límite de cedencia del material más suave, produciendo flujo plástico y crecimiento del área de contacto a un tamaño proporcional a la carga aplicada. Si ambos materiales son duros (frágiles), las asperezas pueden ser removidas por agrietamiento y fractura, adquiriendo la superficie una apariencia llana donde el área de contacto verdadera se ha incrementado. Esta puede ser la razón más común por la cual el desgaste inicial ocurre y es superado al lograrse un área de equilibrio. Pero esto no explica todos los casos, ya que algunas veces hay evidencia de formación de óxidos o un incremento en la dureza de la superficie de las contrapartes, por lo que el mecanismo de desgaste estará gobernado por un gran número de factores interrelacionados.

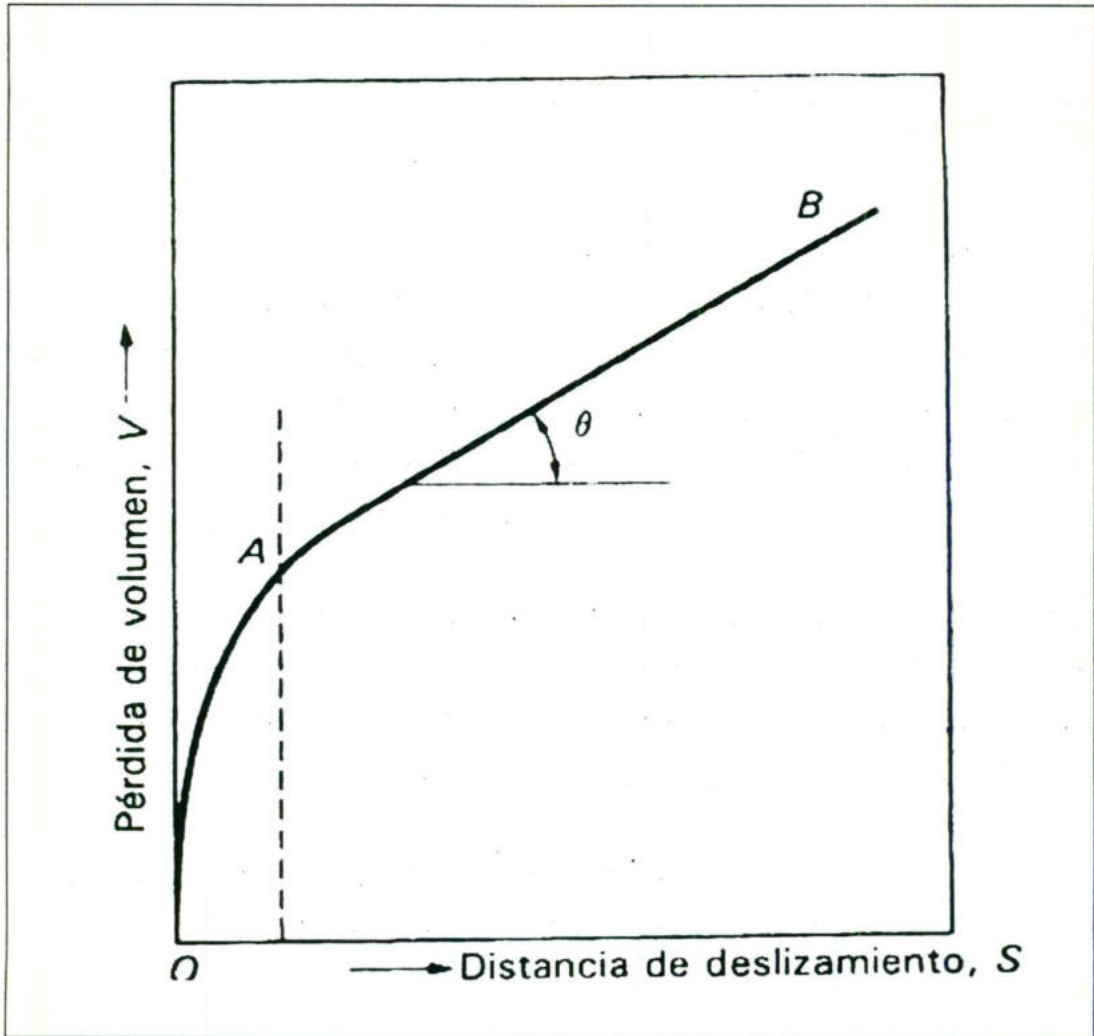


Figura 12. Curva típica de desgaste.

Coefficiente de Desgaste

Cuando un nuevo material de fricción es investigado, la primera fase del trabajo es usualmente la evaluación de la cantidad de desgaste en función de la carga aplicada. Para cargas bajas, al inicio prevalece un régimen de desgaste severo, el cual cambia a un régimen de desgaste medio o bajo, Figura 13. Si posteriormente la carga se incrementa el coeficiente de desgaste se incrementa, volviendo a decrecer a un valor más bajo cuando el tiempo aumenta (Sarkar, 1977).

En la bibliografía revisada se ha encontrado que el desgaste puede expresarse de diferentes formas, como coeficientes adimensionales, valores netos del volumen o peso perdido en función de la distancia recorrida, o el tiempo, y coeficientes que dependen del volumen o peso perdido, la carga aplicada y distancia recorrida. Todos ellos determinados para dar una interpretación adecuada a la investigación.

En una investigación realizada por Gwindon, W. 1994 el desgaste se mide en función del promedio de las diferencias de los flancos de desgaste o tamaño promedio del cráter formado en la muestra, antes y después de la prueba, dividiendo entre la distancia recorrida.

Otro coeficiente de uso común es el reportado por Hutchings, I. 1992. Dicho coeficiente de desgaste es una relación entre de distancia recorrida, la dureza Brinell y la carga aplicada.

Por otra parte la norma ASTM G77-98 relaciona el coeficiente de desgaste con el esfuerzo de compresión, la carga aplicada, la relación de Poisson y el modulo de Young, de los materiales sometidos a desgaste.

Las relaciones de Archard también pueden expresarse como un función de la carga aplicada, la dureza Brinell y la densidad. De ellas la de mayor utilización es la que relaciona el volumen perdido y la distancia recorrida, a la cual también puede agregarse la carga aplicada.

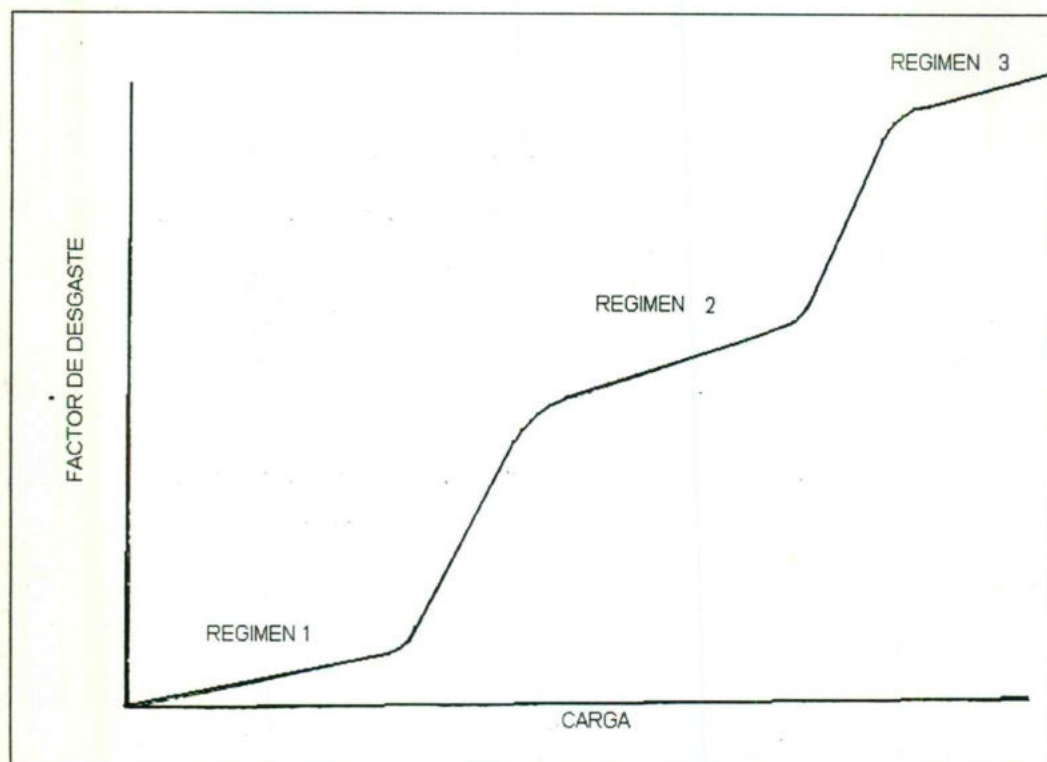


Figura 13. Curva de desgaste para diferentes regímenes.

2. 6. Fricción

Siempre que un cuerpo se desliza sobre otro, las fuerzas de fricción opuestas al movimiento, se desarrollan entre ellos. Tales fuerzas se deben, en gran parte, a las fuerzas de atracción atómicas y moleculares en las pequeñas áreas de contacto. Dentro de ciertos límites, la lisura de las superficies no afecta grandemente a la fuerza de fricción deslizante f . Si las superficies son lisas habrá muchas áreas pequeñas de contacto, mientras que si son ásperas, habrá muy pocas, pero más grandes.

Definición

La fricción estática o fricción de arranque, es mayor que la fricción cinética. Sin embargo, una vez que el cuerpo se mueve, la fuerza de fricción por deslizamiento solo crece ligeramente al aumentar la rapidez y permanece casi constante en un intervalo limitado de velocidades.

Medida de fricción

Siempre que hay movimiento hay fricción y todas las formas de fricción se pueden clasificar dentro de una de estas tres clases:

Fricción por deslizamiento

Fricción por rotación

Fricción en fluidos

De las cuales esta última no revisaremos por ser exclusiva para líquidos.

La fricción por deslizamiento y la fricción por rotación están limitadas corrientemente a los sólidos, mientras que la fricción en fluidos se aplica a los líquidos y gases. En general, la fricción por deslizamiento es mayor que la fricción en fluidos a bajas velocidades, mientras que a grandes velocidades, es lo contrario.

La fuerza de fricción por deslizamiento f es directamente proporcional a la fuerza total hacia abajo o fuerza normal N .

$$f \propto N \quad (28)$$

Introduciendo la letra griega μ como una constante de proporcionalidad, la ecuación se convierte en:

$$f = \mu N \quad (29)$$

Donde μ es llamado coeficiente de fricción, y esta definido como el cociente entre la fuerza de fricción y la fuerza normal.

$$\mu = \frac{f}{N} \quad (30)$$

Fricción por rotación

Cuanto más dura sea una rueda o una bola, y cuanto más dura sea una superficie sobre la que ruedan, menor es la fuerza de fricción por rotación. Una mejor comprensión del origen de esta fricción se obtiene al comparar las diferentes clases de ruedas que se muestran en la Figura 14.

Las mismas ecuaciones que sirven para la fricción por deslizamiento, son válidas para la fricción por rotación, la única diferencia es que los coeficientes de fricción por rotación son sumamente pequeños (Harvey, 1965).

$$f = \mu N \quad (31)$$

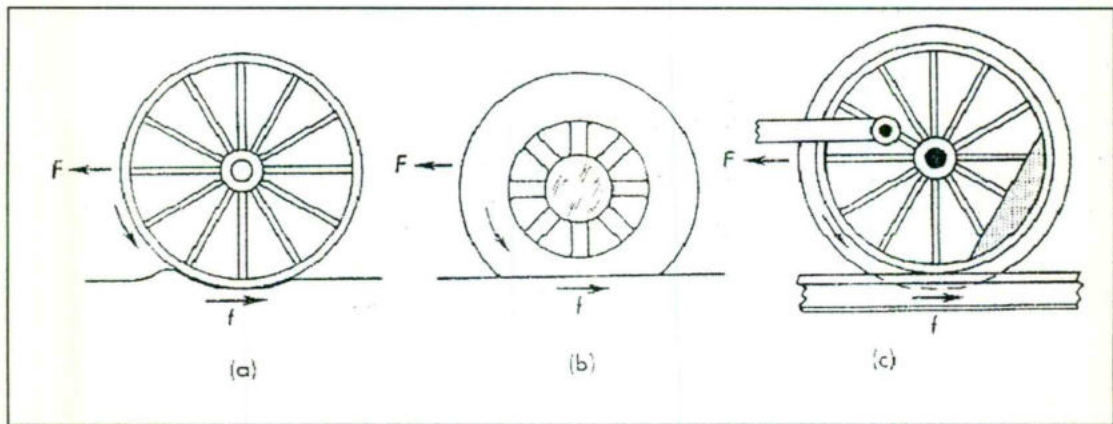


Figura 14. Tipos de ruedas

3. Objetivos

3. 1. Objetivo general

Estudiar la síntesis del compuesto Si-SiC-FeSi₂, mediante la utilización de datos termodinámicos y los parámetros de proceso, además de determinar su comportamiento al desgaste.

3. 2. Objetivos particulares

Evaluar las entalpías de reacción para determinar si las reacciones que ocurren durante la síntesis son exotérmicas o endotérmicas.

Determinar la temperatura adiabática para la síntesis autosostenida, las ecuaciones de energía libre de Gibbs, trazando los diagramas de Ellingham correspondientes, tomando en cuenta los parámetros de procesamiento.

Establecer las ventajas que el compuesto ofrece como un material de fricción mediante la evaluación de la resistencia al desgaste con distinta composición química utilizando el mismo material de contraparte.

4. Método Experimental

El método experimental consiste en evaluar la energía libre de Gibbs para todas las reacciones posibles por separado sin llegar a un balance de energía de esta forma se conoce su grado de estabilidad y espontaneidad dentro de un rango de temperatura de 298 a 2000 K, para una mezcla de polvo de silicio, carbono y hierro. Además se calcula la temperatura adiabática de reacción para la formación del carburo de silicio con el fin de conocer si es posible su síntesis por debajo de los 2000 K.

Una vez conociendo esta información, son enviados los polvos para ser sinterizados en la universidad de California, consolidadas las muestras son examinadas en el microscopio electrónico de barrido, revelando la presencia de $\text{FeSi}_2\text{-Si-C}$ y SiC , terminado este paso son regresadas al para ser cuantificada su resistencia al desgaste.

4. 1. Termodinámica

La capacidad calorífica de una reacción está determinada por la ecuación:

$$\Delta C_p = \Delta a + \Delta bT + \Delta cT^{-2} + \Delta dT^2 \quad (5)$$

En el Anexo 1 se presentan los datos de C_p , utilizados para la evaluación de las especies.

La entalpía es evaluada por la función:

$$\left(\frac{\delta H}{\delta T} \right)_p = \Delta a + \Delta bT + \Delta cT^{-2} + \Delta dT^2 \quad (32)$$

que integrando resulta

$$\Delta H = \Delta aT + \frac{\Delta bT^2}{2} - \Delta cT^{-1} + \frac{\Delta dT^3}{3} + C_1 \quad (33)$$

C_1 es evaluada tomando en cuenta el valor de ΔH^0 de referencia a 298.15 K. De esta forma se obtiene la ecuación para obtener la entalpía de cada reacción y determinar si es endo o exotérmica.

En base a la ecuación de Gibbs-Helmholtz se deduce la forma de obtener la energía libre.

$$\frac{\delta\left(\frac{\Delta G}{T}\right)}{\delta T} = -\frac{\Delta H}{T^2} \quad (18)$$

Sustituyendo la ecuación de entalpía se obtiene

$$\frac{\delta\left(\frac{\Delta G}{T}\right)}{\delta T} = -\frac{\Delta a}{T} - \frac{\Delta b}{2} + \frac{\Delta c}{T^3} - \frac{\Delta dT}{3} - \frac{C_1}{T^2} \quad (34)$$

que integrando resulta

$$\frac{\Delta G}{T} = -\Delta a \ln T - \frac{\Delta bT}{2} - \frac{\Delta c}{2T^2} - \frac{\Delta dT^2}{6} + \frac{C_1}{T} + C_2 \quad (35)$$

Despejando para la energía de Gibbs

$$\Delta G = -\Delta aT \ln T - \frac{\Delta bT^2}{2} - \frac{\Delta c}{2T} - \frac{\Delta dT^3}{6} + C_1 + C_2T \quad (36)$$

y C_2 es evaluada sustituyendo el valor de

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (37)$$

obtenido de tablas a 298.15 K, Anexo 1. Tomando las siguientes consideraciones:

De acuerdo con la Figura 15, al efectuar un calentamiento para una especie X, ésta eleva su energía desde la temperatura de inicio ($T=298$ para nuestro caso), hasta la temperatura final T_2 , durante esta operación la especie X puede experimentar cambios en su estructura cristalográfica existiendo para cada una de ellas una función de capacidad calorífica determinada para ese rango de temperatura; la función obtenida de la integración de la ecuación de C_p es llamado calor sensible, y la energía involucrada en el cambio de estado es el calor latente, de los cuales este último se consulta en tablas termodinámicas ya que es un valor constante.

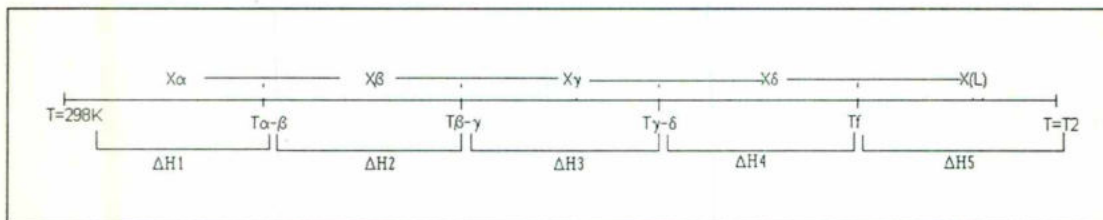


Figura 15. Transiciones que se presentan debido al aumento de la temperatura.

ΔH para una temperatura T2 es la suma de las entalpías involucradas durante todo el proceso, más la suma del calor latente.

$$\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_{\alpha-\beta} + \Delta H_2 + \Delta H_{\beta-\gamma} + \Delta H_3 + \Delta H_{\gamma-\delta} + \Delta H_4 + \Delta H_f + \Delta H_5 \quad (38)$$

Del mismo modo, el valor de ΔG para una temperatura T2 es evaluado por:

$$\Delta G = \Delta G_1 + \Delta G_{\alpha-\beta} + \Delta G_2 + \Delta G_{\beta-\gamma} + \Delta G_3 + \Delta G_{\gamma-\delta} + \Delta G_4 + \Delta G_f + \Delta G_5 \quad (39)$$

Por otra parte, se puede introducir el efecto de presión para el sistema, sin embargo, la presión de vacío medida en el equipo de SPS fue de -20 a -30 Torr, y cerca de la ciudad de Sacramento, California, donde se tiene una presión barométrica de 29.94 inHg (760.5 torr), entonces la presión absoluta estará dada por:

$$P \text{ (absoluta)} = 760.5 - 20 \text{ a } -30$$

$$P \text{ (absoluta)} = 740.5 \text{ a } 730.5 \text{ mmHg}$$

$$P \text{ (absoluta)} = 0.97 \text{ a } 0.96 \text{ atm}$$

Por lo tanto, las funciones termodinámicas son calculadas a una presión de una atmósfera, debido a que el efecto de esta influye de manera imperceptible.

Los diagramas de Ellingham se obtienen graficando ΔG en los rangos de temperatura especificados por las ecuaciones respectivas (Gaskell, 1982).

La temperatura adiabática de reacción es obtenida graficando ΔH de los reactivos y de los productos como se muestra en la Figura 15. Esta temperatura se determina trazando la línea desde la curva de ΔH de los reactivos a 298.15 K hacia la curva de ΔH de los productos, el punto de intersección corresponde a la temperatura adiabática (T_a).

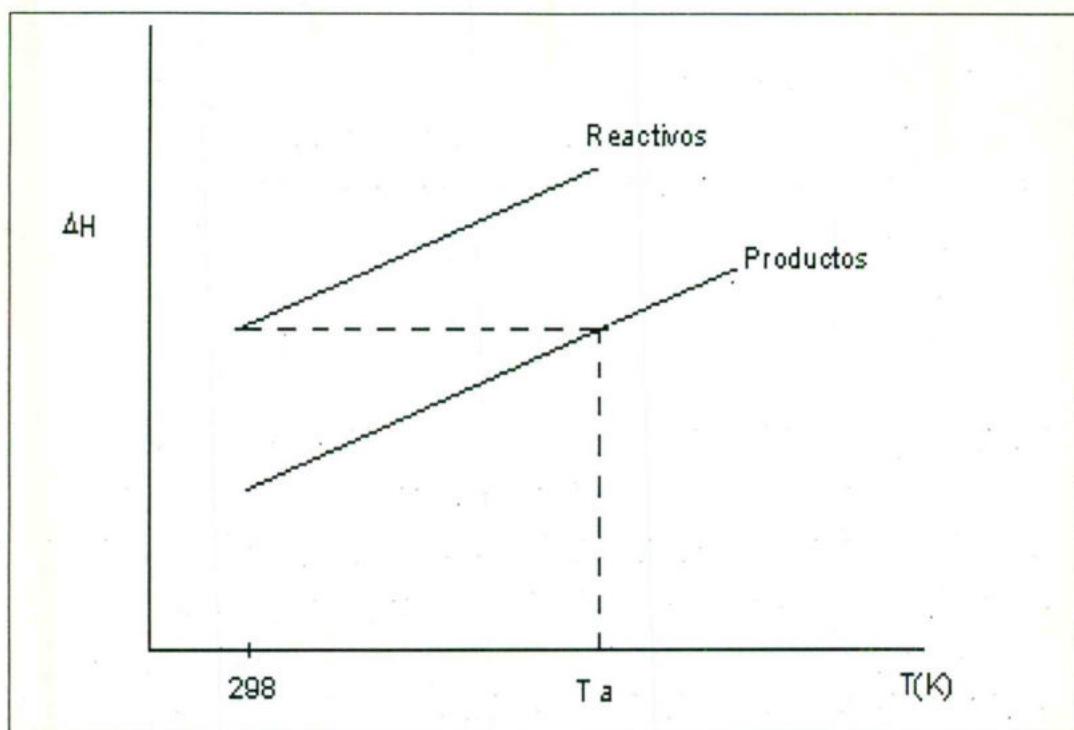


Figura 16. Método gráfico para la determinación de la temperatura adiabática.

4. 2. Síntesis

Los materiales utilizados en este trabajo tienen una pureza nominal de 99.5% y granulometría de -325 mallas. El polvo de silicio y hierro fueron suministrados por Alfa Aesar, mientras que el grafito por Superior Graphite Company. La mezcla precursora de silicio-grafito se preparó con base en la composición estequiométrica del SiC. Esta mezcla fue sometida a mezclado mecánico y molienda de alta energía por 6 horas. Una vez que las mezclas silicio-grafito fueron preparadas (mezclado y molienda), se mezclaron con cantidades adicionales de polvos de silicio, grafito y hierro, de manera que la composición final fuera la determinada en el Cuadro 1 con el fin de lograr composición química con la siguiente proporción de fases:

Cuadro 1. Composición química de las muestras.

Muestra	% Si	% SiC	% FeSi ₂	% Fe	Carga (kN)
1	10	35 Si + 15 C	20 Si + 20 Fe	0	25
2	10	35 Si + 15 C	20 Si + 20 Fe	0	18
3	0	14 Si + 6 C	6.75 Si + 6.75 Fe	66.5	18
4	0	14 Si + 6 C	6.75 Si + 6.75 Fe	66.5	25
5	Balata comercial semimetálica (material de referencia para la prueba de desgaste)				

La molienda de alta energía fue realizada en un molino planetario marca Fritsch Pulversette 5. La consolidación se realizó en un aparato de "Spark Plasma Sintering", marca Sumitomo modelo 1050, con una fuente de poder pulsante de 15V y 5000 A. para la consolidación de las mezclas de polvos en el aparato de SPS, éstas se colocaron dentro de matrices y punzones de grafito, a través de los cuales se aplicaron los pulsos eléctricos para mantener una temperatura de 1200 a 1300°C.

Esta parte se realizó en el Departamento de Ciencia de Materiales e Ingeniería Química de la Universidad de California Campus Davis, bajo la supervisión del Dr. Zuhair A. Munir.

4.3. Desgaste

Para medir el desgaste se utilizó el método de prueba "block on ring" de la norma ASTM G77-98 mostrado en la Figura 17, el cual también se utilizó para medir el coeficiente de fricción deslizante en función de la carga aplicada y velocidad.

Debido a la imposibilidad de contratar el servicio para realizar las pruebas tribológicas, fue necesario diseñar y construir una maquina para estos fines, la que es mostrada en la Figura 18, y las condiciones de experimentación fueron tomadas de la norma SAE -The Enginnering Society For Mobility Land Sea Air An Space- del apartado J661 "Brake Lining Quality Test Procedure". Es importante mencionar que esta norma recomienda como aparato de prueba, un dinamómetro que tiene un tambor de hierro gris para probar la fricción del material por lo que se han aproximado los parámetros de prueba a los que en ésta se establecen.

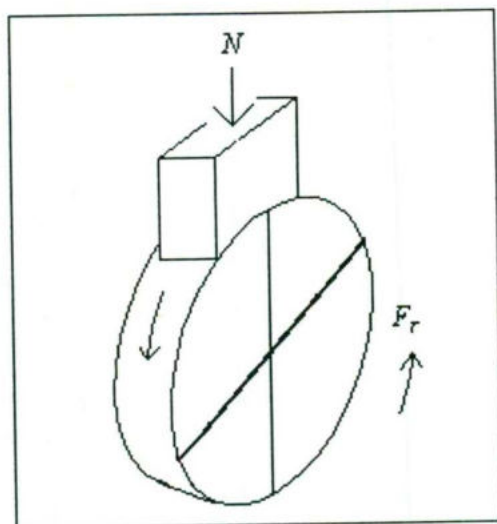


Figura 17. Método "block on ring"

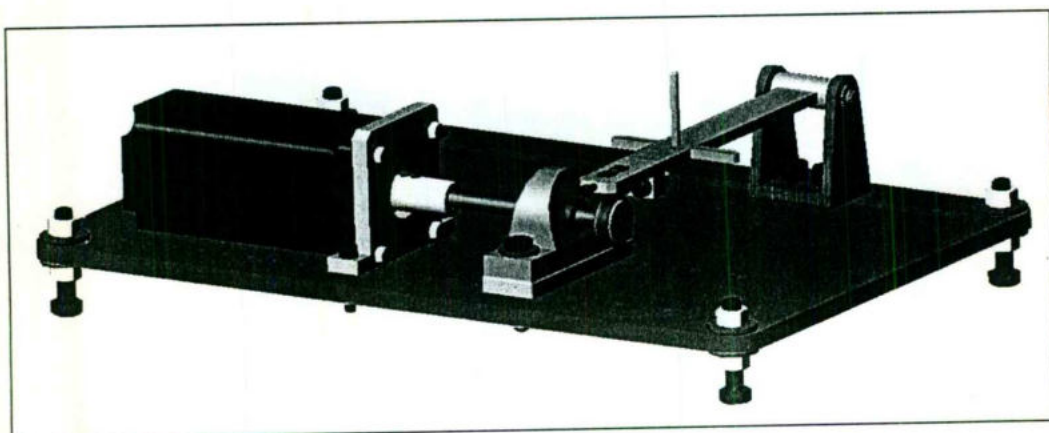


Figura 18. Máquina de desgaste diseñada y construida por CIATEQ.

Como la prueba se realizó con la geometría "block on ring" y las muestras tenían un espesor diferente se necesitó determinar una carga aplicada distinta para cada una de ellas. Para ello se fijó una longitud de arco igual para todas las muestras, de 6 mm de cuerda. Remarcando que las condiciones fueron dadas para que la presión aplicada fuera de 1.034 N/mm^2 , en cada muestra, recomendada por SAE J661.

El Cuadro 2 presenta las características de las muestras, la fuerza normal requerida y la carga aplicada.

Cuadro 2. Carga aplicada a cada muestra

Muestra	Espesor, mm	Área de contacto, mm^2	Fuerza aplicada, N	Carga aplicada, Kg
1	5.34	32.04	33.13	3.77
2	5.30	31.56	32.63	3.327
3	3.22	19.32	19.98	2.036
4	3.15	18.90	19.54	1.992
Balata	5.07	31.56	32.60	3.327

La máquina cuenta con un brazo, el cual se utiliza para aplicar la carga y es esquematizado en la Figura 19. A continuación se explica como se llevo acabo la determinación del peso en la máquina para obtener la carga aplicada de la Cuadro 2, para el área de contacto de cada muestra.

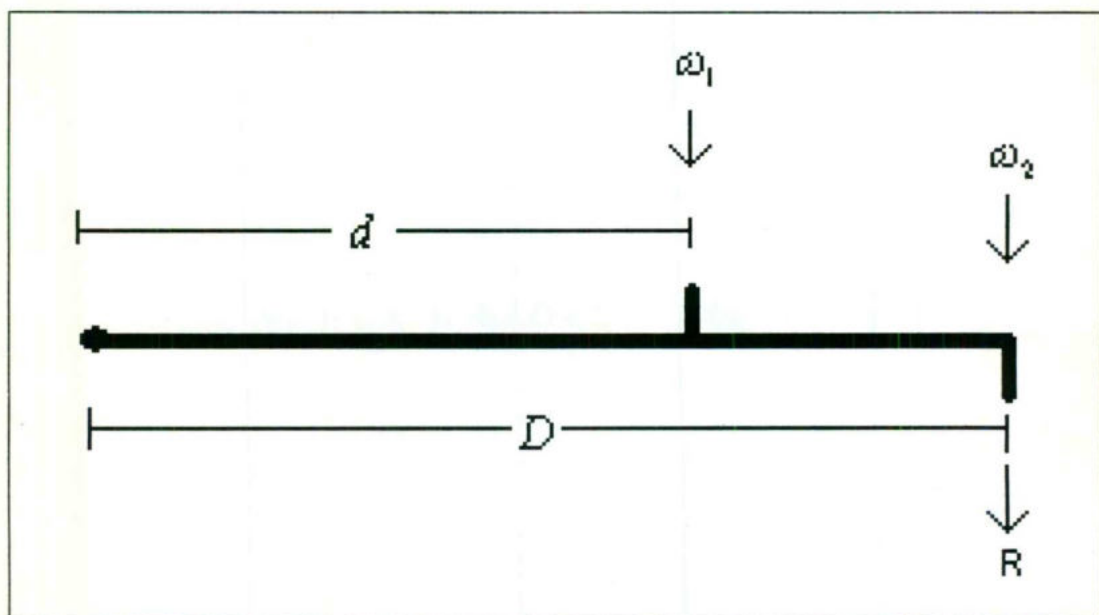


Figura 19. Esquema del brazo para la aplicación de la carga.

La ecuación 37, es la relación entre las cargas y sus distancias; de ésta se puede despejar ω_2 .

$$\omega_1 d = \omega_2 D \quad (40)$$

Dada la ecuación 38, podemos calcular la carga generada por el peso 1, en el punto 2 es decir:

$$\omega_2 = \frac{\omega_1 d}{D} \quad (41)$$

si $d = 165$ mm y $D = 245$ mm, entonces $\omega_2 = 0.673\omega_1$ y si el peso de la palanca en el punto 2 es de 273 grs la carga neta R, es igual a:

$$R = 275 + 0.673\omega_1 \quad (42)$$

Donde ω_1 es el peso que se debe poner en el vástago o punto 1 y R es la carga en la máquina necesaria para obtener la carga aplicada del Cuadro 1.

En el Cuadro 2, la columna de "carga en la máquina" se refiere al peso colocado sobre el brazo. Todas las muestras fueron manejadas de tal forma que no fueran afectadas por partículas extrañas, esto para dar seguridad de los resultados obtenidos, se midió la pérdida de peso y diámetro del anillo para cada periodo de las pruebas. La velocidad angular se fijo en 1650 rpm, para todas las muestras.

La forma de obtener el coeficiente de desgaste para la muestra es de la forma siguiente:

$$K = \frac{W}{\rho L d} = \frac{V}{L d} \quad (43)$$

donde W , es la diferencia de peso de la muestra en gramos, ρ , es la densidad de la muestra en gramos por centímetro cúbico, L , la carga en newtons y d , la distancia recorrida en metros.

Para el desgaste del anillo se simplifica la siguiente formula:

$$K = \frac{\pi(d_0^2 - d_i^2)e}{4Ld} \quad (44)$$

Para π es 3.1416, d_0^2 y d_i^2 es el diámetro del anillo al cuadrado, e el espesor de la muestra, L la carga en newtons, y d la distancia recorrida en metros.

Cuadro 3. Condiciones de prueba para cada una de las muestras.

Muestra	Densidad de la muestra, g/mm ³	Carga en la máquina (R), Kg
1	3.0446	4.606
2	3.0446	4.532
3	3.0446	2.615
4	3.0446	2.549
5 (Balata)	1.4225	4.532

4. 3. Fricción

La fricción fue medida mediante el torque del motor, explicada en el manual del mismo de la forma siguiente:

La potencia del motor es directamente proporcional al voltaje y a la intensidad de corriente, por medio de la siguiente ecuación:

$$Potencia = \left(Voltaje \cdot \frac{I}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{3} \right) \cdot 0.85 \quad (45)$$

Llamaremos ΔI a la diferencia de $I - I_0$, donde I es la intensidad de corriente requerido por el motor cuando la carga es aplicada, e I_0 es la intensidad de corriente requerida sin carga (inherente al equipo), por lo tanto ΔI es el consumo de corriente efectivo con lo que se calcula torque debido a la carga que se aplica a la muestra.

Sí el motor consume 230 volts, entonces la ecuación toma de la siguiente forma:

$$Potencia = \left(230 \cdot \frac{\Delta I}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{3} \right) \cdot 0.85 \quad (46)$$

El torque es directamente proporcional a la potencia (P) e inversamente proporcional a la velocidad angular

$$T = \frac{P}{W} \quad (47)$$

Sí la velocidad angular (W) se fija en 1650 rpm, que es igual a 172.78 rad/seg, y tomando las ecuaciones anteriores entonces:

$$T = 1.385\Delta I \quad (45)$$

La fuerza tangencial (F_T) esta dada por

$$F_T = \frac{T}{r} \quad (48)$$

y r es distancia ó radio del anillo que es de 17.5 mm, la ecuación final es:

$$F_T = 1.385 \times 1000(I - I_0)/r = f \quad (49)$$

De esta forma es como se obtiene la fuerza tangencial o fuerza de fricción (f) y la fuerza normal (N) es la fuerza aplicada es tomada del Cuadro 1, y el coeficiente de fricción es obtenido por la ecuación 30. Donde μ es llamado coeficiente de fricción.

$$\mu = \frac{f}{N} \quad (30)$$

La forma de registrar I o I_0 es por medio de una tarjeta de adquisición de datos, la cual hace la captura del amperaje en lapsos de un segundo durante todo el tiempo de la prueba.

5. RESULTADOS

5. 1. TERMODINÁMICA

SISTEMA SILICIO

El polvo de silicio incorporado al sistema, puede reaccionar de diferentes formas las cuales se presentan en el Cuadro 3, junto con la entalpía tipo de cada una.

Recordando la definición de entalpía las reacciones dos y cinco son exotérmicas mientras que las restantes absorben calor del sistema.

Cuadro 4. Reacciones y entalpías tipo del sistema silicio.

Reacción	Entalpía KJ/mol a 298K
1.- $\text{SiO}_2 + 3\text{C} \rightarrow \text{SiC} + 2\text{CO}$	622.01
2.- $\text{Si} + \text{C} \rightarrow \text{SiC}$	-66.99
3.- $\text{Si} + \text{CO} \rightarrow \text{SiC} + \frac{1}{2} \text{O}_2$	43.51
4.- $\text{Si} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{SiC} + \text{O}_2$	326.51
5.- $\text{Si} + \text{O}_2 \rightarrow \text{SiO}_2$	-910.9
6.- $\text{SiO}_2 + 2\text{C} \rightarrow \text{Si} + 2\text{CO}$	689.94
7.- $\text{SiO}_2 + \text{CO} \rightarrow \text{SiC} + \frac{3}{2} \text{O}_2$	954.41
8.- $\text{SiO}_2 + \text{C} \rightarrow \text{SiC} + \text{O}_2$	843.91

El Cuadro 5 muestra la energía libre de Gibbs para cada una de las reacciones anteriores en rangos de temperatura de 298 a 1600 K.

Cuadro 5. Energía libre de Gibbs para el sistema silicio.

T, K	No. DE REACCIÓN				
	ΔG J/mol				
	1	2	3	4	5
298	516845.80	-64606.00	72490.50	329758.20	-855644.80
300	516139.96	-64589.97	72685.05	329780.01	-855279.97
400	480840.03	-63718.42	82496.39	330869.98	-836988.07
500	445800.57	-62729.96	92353.29	331924.16	-818697.03
600	411335.01	-61602.33	102176.83	332923.97	-800495.66
847	330029.63	-57948.24	126165.59	335158.72	-759805.44
900	298909.77	-62788.46	131256.69	335598.58	-750688.52
1000	263205.57	-62613.08	140808.83	336394.83	-733562.47
1200	192420.43	-62279.67	159711.26	337870.24	-699581.97
1500	87654.02	-61817.77	187604.24	339847.26	-649215.81
1600	53069.28	-61674.39	196790.89	340456.61	-632574.23

Cuadro 5. Energía libre de Gibbs para el sistema silicio (continuación).

T, K	No. DE REACCIÓN		
	ΔG J/mol		
	6	7	8
298	581451.80	928135.30	792608.40
300	580729.93	927965.02	790690.00
400	544558.45	919484.45	773269.64
500	508530.53	911050.33	755967.07
600	472937.33	902672.49	738893.33
847	387977.87	885971.03	698257.30
900	370424.26	881945.21	689895.99
1000	338051.21	874371.30	674522.22
1200	255640.10	859293.23	637302.30
1500	150411.79	836820.05	587398.04
1600	115683.67	829365.13	570899.84

La determinación de las ecuaciones de energía libre y entalpía para las reacciones de silicio se encuentran en el Anexo 2.

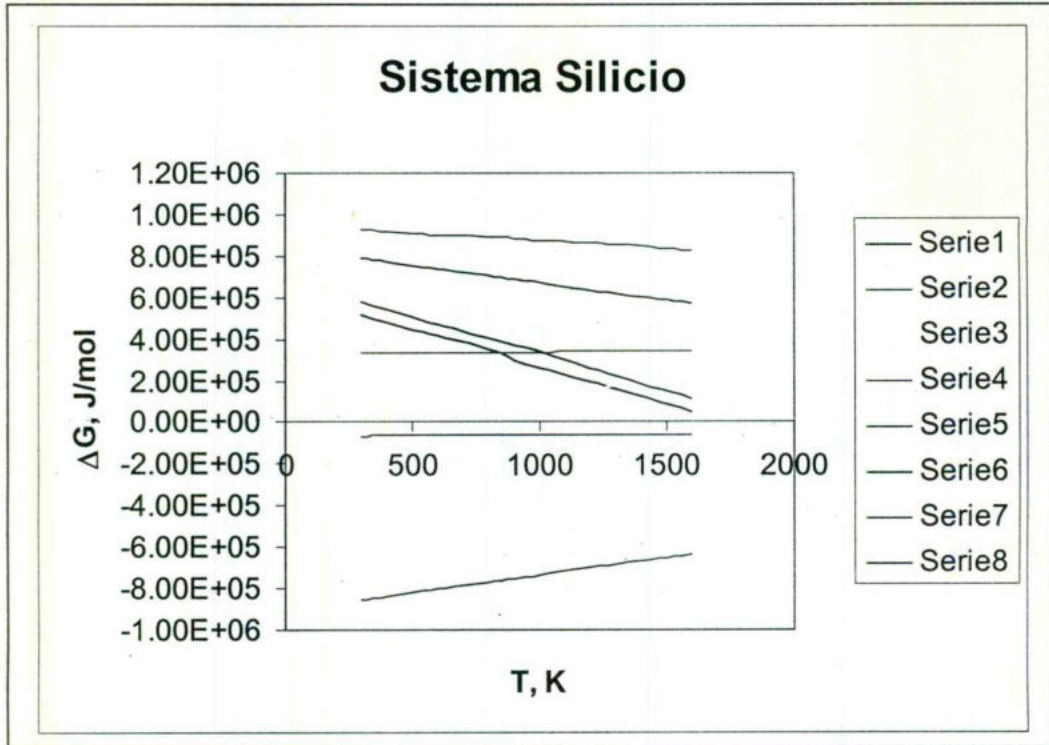


Figura 20. Diagrama de Ellingham para el sistema silicio

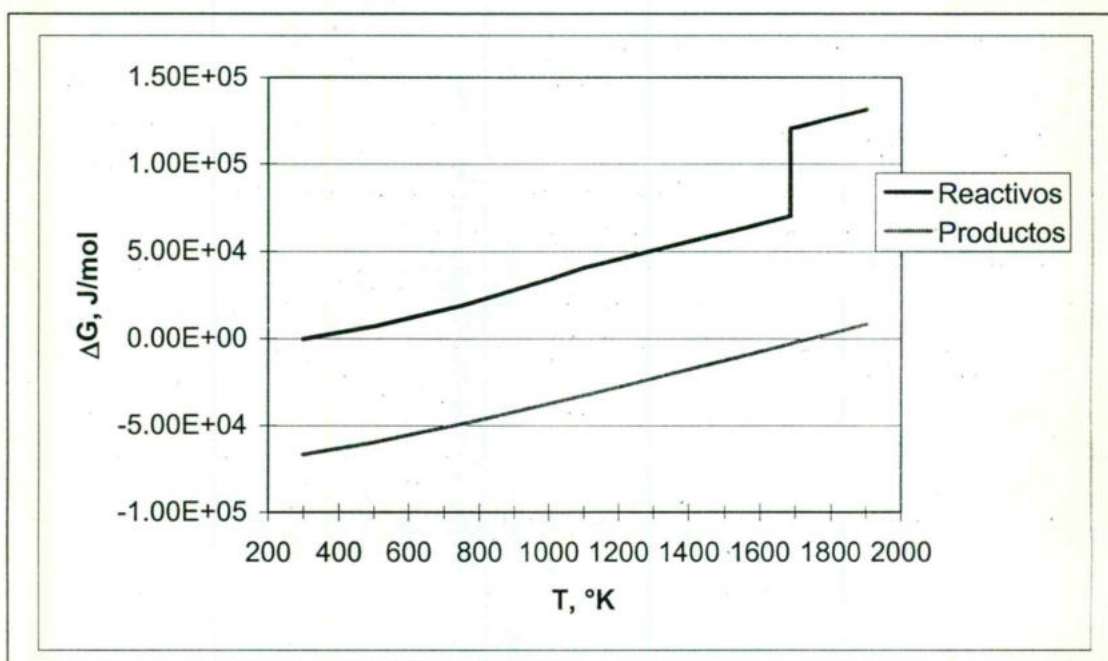


Figura 21. Temperatura adiabática para la formación del carburo de silicio.

Cuadro 6. Energía libre de Gibbs para el sistema hierro

T, K	ΔG , J/mol	
	FeSi	FeSi ₂
298	-78508.47	-70373.07
398	-78358.93	-67469.38
498	-78155.87	-64453.20
598	-77883.88	-61311.20
698	-77538.62	-58048.17
800	-77106.01	-54600.05
800	3.335E+16	3.74E+05
1000	2.174E+19	4.16E+05
1000	2.174E+19	4.38E+05
1042	2.630E+19	4.35E+05
1042	2.630E+19	5.52E+05
1060	2.825E+19	5.70E+05
1060	2.825E+19	2.38E+06
1184	4.171E+19	2.65E+06
1184	4.171E+19	2.68E+06
1665	9.391E+19	3.70E+06

La determinación de las ecuaciones de energía libre y entalpías para las reacciones del sistema hierro, se encuentran en el Anexo 2.

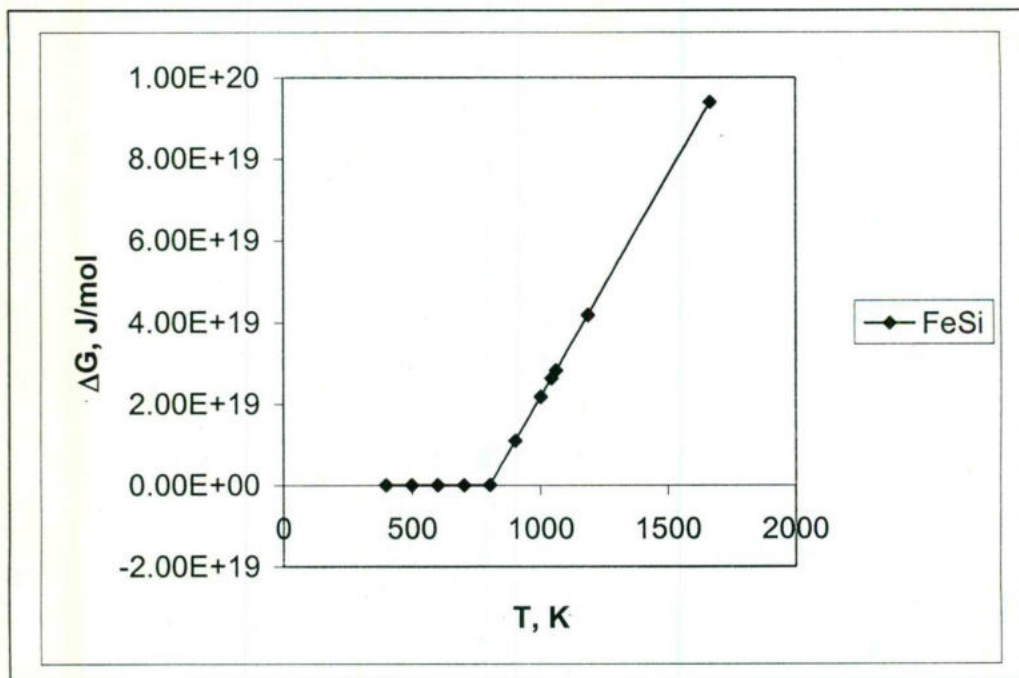


Figura 22. Representación gráfica del siliciuro de hierro

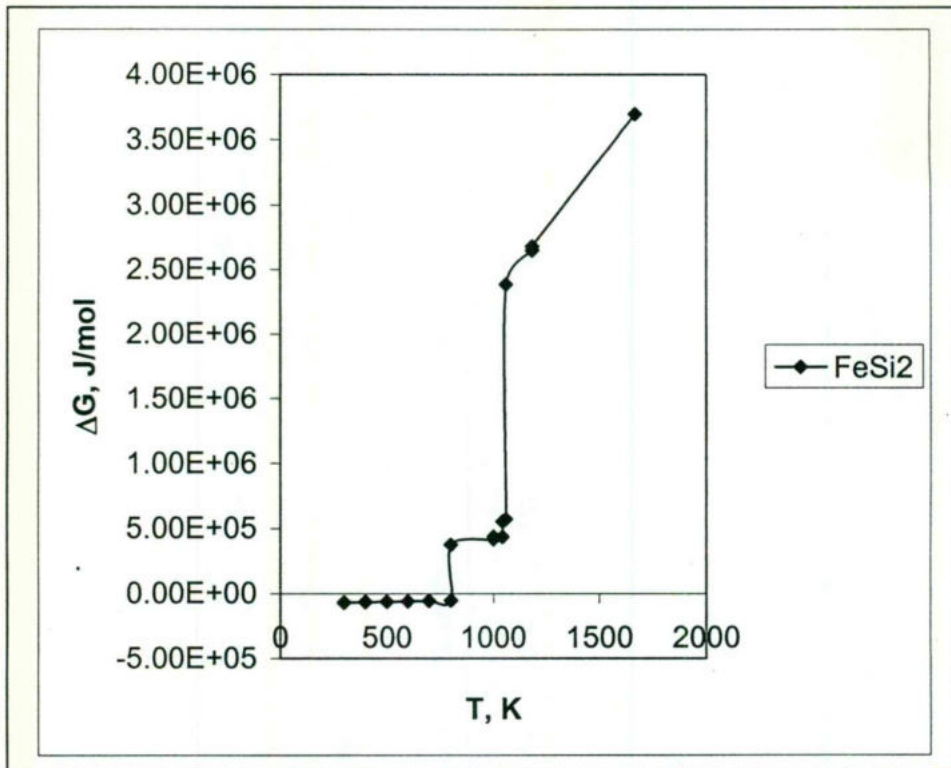


Figura 23. Representación gráfica del disiliciuro de hierro

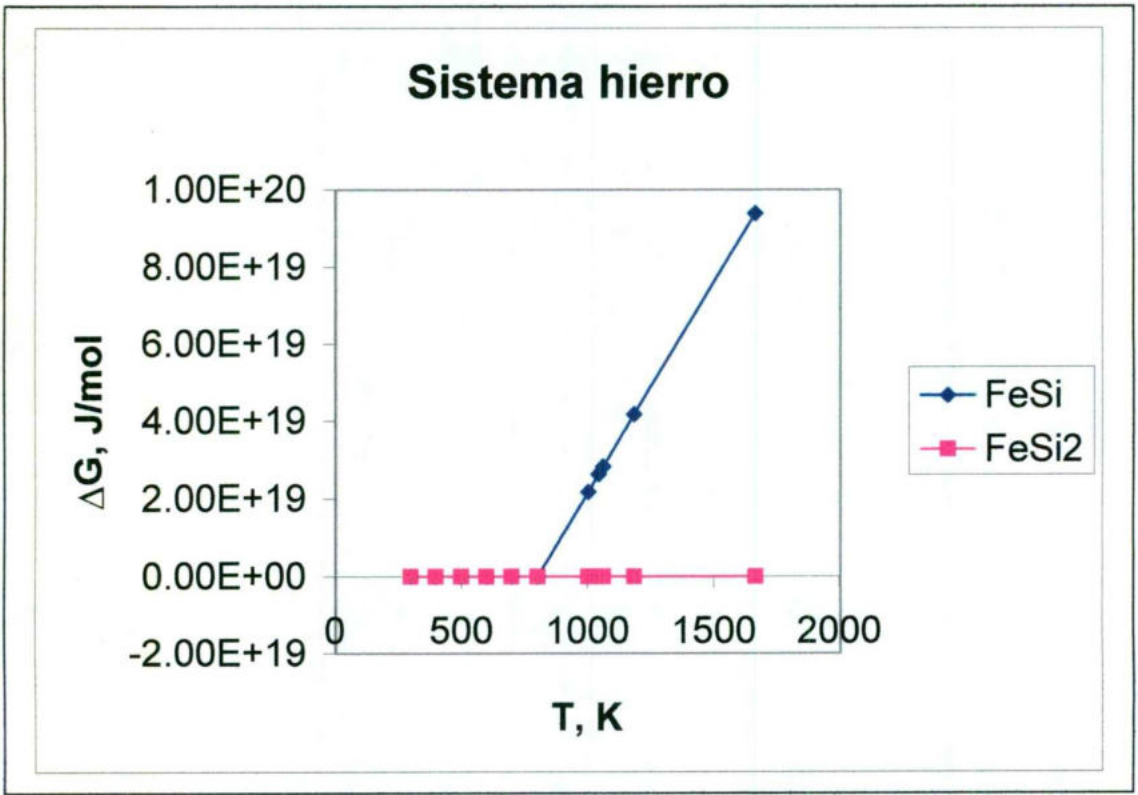


Figura 24. Representación gráfica del sistema hierro

5.2 Desgaste y fricción

Determinación del coeficiente de desgaste (K) para la muestra 1.

Cuadro 7. Resultados experimentales para la muestra 1.

lo	diam, mm	tp (min)	dp (m)	t (min)	w (g)	Dw, g	d (km)	K (mm ³ /Nm)
0.000	34.72	0	0	0	2.5523	0	0	0
-0.052	34.70	30	53962	30	2.5477	0.0046	53.962	8.451E-07
-0.052	34.68	30	53931	60	2.5450	0.0073	107.89	6.708E-07
-0.052	34.62	30	53837	90	2.5444	0.0079	161.73	4.843E-07
-0.051	34.60	60	107612	150	2.5392	0.0131	269.34	4.822E-07
-0.042	34.58	120	215100	270	2.5346	0.0177	484.44	3.622E-07

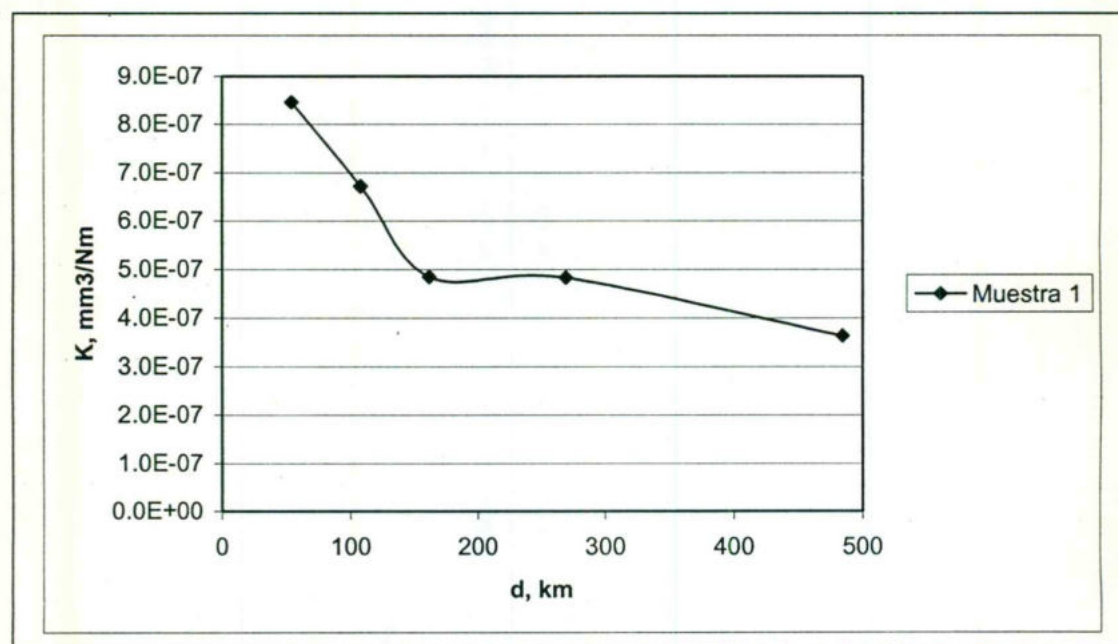


Figura 25. Curva del coeficiente desgaste para la muestra 1.

Determinación del coeficiente de desgaste (K) para el anillo de la muestra 1.

Cuadro 8. Resultados experimentales para el anillo de la muestra 1.

diam, mm	tp (min)	dp (m)	t (min)	w (g)	Ddiam, mm ²	d (km)	K (mm ³ /Nm)
34.72	0	0	0	1.9390	0	0	0
34.70	30	53962	30	1.9300	1.3884	54.0	3.257E-06
34.68	30	53931	60	1.9200	2.7760	107.9	3.257E-06
34.62	30	53837	90	1.9113	6.9340	161.7	5.428E-06
34.60	60	107612	150	1.8917	8.3184	269.3	3.910E-06
34.58	120	215100	270	1.8500	9.7020	484.4	2.535E-06

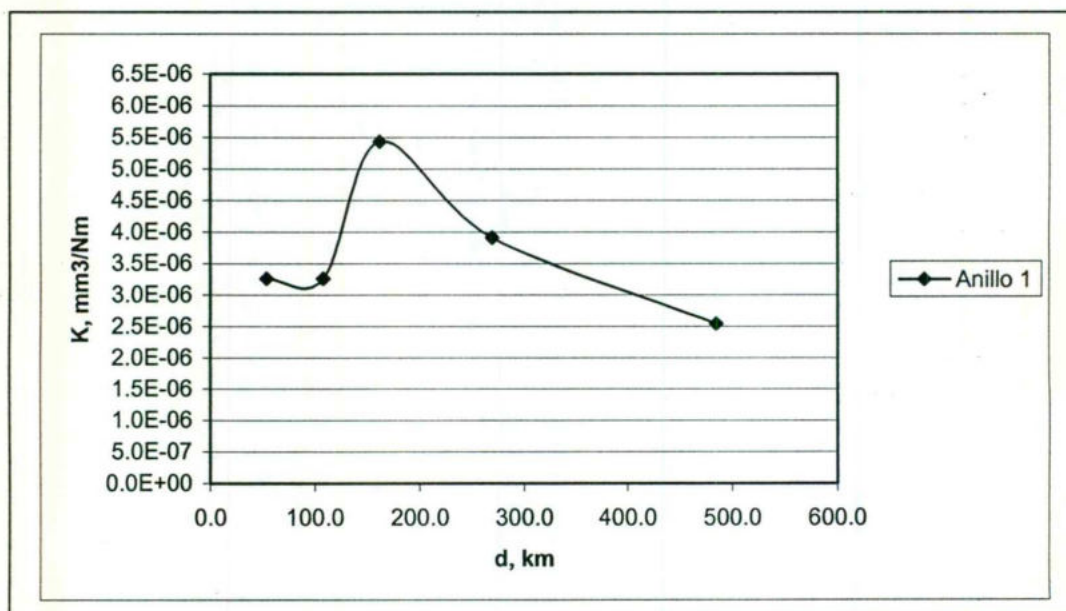
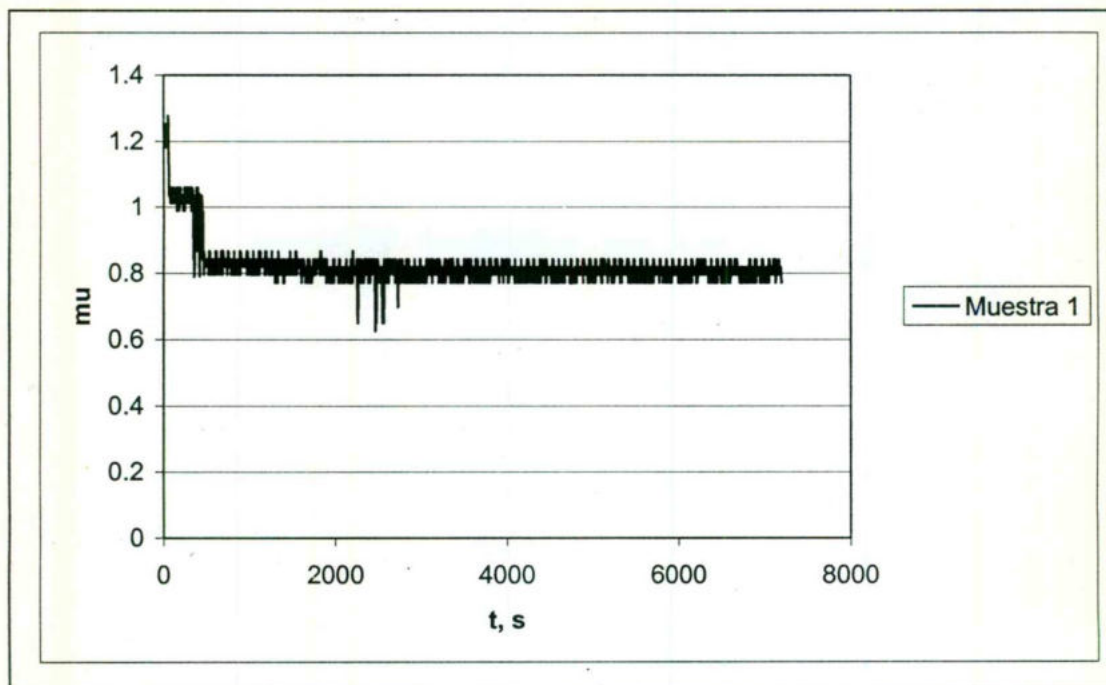


Figura 26. Curva del coeficiente desgaste para el anillo de la muestra 1.



Cuadro 27. Gráfica que muestra el comportamiento del coeficiente de fricción (μ) para la muestra 1 durante el último periodo de prueba (2h).

Determinación del coeficiente de desgaste (K) para la muestra 2.

Cuadro 9. Resultados experimentales para la muestra 2.

lo	diam, mm	tp (min)	dp (m)	t (min)	w (g)	Dw, g	d (km)	K (mm ³ /Nm)
0.000	34.20	0	0	0	2.5368	0	0	0
-0.046	34.00	30	52873	30	2.5340	0.0028	52.873	4.941E-07
-0.046	33.98	30	52842	60	2.5334	0.0034	105.72	3.001E-07
-0.046	33.96	30	52811	90	2.5324	0.0044	158.53	2.589E-07
-0.046	33.84	60	105249	150	2.5310	0.0058	263.77	2.051E-07
-0.046	33.80	120	210248	270	2.5292	0.0076	474.02	1.496E-07

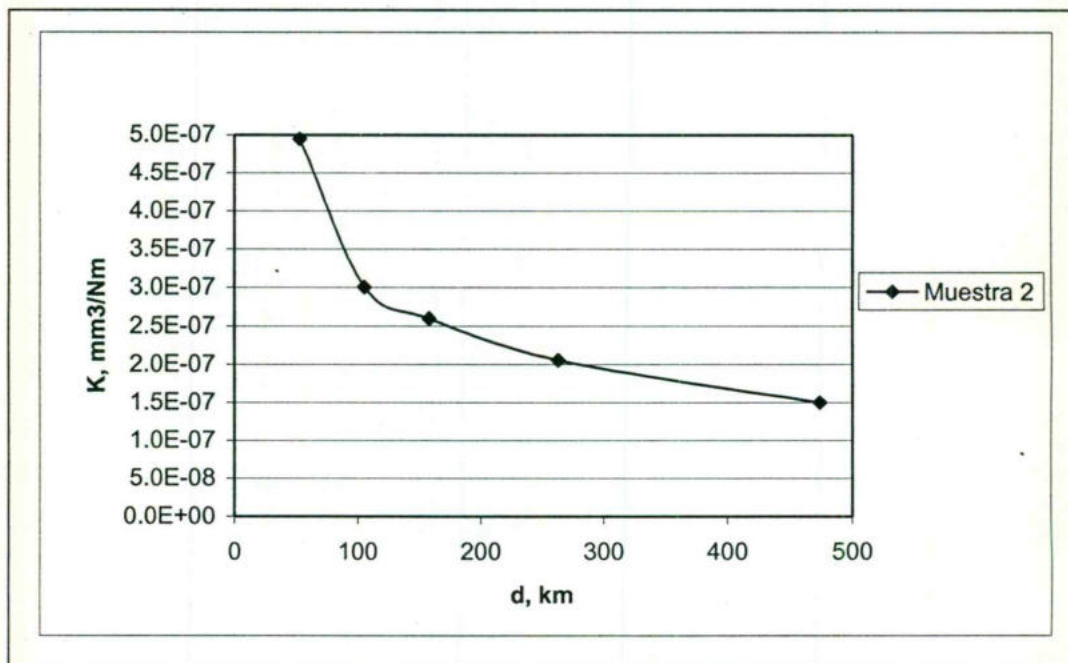


Figura 28. Curva del coeficiente desgaste para la muestra 2.

Determinación del coeficiente de desgaste (K) para el anillo de la muestra 2.

Cuadro 10. Resultados experimentales para el anillo de la muestra 2.

diam, mm	tp (min)	dp (m)	t (min)	w (g)	Ddiam, mm ²	d (km)	K (mm ³ /Nm)
34.20	0	0	0	1.9390	0	0	0
34.00	30	52873	30	1.9300	13.6400	52.9	3.303E-05
33.98	30	52842	60	1.9200	14.9996	105.7	1.817E-05
33.96	30	52811	90	1.9113	16.3584	158.5	1.321E-05
33.84	60	105249	150	1.8917	24.4944	263.8	1.189E-05
33.80	120	210248	270	1.8500	27.2000	474.0	7.348E-06

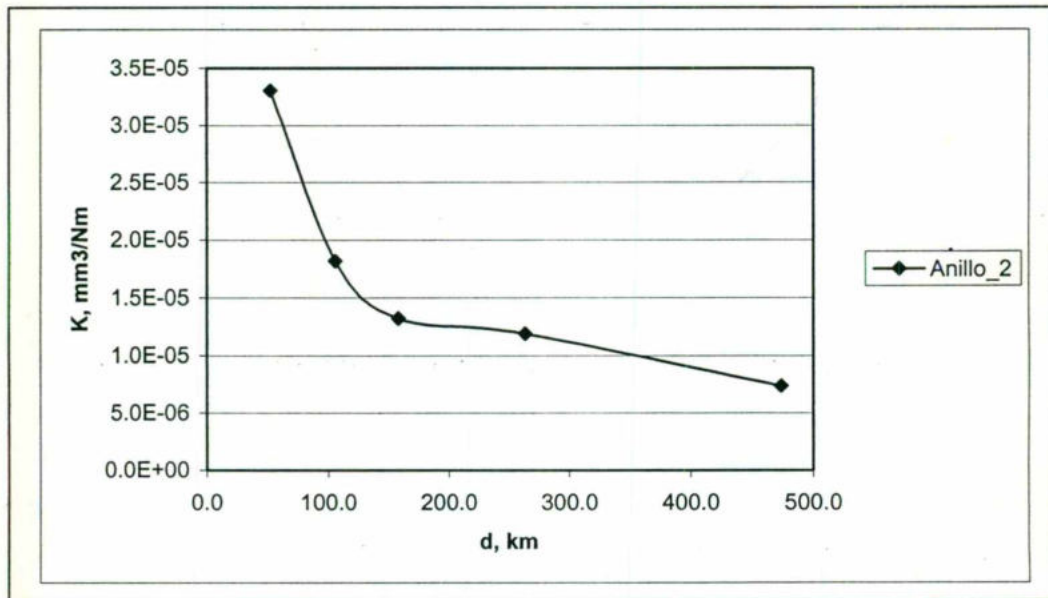


Figura 29. Curva del coeficiente desgaste para el anillo de la muestra 2.

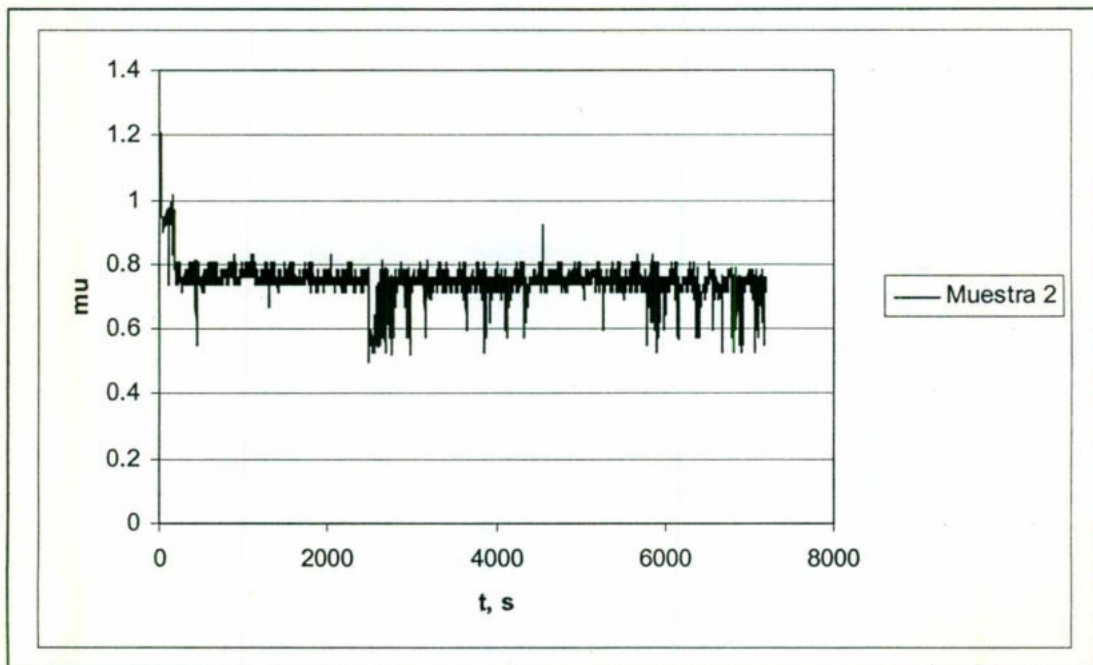


Figura 30. Gráfica que muestra el comportamiento del coeficiente de fricción (μ) para la muestra 2 durante el último periodo de prueba (2h).

Determinación del coeficiente de desgaste (K) para la muestra 3.

Cuadro 11. Resultados experimentales para la muestra 3.

lo	diam, mm	tp (min)	dp (m)	t (min)	w (g)	Dw, g	d (km)	K (mm ³ /Nm)
0.000	34.64	0	0	0	1.9300	0	0	0
-0.132	34.62	30	53837	30	1.9286	0.0014	53.8	1.937E-07
-0.132	34.58	30	53775	60	1.9282	0.0018	107.6	1.246E-07
-0.132	34.53	30	53697	90	1.9274	0.0026	161.3	1.201E-07
-0.132	34.48	60	107239	150	1.9259	0.0041	268.5	1.137E-07
-0.132	34.43	120	214167	270	1.9230	0.0070	482.7	1.080E-07

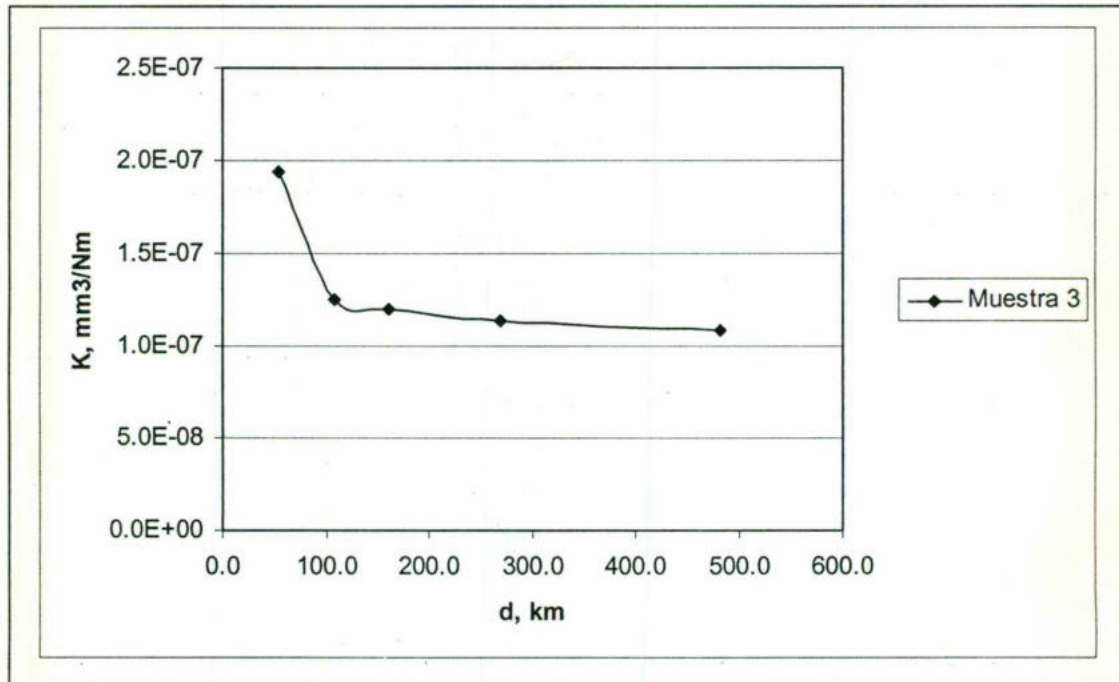


Figura 31. Curva del coeficiente desgaste para la muestra 3.

Determinación del coeficiente de desgaste (K) para el anillo de la muestra 3.

Cuadro 12. Resultados experimentales para el anillo de la muestra 3.

diam, mm	tp (min)	dp (m)	t (min)	w (g)	Ddiam, mm ²	d (km)	K (mm ³ /Nm)
34.64	0	0	0	1.9390	0	0	0
34.62	30	53837	30	1.9300	1.3852	53.8	3.257E-06
34.58	30	53775	60	1.9200	4.1532	107.6	4.885E-06
34.53	30	53697	90	1.9113	7.6087	161.3	5.970E-06
34.48	60	107239	150	1.8917	11.0592	268.5	5.213E-06
34.43	120	214167	270	1.8500	14.5047	482.7	3.803E-06

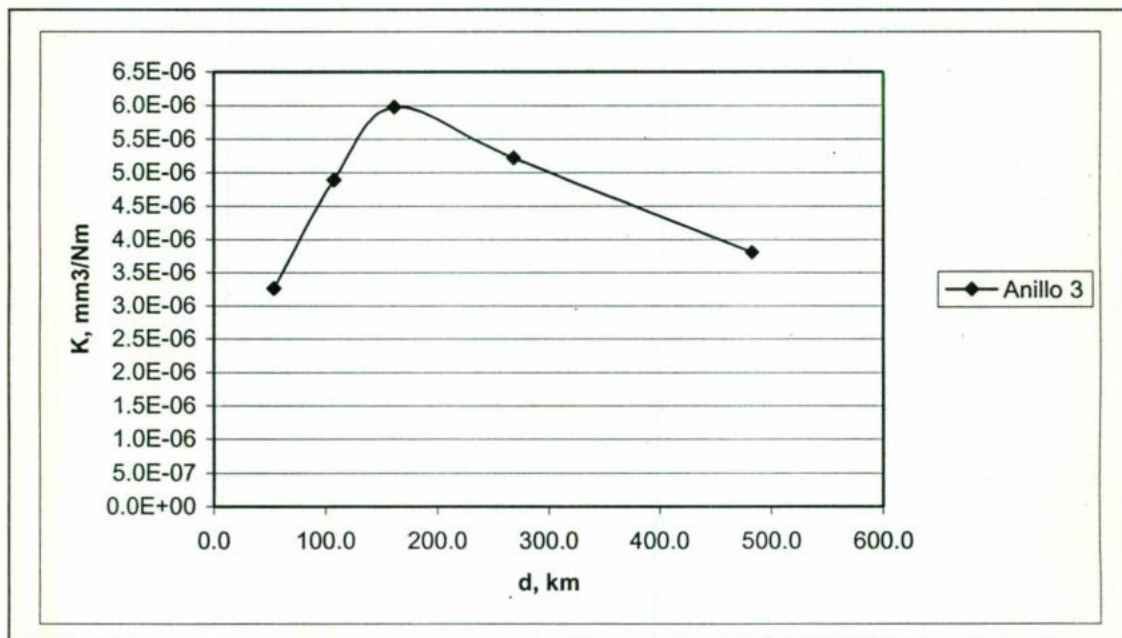


Figura 32. Curva del coeficiente desgaste para el anillo de la muestra 3.

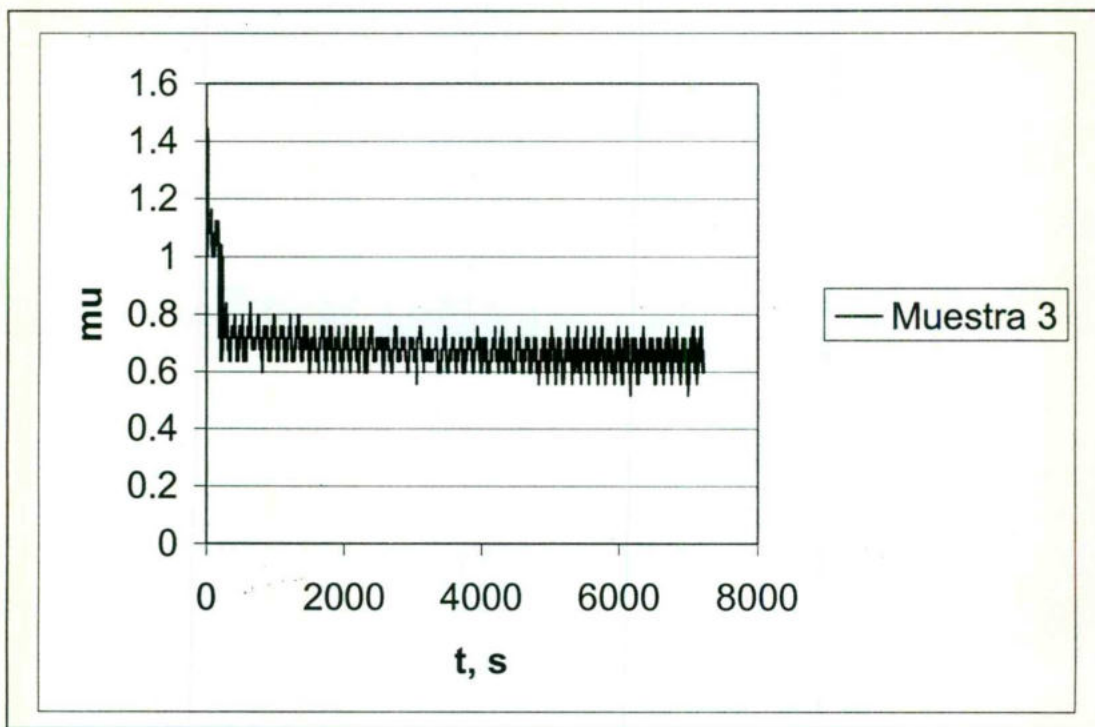


Figura 33. Gráfica que muestra el comportamiento del coeficiente de fricción (μ) para la muestra 3 durante el último periodo de prueba (2h).

Determinación del coeficiente de desgaste (K) para la muestra 4.

Cuadro 13. Resultados experimentales para la muestra 4.

lo	diam, mm	tp (min)	dp (m)	t (min)	w (g)	Dw, g	d (km)	K (mm ³ /Nm)
0.000	34.40	0	0	0	2.0740	0	0	0
-0.1529	34.36	30	53433	30	2.0731	0.0009	53.4	1.571E-07
-0.1529	34.22	30	53215	60	2.0727	0.0013	106.6	1.137E-07
-0.1529	34.18	30	53153	90	2.0725	0.0015	159.8	8.757E-08
-0.1529	34.14	60	106182	150	2.0722	0.0018	266.0	6.314E-08
-0.1529	34.08	120	211990	270	2.0718	0.0022	478.0	4.294E-08

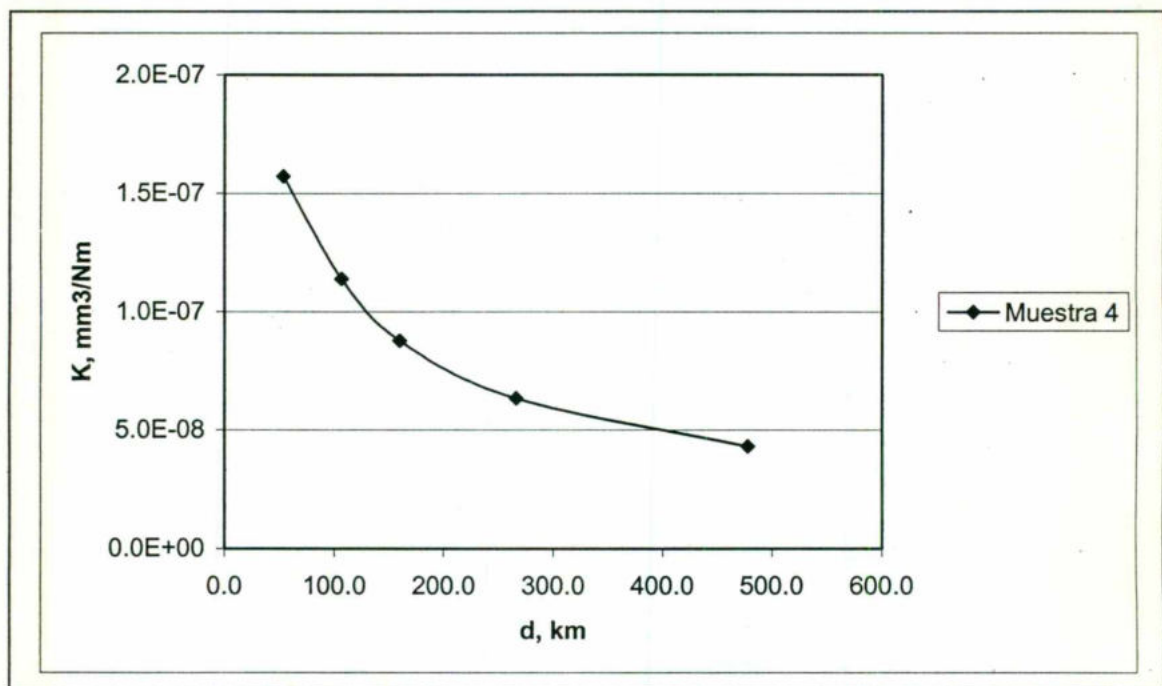


Figura 34. Curva del coeficiente desgaste para la muestra 4.

Determinación del coeficiente de desgaste (K) para el anillo de la muestra 4.

Cuadro 14. Resultados experimentales para el anillo de la muestra 4.

diam, mm	tp (min)	dp (m)	t (min)	w (g)	Ddiam, mm ²	d (km)	K (mm ³ /Nm)
34.40	0	0	0	1.9390	0	0	0
34.36	30	53433	30	1.9300	2.7504	53.4	6.517E-06
34.22	30	53215	60	1.9200	12.3516	106.6	1.466E-05
34.18	30	53153	90	1.9113	15.0876	159.8	1.195E-05
34.14	60	106182	150	1.8917	17.8204	266.0	8.483E-06
34.08	120	211990	270	1.8500	21.9136	478.0	5.805E-06

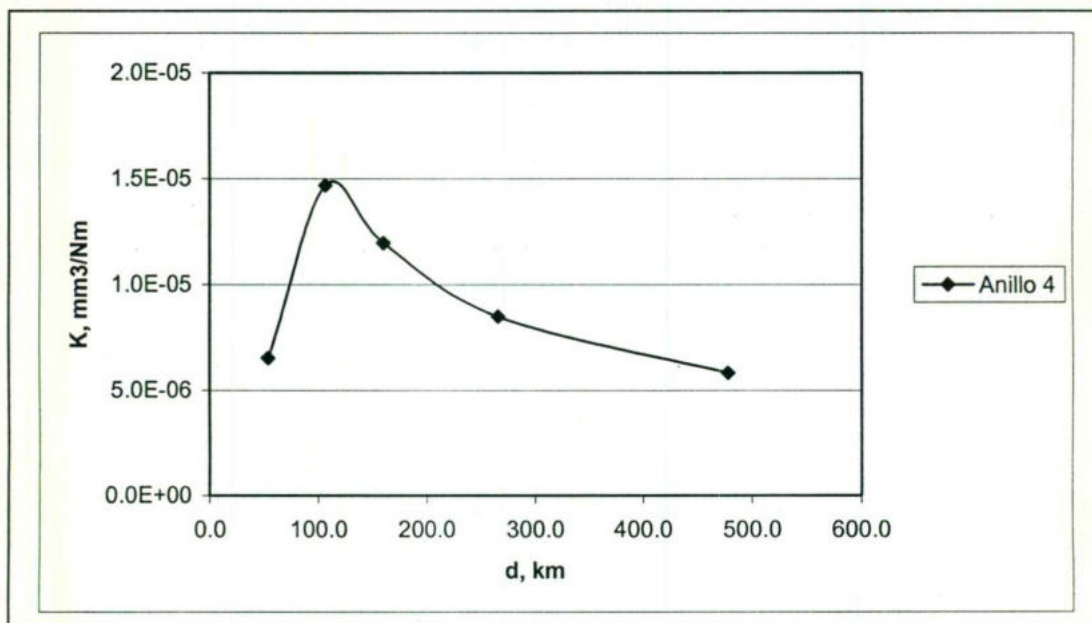


Figura 35. Curva del coeficiente desgaste para el anillo de la muestra 4.

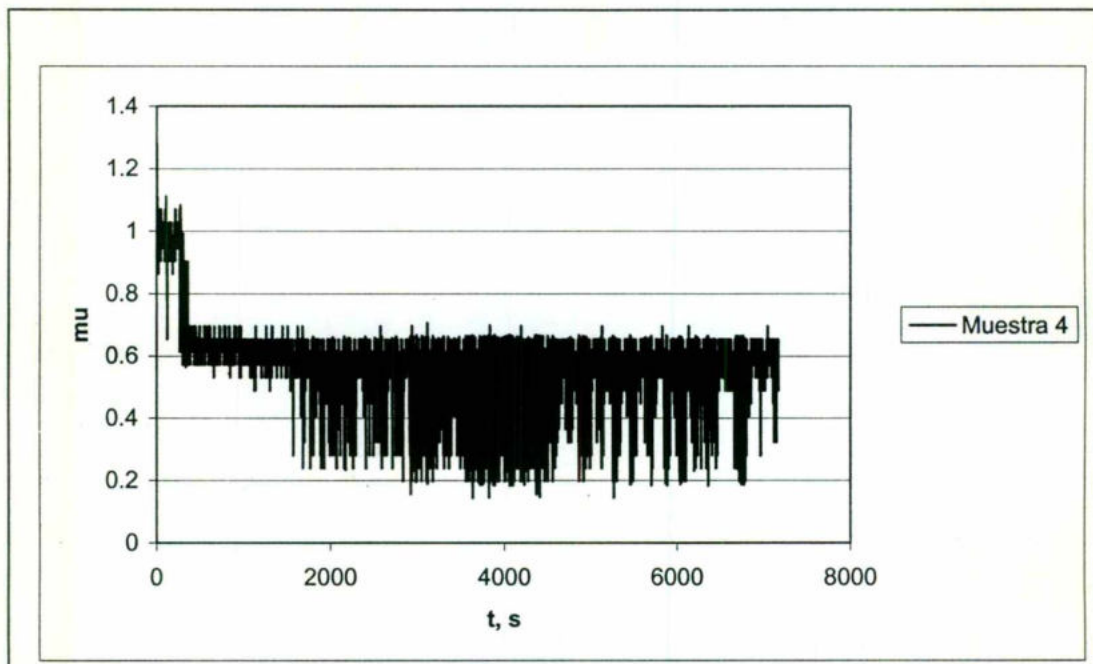


Figura 36. Gráfica que muestra el comportamiento del coeficiente de fricción (μ) para la muestra 4 durante el último periodo de prueba.

Determinación del coeficiente de desgaste (K) para la muestra 5.

Cuadro 15. Resultados experimentales para la muestra 5.

lo	diam, mm	tp (min)	dp (m)	t (min)	w (g)	Dw, g	d (km)	K (mm ³ /Nm)
0.000	34.92	0	0	0	1.9390	0	0	0
-0.089	34.88	30	54242	30	1.9300	0.0090	54.2	3.578E-06
-0.089	34.86	30	54211	60	1.9200	0.0190	108.5	3.778E-06
-0.089	34.84	30	54179	90	1.9113	0.0277	162.6	3.673E-06
-0.089	34.79	60	108203	150	1.8917	0.0473	270.8	3.766E-06
-0.089	34.72	120	215971	270	1.8500	0.0890	486.8	3.942E-06

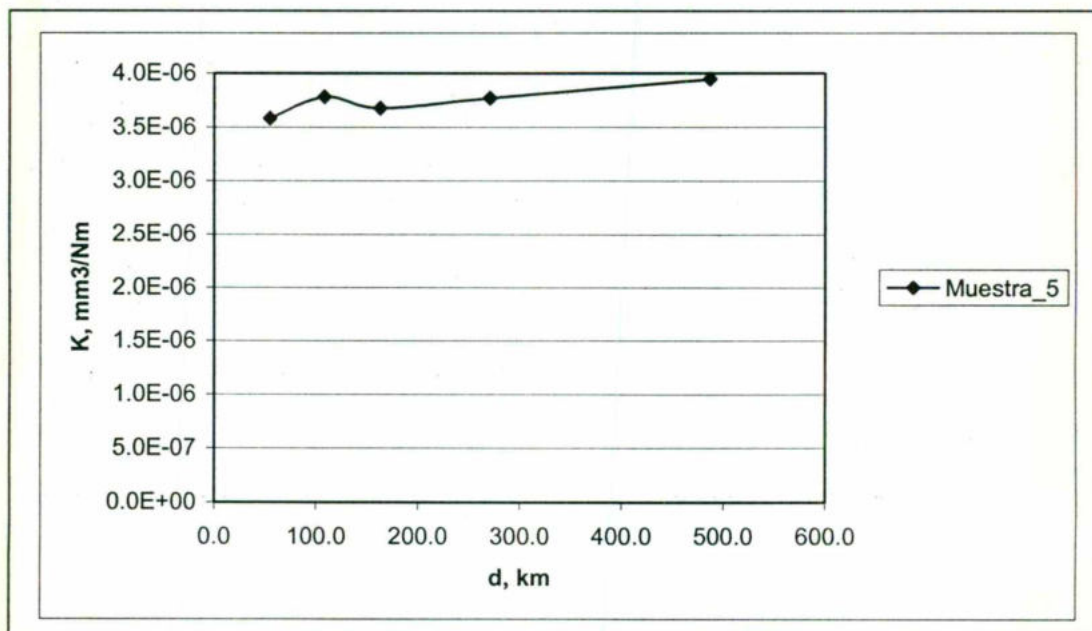


Figura 37. Curva del coeficiente desgaste para la muestra 5.

Determinación del coeficiente de desgaste (K) para el anillo de la muestra 5.

Cuadro 16. Resultados experimentales para el anillo de la muestra 5.

diam, mm	tp (min)	dp (m)	t (min)	w (g)	Ddiam, mm ²	d (km)	K (mm ³ /Nm)
34.92	0	0	0	1.9390	0	0	0
34.88	30	54242	30	1.9300	2.7920	54.2	6.287E-06
34.86	30	54211	60	1.9200	4.1868	108.5	4.715E-06
34.84	30	54179	90	1.9113	5.5808	162.6	4.192E-06
34.79	60	108203	150	1.8917	9.0623	270.8	4.087E-06
34.72	120	215971	270	1.8500	13.9280	486.8	3.495E-06

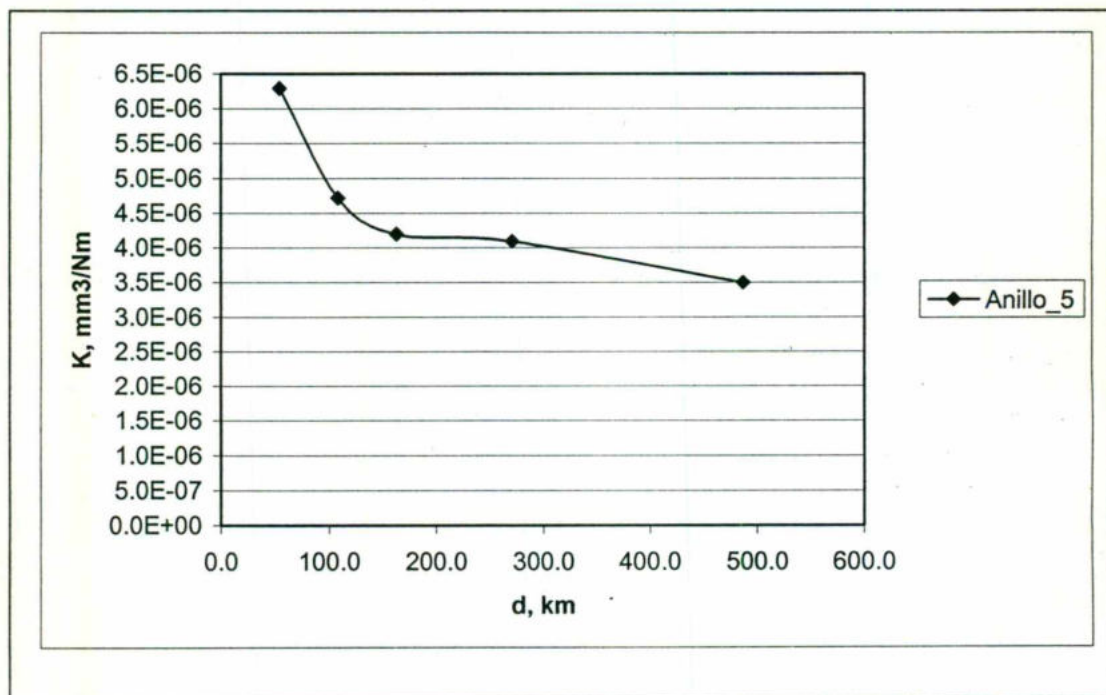


Figura 38. Curva del coeficiente desgaste para el anillo de la muestra 5.

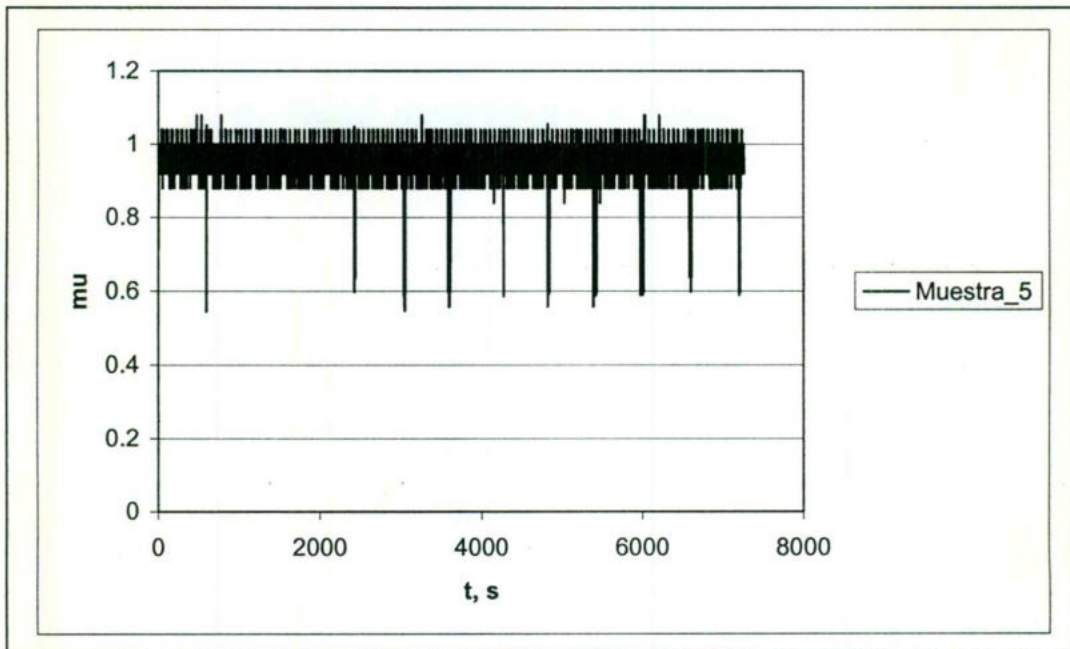


Figura 39. Gráfica que muestra el comportamiento del coeficiente de fricción (μ) para la balata durante el último periodo de prueba.

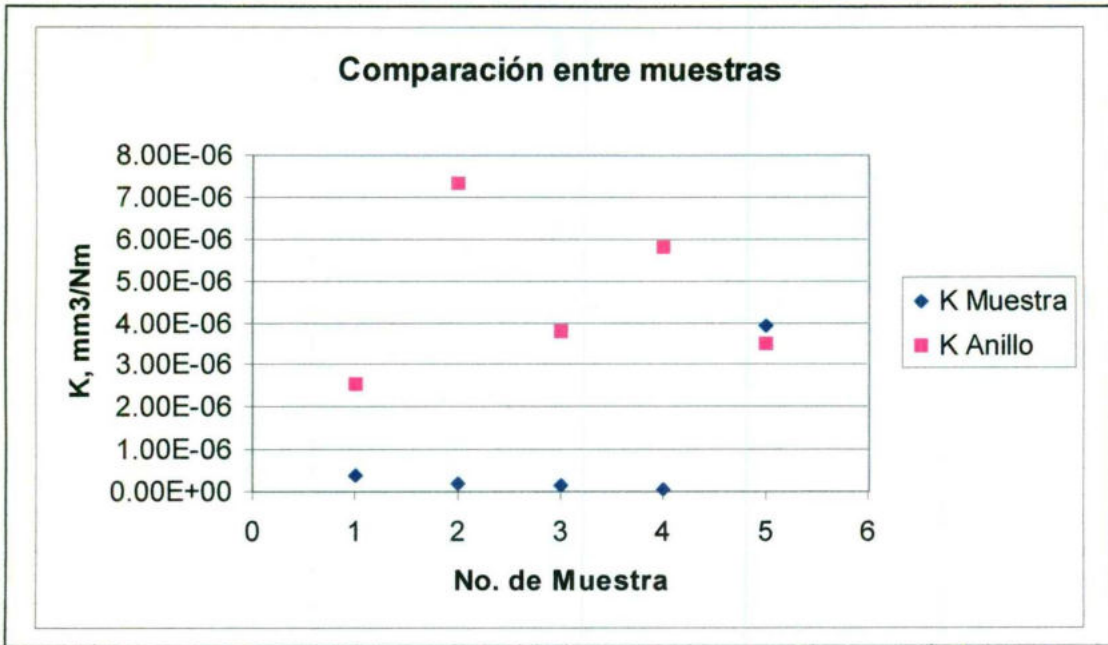


Figura 40. Gráfica comparativa de los coeficientes de desgaste al final de la prueba.

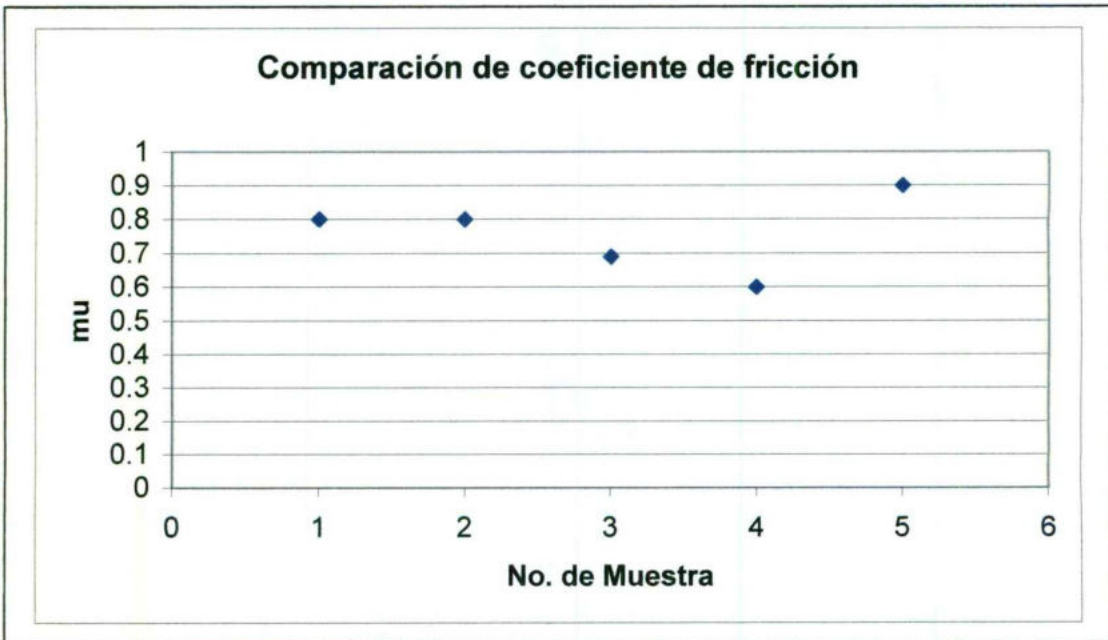


Figura 41. Gráfica comparativa de los coeficientes de fricción al final de la prueba.

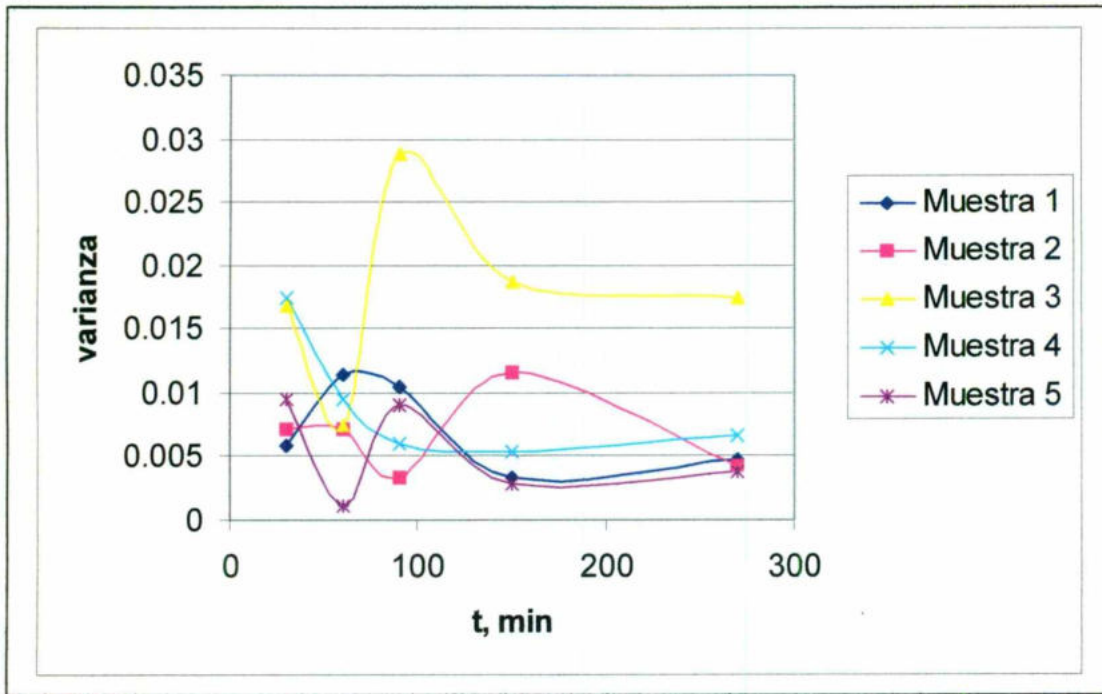


Figura 42. Gráfica de variabilidad del coeficiente de fricción durante la prueba.

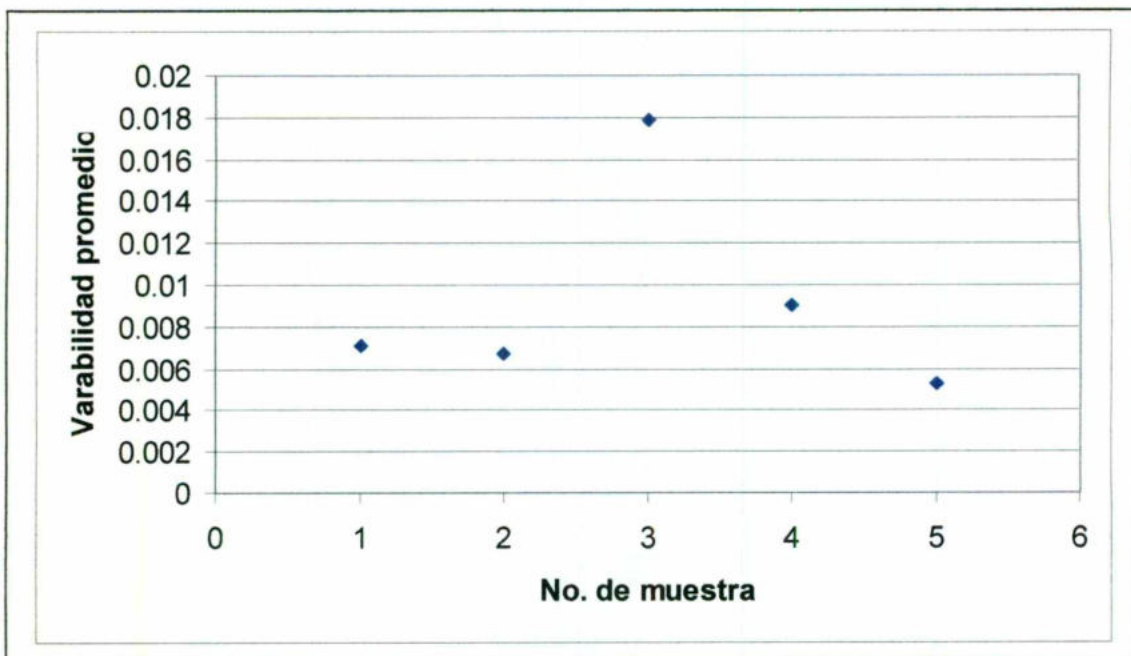


Figura 43. Variabilidad promedio del coeficiente de fricción para cada muestra.

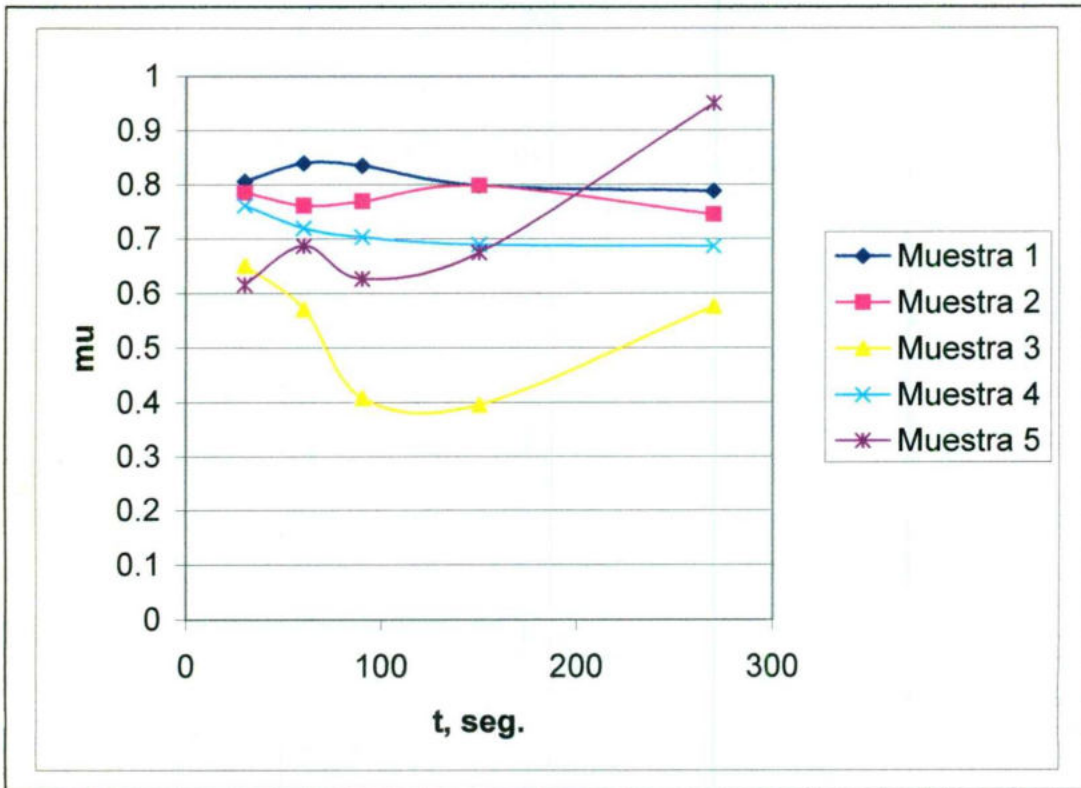


Figura 44. Comportamiento del coeficiente de fricción durante toda la prueba.

6. Discusión

6. 1. Discusión termodinámica

Del Cuadro 4, se puede observar que las reacciones que liberan calor son la ecuación dos y cinco, que representan la oxidación del silicio a SiO_2 y la carburización de éste, o sea que el calor que se genera de estas dos reacciones podrían en un momento llegar a auto sostener la reacción de síntesis.

En la Figura 19, para el sistema silicio se puede ver una oxidación espontánea y estable para el silicio. También muestra que la carburización de éste es más espontánea y estable con carbono y silicio puro que utilizando óxido de silicio. Así también queda descartada la posibilidad de carburización con gases como CO y CO_2 .

La temperatura adiabática de reacción para el SiC utilizando silicio puro y carbono se muestra en la Figura 20, evidenciando que es posible obtener este compuesto a una temperatura no mayor a 1800K en condiciones adiabáticas.

Las Figuras 22 y 23 muestran el comportamiento de la estabilidad de las fases de FeSi y FeSi_2 respectivamente, que unidas en la Figura 24, podemos decir que termodinámicamente es más estable el FeSi_2 por tener menor energía dentro del diagrama Ellingham, en comparación al FeSi que se encuentra por encima de la energía del primero.

6. 2. Discusión de desgaste y fricción

Con frecuencia existe una discrepancia aparente entre estudios teóricos y experimentales sobre la razón de desgaste, sobre todo en la aplicación de estos a las situaciones industriales. Por lo tanto es responsabilidad de quien usa los métodos de prueba como estándares establecidos aproximados o aplicados para la determinación de coeficientes de desgaste y fricción.

ASTM G77-98 Y SAE J661 son métodos de prueba aplicables a nivel laboratorio por lo tanto los resultados obtenidos deben ser tratados como tal.

Las curvas de desgaste tanto para las muestras como para los anillos muestran un comportamiento semejante al reportado por Rainer Gadow (Hutchings, 1992)

en su investigación de desgaste, el cual hace evidencia de un desgaste mayor al inicio de la prueba que posteriormente disminuye, el caso contrario para el material de contraparte que inicio con un desgaste menor que conforme transcurre la prueba éste se incrementa, esto a excepción del material de referencia el cual muestra una disminución en el desgaste del material de contraparte que puede verse reflejado en la Figura 40.

Basados en las graficas comparativas 40 y 41 de los coeficientes de desgaste y fricción para las muestras, podemos decir que bajo las condiciones de prueba utilizadas, las muestras sinterizadas por el método de SPS presentan menor desgaste que el material de referencia (muestra 5) llevándonos a comprobar que un material compuesto tiene mayor resistencia al desgaste que los materiales convencionales.

Los resultados muestran que la muestra 3 experimenta un desgaste menor que el que presenta la balata, un desgaste en el material de contraparte muy semejante al del material de referencia y un coeficiente de fricción de aproximadamente 0.7. Dicho en otras palabras ambos anillos presentan un desgaste muy parecido, sin embargo, la vida útil del compuesto se incrementa por encima del material de referencia bajo estas condiciones de prueba.

Las muestras 2 y 4 muestran una resistencia al desgaste superior al material de referencia, sin embargo, el desgaste observado por el anillo para ambos casos se encuentra por encima del desgaste del anillo de referencia, esto quiere decir que el coeficiente de fricción 0.8 y 0.69 respectivamente, se obtiene a expensas de la remoción de material, Para fines prácticos se podría extrapolar que el disco de freno se desgastaría más que el material consumible.

Por otra parte es evidente que para la muestra 1, el coeficiente de desgaste es por mucho, inferior al desgaste de la muestra de referencia y el desgaste del anillo también se encuentra por debajo de este. Luego entonces, tanto el compuesto como el anillo presentan un menor desgaste bajo estas condiciones pronosticando una vida útil mayor que los materiales convencionales, con un coeficiente de fricción de 0.8 bajo estas condiciones.

De la Figura 42 podemos observar la variación del coeficiente de fricción durante cada prueba, de ellas la muestra 4 muestra un comportamiento muy estable, ya que primero comienza con un coeficiente de variación elevado en comparación con el material de referencia pero sigue durante la prueba con una tendencia a disminuir mostrando un comportamiento constante.

En las muestras 1, 2 y 5, comienzan con una variación baja, que posteriormente se incrementa y finalmente tiende a disminuir, sin embargo, podemos decir que este comportamiento se debe a la etapa de asentamiento debido a los cambios que sufre la muestra hasta obtener una superficie estable.

Tomando un promedio de las lecturas de variación del coeficiente de fricción (Figura 43) las muestras 1, 2, 4 y 5 presentan un coeficiente de fricción estable en comparación con la muestra 3, y una similitud de estabilidad entre ellas.

La Figura 44 muestra el comportamiento del coeficiente de fricción durante toda la prueba, evidenciando un comportamiento constante para las muestras 1, 2 y 4 cuyo coeficiente se mantiene constante para toda la prueba y mostrando también que el material de referencia necesita mayor tiempo para alcanzar una estabilidad y aumentar su capacidad de fricción.

7. Conclusiones

- La presencia de oxígeno en el sistema, interviene negativamente de tal forma que obstruye la formación del SiC, debido a que este reacciona muy espontáneamente con el silicio para formar óxido de silicio el cual tiene una estabilidad muy fuerte e impide obtener el carburo a partir de este compuesto.
- La formación del SiC se recomienda partiendo de silicio puro y carbono, por su estabilidad y espontaneidad, además de que en condiciones adiabáticas es posible obtener este compuesto por debajo de 1800K.
- La presencia de FeSi_2 en las muestras sinterizadas por el Dr. Zahair A. Munir, hacen evidencia que la termodinámica puede guiar la experimentación hacia lo que podemos obtener dentro de un sistema.
- El Compósito sinterizado por el Dr. Zahair es por mucho un material que ofrece muchísimas ventajas, los resultados obtenidos muestran la evidente superioridad que representa su aplicación, si bien no se alcanzó el mismo coeficiente de desgaste que la balata, si se obtuvo un resultado por más favorable (0.8), los resultados de desgaste tanto para el anillo como para la muestra 1, y puede incluirse la muestra 3 indican un menor desgaste, mayor estabilidad y por lo tanto una vida útil mayor para ambas partes.
- Una composición química con mayor cantidad de carburo de silicio, aumenta el coeficiente de fricción, y no afecta la vida útil del material de contaparte.
- Un material compuesto da mayor seguridad, en los valores obtenidos de las pruebas realizadas muestran que el comportamiento de los coeficientes de fricción se mantienen constantes y estables durante las pruebas dando la seguridad de que su propiedad de fricción permanecerá constante durante toda su vida.

- Finalmente las lecturas de temperatura tomadas no muestran que este pueda ser un factor importante dentro de la aplicación del material, debido a que tanto los compósitos como la muestra de referencia mostraron temperaturas muy cercanas entre sí (170 a 180°C en promedio).
- Con este punto dan por concluidos los objetivos de este trabajo, no sin antes mencionar como recomendación que los estudios termodinámicos pueden ser complementados con cálculos de cinética para evaluar el tiempo en que tarda en reaccionar todo el sistema, también la evaluación cuantitativa de los compuestos y elementos involucrados, para el análisis completo de balance de materia y energía.
- Los estudios en cuanto a la aplicación de este material son muy extensos y se pueden completar con pruebas mecánicas que serán tema de investigación posteriormente.

8. Bibliografía

Archard, J. 1999. Contac and rubbing of flat surperfaces. J. Appr. Phys: 24: 981.

Atkins, P. 1986. Tablas de datos. En: Fisicoquímica. Ed. Iberoamericana. Printed: 953-956.

ASTM G77-98. 1998. Wear using block-on-ring test. En: Standard test method for ranking resistance of materials to sliding: 1-14.

Citak, R. Rogers, K. and Sandhage, K. 1999. "Low-temperature synthesis of $BaAl_2O_4$ /Aluminium bearing composites by the oxidation of solid metal-bearing precursors", J. Amer. Ceram. Soc: 82: 237-240.

Dan, P. 2001. "Materiales prensados en caliente", División de materiales.
<http://www.ansto>

Fort, M. 2002. "Cuales son compuestos", Asociación de fabricantes de materiales compuestos.
<http://www.cfa-hg.org/composites.shtml>

Gaskell, R.1982. Reactions involving pure condensed phases. En: Metallurgical Thermodynamics. Ed. Addison. Washington: 261-315.

Gwidon, W. And Grazyna, B. 1994. Wear behaviour of ceramic cutting-tools. Key Eng. Mat: 96:137-164.

Hallen, J. Balmori, H. Balmori, D. Estrada; J. Gonzáles, J. And Manzano, A. 1997. Influence of Mg and stirring on the strenght of an aluminium matriz composites obtained by compocasting, Key Eng. Mat: 495-502.

Harvey, E. 1965. Fricción y formas aerodinámicas. En: Física moderna universitaria. Ed: UTEA, México: 82-86.

Himmelblau, D. 1995. Balances de energía. En: Principios y cálculos básicos de la ingeniería Química. Ed. CECSA, México: 388-465.

Hutchings, I. 1992. Sliding Wear. En: Tribology. Ed. Edward Arnold. London: 77-122.

Jennings, R. 2002 "Escuela de Ingeniería de Materiales", Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
<http://www.unsa.edu.pe/afisicas/ing.materiales/serviciosim.html>

John, D. 1998. Propiedades Termodinámicas. En: Lange Manual de Química. Ed. McGrawHill, México: 104-109.

Juárez, A. 2002. "Curso de ingeniería de materiales", Ciateq.
<http://ciateq.mx/~ajuarez/p7/P7-1.HTM>

Kobaschewski, O. 1994. Appendix. En: Materials Thermochemistry, Ed. Pergamon Press. EU: 2003-2014.

Manual Técnico. 2002. "Frenos ceramicos", El rincón del porschista.
http://leo.worldonline.es/jaumeopor/español/técnica/fre_cer.htm

Maron, S. And Prutton, C. 1973. Primera ley de la termodinámica. En: Fundamentos de fisicoquímica. Ed. Limusa, México: 109-141.

Maron, S. And Prutton, C. 1973. Termoquímica. En: Fundamentos de fisicoquímica. Ed. Limusa, México: 143-147.

McHague, C. 2000, "Pan American Advanced Studies Institute – PA ASI", Universidad Federal de Rio de Janeiro, Brasil.

<http://www.notimat.coppe.ufrj.br/br/anteriores/espanhol/22/noticia.html>

Munir, Z. Maglia, F. Tamburini, U. Spinolo, G. 2000. Zirconia-based metaestable solid solutions through self-propagating high-temperature sintesis: Síntesis, characterization, and mechanistic investigations. J. Amer. Ceram. Soc: 83: 1935-1941.

Ordóñez, S.Rojas, P. Bustos, O. Martínez, V. 2002. "Tenacidad a la fractura de cerámicas basadas en el nitruro de silicio", Universidad de Santiago de Chile.

<http://www.cchen.cl/nucleotécnica/itm3.html>

Perry, R. 1992. Capacidades caloríficas de los elementos y compuestos inorgánicos. En: Manual del ingeniero químico. Ed. McGraw-Hill. Mexico: 159-166.

Refrac, S. 2002 "Presionar en caliente y vacío", Vinculación de difusión.

<http://www.refrac.com>

Richerson, D. 1992. Modern Ceramic Engineering, Marcel Dekker Inc. USA: 110-2000.

Rodríguez, D. 1999. Construcción de equipo para alta densificación de polvos metálicos y cerámicos usando sinterizado por plasma-chispa. Centro de investigación de materiales avanzados. Pre-propuesta.

SAE J661. 1997, Land, sea, air and space, surface vehiclerecommended practice, brake, Lining quality test procedure. En: The engineering society for advancing mobility: 1-9.

Sarkar, A. 1977. Teoría Molecular de Fricción y Desgaste. En: Desgaste de Metales. Ed. Limusa, México: 71-110.

Shin, D. Park, S. Choa, Y. and Nihara, K. 1999. Silicon/silicon carbide composites fabricated by infiltration of a silicon melt into charcoal, *J. Amer. Ceram. Soc.*: 82: 3251-3253.

Shon, J. And Munir, A. 1998. Syntesis of TiC and TiC-Cu composites and TiC-Cu funcionally grades materials by electrothermal combustion. *J. Amer. Ceram. Soc.*: 81: 3243-3249

Schmidt, A. 1962. Appendix. En: Material and balances. Ed. Prentice-hall, New York: 309-407.

Smith, W. 1993. Introducción a la Ciencia e ingeniería de materiales. En: Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. Ed. McGraw Hill, España: 1-14

Smith, W. 1993. Materiales Compuestos. En: Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. Ed. McGraw Hill, España: 848-860.

Takeuchi, T. Tabuchi, M. Kondonh, I. Tamari, N. and Kageyama, H. 2000. Synthesis of dense lead titanate ceramics with sumicrometer grains by spark plasma sintering. *J. Amer. Ceram. Soc.*: 83: 541-544

Tomanari, T. Mitsuharu, T. Hiroyoki K.1999. Preparation of dense BaTiO₃ Ceramics with sumicrometer grains by spark plasma sintering. *J. Am. Ceram. Soc.*: 82: 939-943.

Upadhyaya, G. And Dube, R. 1979. Fugacidad, actividad y constante de equilibrio. En: problemas de termodinámica y cinética en metalurgia. Ed. Géminis. Buenos Aires: 75-95.

Wells, T. 2002. "Freno con disco de carbono", contenidos.
<http://www.contenidos.com/fisica/f1/frenos.htm>

William, E. And Mark, R. 1994. Property control by processing. En: Ceramic Microstructures. Ed. Chapman Hall: Sheffield: 551-558.

Xia, T. Munir, Z. Tang, Y. Zhao, W. Wang, T. 2000. Structure in Combustión síntesis of Al_2O_3 -TiC composites. J. Am. Ceram. Soc: 83:507-512

ANEXO 1

DATOS TEMODINÁMICOS

	Cp J/(mol K)				DH°	DG°	S°	RANGO	REF
	A	B	C	D	KJ/mol	KJ/mol	J/mol K	KELVIN, K	
C	-	-	-	-	0	0	5,6940	-	1
A	-	-	-	-	0	0	5,6940	-	2
R	11,191	1,095E-02	-4,890E+05	-	0	-	-	273-1373	3
B	-	-	-	-	0	0	5,7400	-	4
O	17,200	4,270E-03	-8,790E+05	-	0	0	5,6940	298-2300	5
N	24,430	4,400E-04	-3,163E+06	-	0	-	5,7000	1100-	5
O	0,110	3,894E-02	-1,480E+05	1,738E-05	0	-	5,7000	298-1100	6

	-	-	-	-	0	0	27,2979	-	1
F	17,291	2,671E-02	-	-	0	-	-	273-1041	2
I	25,623	1,410E-02	-	-	-	-	-	1041-1179	2
E	35,169	-	-	-	-	-	-	1179-1674	2
R	-	-	-	-	0	0	27,2800	-	3
R	-	-	-	-	-	-	-	-	4
O	28,180	-7,320E-03	-2,900E+05	2,504E-05	-	-	27,3000	298-800	5
	-263,450	2,558E-01	6,192E+07	-	-	-	27,3000	800-1000	5
	-641,910	6,963E-01	-	-	-	-	27,3000	1000-1042	5
	1946,250	-1,788E+00	-	-	-	-	27,3000	1042-1060	5
	-561,950	3,341E-01	2,912E+08	-	-	-	27,3000	1060-1184	5
	23,990	8,360E-03	-	-	-	-	27,3000	1184-1665	5
	12,728	3,174E-02	2,512E+05	-	-	-	-	298-1033	6
	46,599	0,000E+00	0,000E+00	-	-	-	-	1033-1183	6
	24,283	8,290E-03	0,000E+00	-	-	-	-	1183-1673	6

	-	-	-	-	0	0	18,8406	-	1
Si	24,032	2,583E-03	-4,229E+05	-	-	-	-	273-1174	2
	-	-	-	-	0	0	18,83	-	3
	-	-	-	-	0	-	19	-	4
	23,930	2,220E-03	-4,140E+05	-	0	-	18,8	298-1685	5

FeSi	-	-	-	-	-73,6877	-73,6877	46,0548	-	1
	44,129	1,918E-02	-	-	-	-	-	273-903	2
	38,238	2,244E-02	2,680E+04	-2,093E-07	-78,9212	-	44,7150	298-1683	5

FeSi2	-	-	-	-	-81,2239	-78,2932	55,6844	-	1
	55,442	2,922E-02	5,024E+03	0,000E+00	-81,2239	-	55,6844	298-900	5

SiC	-	-	-	-	-73,2690	-70,7569	16,6216	-	1
	37,221	1,218E-02	-1,189E+06	-	-	-	-	273-1629	2
	42,590	8,370E-03	-1,661E+06	-1,260E-06	-66,9900	-	16,5000	298-	5

DATOS TEMODINÁMICOS (continuación)

	Cp J/(mol K)				DH°	DG°	S°	RANGO	REF
	A	B	C	D	KJ/mol	KJ/mol	J/mol K	KELVIN, K	
SiO2	-	-	-	-	-911,5501	-857,247	41,868		1
	45,5105	4,E-02	-1,E+06	-	-	-	-	273-848	2
	45,8455	2,E-02	-	-	-	-	-	848-1873	2
	-	-	-	-	-910,94	-856,64	41,84		3
	43,39	4,E-02	-1,E+06	-	-910,9	-	41,5	298-847	5
	58,91	1,E-02	-	-	-	-	-	847-	5
	46,9756	3,E-01	-1,E+06	-	-	-	-	298-848	6
	60,3318	8,E-03	0,E+00	-	-	-	-	840-2000	6

CO	-	-	-	-	-110,6153	-137,3689	198,0356	-	1
	27,6328	5,E-03	-	-	-	-	-	298-2000	2
	-	-	-	-	-110,53	-137,17	197,67	-	3
	28,41	4,E-03	-5,E+04	-	-110,5	-	197,5	-	5
	28,4283	4,E-04	-5,E-04	-	-110,61	-	-	298-2500	6

CO2	-	-	-	-	-393,7685	-394,6478	213,8199	-	1
	43,2915	1,E-02	-8,E+05	-	-	-	-	273-2500	2
	-	-	-	-	-393,51	-394,36	213,74	-	3
	44,14	9,E-03	-9,E+05	-	-393,5	-	213,7	298-	5
	44,2545	9,E-03	-9,E+05	-	-393,76	-	-	298-2500	6

O2	-	-	-	-	0	0	205,1658	-	1
	34,6248	1,E-03	-8,E+05	-	-	-	-	-	2
	-	-	-	-	0	0	205,138	-	3

FeO	-	-	-	-	-266,4479	-245,3046	57,5266	-	1
	52,8374	6,E-03	-3,E+05	-	-	-	-	273-1173	2
	48,79	8,E-03	-2,E+07	-	-263	-	60,1	298-	5
	48,818	8,E-03	-3,E+05	-	266,67	-	-	298-1650	6

- 1.- John, D. 1998
- 2.- Perry, R. 1992
- 3.- Atkins, P. 1986
- 4.- Gaskell, R. 1982
- 5.- Kobaschewski, O. 1994
- 6.- Schmidt, A. 1962

Los cálculos fueron realizados con la bibliografía 5.

ANEXO 2

SISTEMA HIERRO DE 289 A 800K

	a	b	c	d	D	DCx
Δ_a	1					
Δ_b		1				
Δ_c			1			
Δ_d				1		
Δ_D					1	
Prod-React						
						-13.872
						7.34E-03
						9.72E-05
						-4.59E-05
						298-800
						-78.9212
						-1.385
						K ₁ /Jmol

$\Delta G = \Delta H - T \Delta S = -78508.47$ J/mol PARA T=298K

ECUACION PARA C_p

$$\Delta C_p = -13.872 + 7.34E-03 T + 9.72E-05 T^2 - 4.59E-05 T^3$$

DETERMINACIÓN DE ΔH

$d(\Delta H)/dT = \Delta C_p = -13.872 + 7.34E-03 T + 9.72E-05 T^2 - 4.59E-05 T^3$

$\Delta H = C_1 + -13.872 T + 3.67E-03 T^2 + -9.72E+05 T^3 - 1.53E-05 T^4$

SI $\Delta H = -78.9212$ Y T=298

$$-78921.2 = C_1 - 7474.67$$

$$-78921.2 = -71446.53 = C_1$$

ECUACION GENERAL PARA ΔH

$$\Delta H = -71447 + -13.872 T + 3.67E-03 T^2 + -9.72E+05 T^3 - 1.53E-05 T^4$$

DETERMINACIÓN DE ΔG

$d(\Delta G)/dT = -\Delta H/T^2 = 71446.53/T^2 + 13.872/T + -3.67E-03 + 9.72E+05 T^3 + 1.531E-05 T^4$

$\Delta G/T = C_2 + -71446.53/T + 13.872 \ln T + -3.67E-03 T + -4.86E+05 T^2 + 7.655E-06 T^3$

SI $\Delta G/T = -263.4512416$

$$-263.451242 = C_2 + -166.6106$$

$$-263.451242 = -96.840668 = C_2$$

ECUACION GENERAL PARA ΔG

$$\Delta G = -96.84 + -71446.53/T + 13.872 \ln T + -3.67E-03 T^2 + -4.86E+05 T^3 + 7.655E-06 T^4$$

SISTEMA HIERRO DE 800 A 1000K

	a		b		B		c		C		d		D		DCx	
	1	Fe	1	Si	1	Si	1	FeSi	1	FeSi	1	0	0	0	Prod-Resac	
Δa		-263.45		23.93		38.738		0		0					277.758	
Δb		2.55E-01		2.22E-03		2.24E-02		0.00E+00		0.00E+00					-2.35E-01	
Δc		6.19E+07		-4.14E+05		2.66E+04		0.00E+00		0.00E+00					-6.1479200	
Δd		0.00E+00		0.00E+00		0.00E+00		-2.09E-07		0.00E+00					-2.09E-07	
Rango de temperatura		800-1000		298-1883		298-1883		-78.9212		800-1000					-78.9212	K, J/mol
ΔH^0		0		0		0		44.715		0					1.365	J/mol
ΔS^0		27.3		18.8		18.8				0						

PARA T=298K

ECUACION PARA Cp $\Delta Cp = 277.758 \cdot T + -2.35E-01 \cdot T^2 + -6.15E+07 \cdot T^{-2} + -2.09E-07 \cdot T^2$

DETERMINACION DE ΔH

$d(\Delta H)/dT = \Delta Cp =$	277.758	+	-2.35E-01	T	+	-6.15E+07	T ⁻²	+	-2.09E-07	T ²
$\Delta H =$	C1	+	277.758	T	+	-1.17E-01	T ⁻¹	+	-6.15E-07	T ³

Si $\Delta H^0 = -78.9212$ Y T=298

ΔH^0	-78.9212	+	278651.3764	C1
ΔH	-78.9212	+	-357572.5764	C1

ECUACION GENERAL PARA ΔH

$\Delta H = -357573 \cdot T + 277.758 \cdot T^2 + -1.17E-01 \cdot T^{-1} + -6.15E-07 \cdot T^3 + -6.97667E-08 \cdot T^3$

DETERMINACION DE ΔG

$d(\Delta G)/dT = -\Delta H/T =$	-357572.5764	1/T ²	+	277.758	1/T	+	-1.17E-01	T	+	-6.1479200	T ³		
$\Delta G/T =$	C2	+	-357572.5764	1/T	+	277.758	ln T	+	-1.17E-01	T	+	-3.46033E-08	T ²

Si $\Delta G/T = -263.4512416$

$\Delta G =$	-263.4512416	+	-2401.184875	C2
ΔG	-263.4512416	+	21.37733934	C2

ECUACION GENERAL PARA ΔG

$\Delta G = -263.773 \cdot T + -357572.5764 \cdot T^{-1} + 277.758 \cdot \ln T + -1.17E-01 \cdot T^2 + -3.46033E-08 \cdot T^2$

SISTEMA HIERRO DE 1000 A 1042K

	A		B		C		D		DC*	
	a	b	Si	Fe	c	d	e	f	Prod	Reac
Δh	-641.91	23.93	2.22E+03	38.238	0	0	0	0	656.218	-6.76E+01
Δc_p	6.96E+01	2.22E+03	4.14E+05	2.68E+04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-6.76E+01	44.9900
Δs	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	2.98E-07	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-2.09E+07	1000.1042
Rango de temperatura										
Δh^*	0	0	0	-78.9212	0	0	0	0	-78.9212	KJ/mol
Δs^*	27.3	18.8	0	44.715	0	0	0	0	-1.385	J/mol

$\Delta G = \Delta h + T \Delta S = -78506.47$ J/mol PARA T=298K

ECUACION PARA Cp

$$\Delta Cp = 656.218 + -6.76E-01 T + 4.41E+05 T^{-2} + -2.09E-07 T^2$$

DETERMINACION DE ΔH

$\Delta h_{ref} = \Delta Cp =$	656.218	+	-6.76E-01	T	+	440800	T ²	+	-2.09E-07	T ²
Δh^*	C1	+	656.218	T	+	-3.36E-01	T ²	+	4.41E+05	1/T
Si Δh^*	-78.9212	Y T=298								
	-78921.2	=	164066.94							
	-78921.2	=	-242987.14							
		=	164066.94							
		=	C1							

ECUACION GENERAL PARA ΔH

$$\Delta h^* = -242987.14 + 656.218 T + 3.36E-01 T^2 + 4.41E+05 1/T + 6.97667E-08 T^3$$

DETERMINACION DE ΔG

$\Delta G_{ref} = \Delta h_{ref} - T \Delta S_{ref} =$	-242987.14	1/T	+	656.218	1/T	+	440800	T ²	+	-6.97667E-08	T ²	
ΔG^*	C2	+	-242987.14	1/T	+	656.218	ln T	+	-3.36E-01	T	+	220400
Si ΔG^*	-263.451242											
	-263.451242	=	-4455.71593									
	-263.451242	=	4192.26469									
		=	C2									

ECUACION GENERAL PARA ΔG

$$\Delta G^* = 4192.26 T + -242987.14 + 656.218 \ln T - 3.36E-01 T + 220400 1/T + 3.48833E-08 T^2$$

SISTEMA HIERRO DE 1042 A 1060K

	a	b	B	c	C	d	D	DCx
ΔG°	1945.25	23.93	23.93	38.238	0	0	0	-1931.942
ΔH°	-1.79E+00	2.22E+03	2.22E+03	2.24E+02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.81E+00
ΔS°	0.00E+00	-4.14E+05	-4.14E+05	2.68E+04	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	440800
ΔG°	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-2.09E-07	298	0	0	-2.09E-07
Rango de temperatura	1042-1060	298-1685	298-1685	-78.9212	1042-1060	0	0	1042-1060
ΔH°	0	0	0	-78.9212	-78.9212	0	0	-78.9212
ΔS°	27.3	18.8	18.8	44.715	44.715	0	0	-1.365

$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T \Delta S^\circ$ PARA T=298K

Ecuación para Cp: $\Delta Cp = -1931.942 + 1.81E+00 T + 4.41E+05 T^2 + -2.09E-07 T^2$

DETERMINACIÓN DE ΔH°

$\Delta H_{TOT} = \Delta Cp = -1931.942 + 1.81E+00 T + 440800 T^2 + -2.09E-07 T^2$

$\Delta H^\circ = C1 + -1931.942 T + 9.04E+01 T^2 + 4.41E+05 T^3 + -6.9767E-06 T^4$

Si $\Delta H^\circ = -78.9212$ Y T=298

$-78921.2 = C1 + -1931.942(298) + 9.04E+01(298)^2 + 4.41E+05(298)^3 + -6.9767E-06(298)^4$

$-78921.2 = C1 + -56911.172$

$C1 = 417969.972$

Ecuación general para ΔH°

$\Delta H^\circ = 417990 + -1931.942 T + 9.04E+01 T^2 + 4.41E+05 T^3 + -6.9767E-06 T^4$

DETERMINACIÓN DE ΔS°

$\Delta S_{TOT} = \Delta Cp = 417969.972 + 1.72 T + -1931.942 T^2 + 9.04E+01 T^3 + -6.9767E-06 T^4$

$\Delta S^\circ = C2 + 417969.972 + 1.72 T + -1931.942 T^2 + 9.04E+01 T^3 + -6.9767E-06 T^4$

Si $\Delta S^\circ = -263.451242$

$-263.451242 = C2 + 417969.972 + 1.72(2015) + -1931.942(2015)^2 + 9.04E+01(2015)^3 + -6.9767E-06(2015)^4$

$-263.451242 = C2 + 12137.2015 + -12400.6528$

$C2 = 12137.2015$

Ecuación general para ΔS°

$\Delta S^\circ = -12400.65 + 417969.972 T + 1.72 T^2 + -1931.942 T^3 + 9.04E+01 T^4 + -6.9767E-06 T^5$

SISTEMA HIERRO DE 1060 A 1185K

Δ_a	a	A	+	b	B	=	c	C	+	d	D	DCx
	1	Fe		1	Si		1	FeSi		0		Prod/Reac
		-561.95			23.93			36.238				576.258
		3.34E+01			2.22E-03			2.24E-02				-3.14E-01
		2.91E+08			-4.14E+05			2.68E+04				-290759200
		0.00E+00			0.00E+00			-2.09E-07				-2.09E-07
		1060.1184			298.1685			298.1683				1060.1184
		0			0			-78.9212				-78.9212
		27.3			18.8			44.715				-1.365
												J/mol

PARA T=298K

Ecuación para Cp: $576.258 + -3.14E-01 T + -2.91E+08 T^2 + -2.09E-07 T^3$

DETERMINACIÓN DE ΔH

$\Delta H_{T=298} = 576.258 + -3.14E-01 T + -2.91E+08 T^2 + -2.09E-07 T^3$

$\Delta H_{T=1060} = 576.258 + -3.14E-01 (1060) + -2.91E+08 (1060)^2 + -2.09E-07 (1060)^3$

$\Delta H_{T=1185} = 576.258 + -3.14E-01 (1185) + -2.91E+08 (1185)^2 + -2.09E-07 (1185)^3$

Si $\Delta H_{T=298} = -78.9212$ Y $T=298$

$-78.9212 = 576.258 + -3.14E-01 (298) + -2.91E+08 (298)^2 + -2.09E-07 (298)^3$

$-78.9212 - 576.258 - (-3.14E-01 (298) - 2.91E+08 (298)^2 - 2.09E-07 (298)^3) = C1$

Ecuación general para ΔH

$\Delta H = -1212409 + 576.258 T + -1.57E-01 T^2 + -2.91E+08 1/T + -6.9767E-08 T^3$

DETERMINACIÓN DE ΔG

$\Delta G_{T=1060} = -1212409.35 + 576.258 (1060) - 1.57E-01 (1060)^2 - 145379600 (1/1060) - 6.9767E-08 (1060)^3$

$\Delta G_{T=1185} = -1212409.35 + 576.258 (1185) - 1.57E-01 (1185)^2 - 145379600 (1/1185) - 6.9767E-08 (1185)^3$

Si $\Delta G_{T=1060} = -263.451242$

$-263.451242 = -1212409.35 + 576.258 (1060) - 1.57E-01 (1060)^2 - 145379600 (1/1060) - 6.9767E-08 (1060)^3$

$-263.451242 - (-1212409.35 + 576.258 (1060) - 1.57E-01 (1060)^2 - 145379600 (1/1060) - 6.9767E-08 (1060)^3) = C2$

$-263.451242 - (-1212409.35 + 576.258 (1060) - 1.57E-01 (1060)^2 - 145379600 (1/1060) - 6.9767E-08 (1060)^3) = 5404.17708 = C2$

Ecuación general para ΔG

$\Delta G = -5404.18 + 576.258 T + 5404.17708 1/T - 1.57E-01 T^2 - 145379600 1/T^2 - 3.4883E-08 T^3$



SISTEMA HIERRO DE 1185 A 1665K

	a	b	c	d	D	DC*
Δ _a	23.99				0	-9.662
Δ _b	9.39E-03				0.00E+00	1.18E-02
Δ _c	0.00E+00				0.00E+00	4.40800
Δ _d	1.184-1665				0.00E+00	-2.09E-07
Δ _e	27.3				0	1184-1665
Δ _f					0	-78.9212
Δ _g					0	-1.365

ΔG = ΔH - TΔS = -78508.47 J/mol PARA T = 298K

ECUACIÓN PARA Cp ΔCp = -9.662 + 1.18E-02 T + 4.41E+05 T-2 + -2.09E-07 T2

DETERMINACIÓN DE ΔH

ΔH₁₁₈₅ - ΔCp = 9.662 + 1.18E-02 T + 4.40800 T-2 + -2.09E-07 T-2

ΔH = C1 + -9.662 T + 5.97E-03 T2 + 4.41E+05 1/T + -6.97667E-08 T3

Si ΔH = -78.9212 Y T = 298
 -78921.2 = C1 + -3641.00125
 -78921.2 = -3641.00125 + C1

ECUACIÓN GENERAL PARA ΔH ΔH = -75080.1988 T + 5.92E-03 T2 + 4.41E+05 1/T + -6.97667E-08 T3

DETERMINACIÓN DE ΔG

ΔG₁₁₈₅ = -ΔH₁₁₈₅ + ΔCp T = -75080.1988 1/T2 + 9.662 + 4.40800 T3 + -6.97667E-08 T

ΔG₁₆₆₅ = C2 + -201.0291589 = -52.420827 = C2

Si ΔG₁₆₆₅ = -263.451242
 -263.451242 = C2 + -201.029159
 -263.451242 = -201.0291589 + -62.420827 = C2

ECUACIÓN GENERAL PARA ΔS ΔS = -62.42 + -75080.1988 T + 5.92E-03 T2 + 220400 1/T + -3.4883E-08 T3

SISTEMA HIERRO DE 298 A 800K

a	A	+	b	B	=	c	C	+	d	D	DCx
1	Fe	28.18	2	Si		1	FeS ₂		0		Prod-Reac
$\Delta_f H^\circ$	-7.32E-03		2.22E-03	55.442			2.92E-02		0.00E+00		-20.596
$\Delta_c H^\circ$	-2.90E+05		-4.14E+05	5.02E-03			0.00E+00		0.00E+00		3.21E-02
$\Delta_d H^\circ$	2.50E-05		0.00E+00	0.00E+00			298.1683		0.00E+00		11.8000.01
Rango de temperatura	298-800		298-1685	-78.9212			44.715		0		-2.50E-05
ΔH°	0		0	-78.9212					0		298.800
ΔS°	18.8		27.3						0		-78.9212
ΔG°	-70373.07	J/mol							0		.26.685
											J/mol

PARA T=298K

Ecuación para Cp: $5C_0 = -20.598 T + 3.21E-02 T^2 + 1.12E+06 T^{-2} + -2.50E-05 T^2$

DETERMINACIÓN DE ΔH

$\Delta_f H^\circ_{Fe} + 2\Delta_f H^\circ_{Si} + \Delta_c H^\circ = \Delta_f H^\circ_{FeS_2} + \Delta_d H^\circ$
 $-78921.2 + 2(-70236.7395) + (-8685.46045) = -78921.2 + \Delta_d H^\circ$
 $\Delta_d H^\circ = -8685.46045$

Si $\Delta H^\circ = -78.9212$ Y T=298
 $-78921.2 = C_1$
 $-8685.46045 = -70236.7395 + C_1$

Ecuación general para ΔH

$\Delta H^\circ = -70236.7395 T + 3.21E-02 T^2 + 1.12E+06 T^{-2} + -2.50E-05 T^2$

DETERMINACIÓN DE ΔG

$\Delta G^\circ(T) = \Delta H^\circ(T) - T\Delta S^\circ(T)$
 $\Delta G^\circ = -236.151242$
 $-236.151242 = C_2 + (-129.048722)T$
 $-236.151242 = -129.048722 T + C_2$

Ecuación general para ΔG

$\Delta G^\circ = -107.10 T + -70236.7395 T^2 + 1.61E-02 T^2 + -20.598 \ln T + 1116000.01 T^3 + 1.61E-02 T + 559000.003 1/T - 8.3467E-06 T^2 + 4.1735E-06 T^3$

SISTEMA HIERRO DE 800 A 1000K

Δa	1	Δb	2	Δc	1	Δd	0	Δe	0
Δf	Fe	Δg	Si	Δh	FeSi2	Δi		Δj	
Δk	-263.45	Δl	23.93	Δm	55.442	Δn	0	Δo	0
Δp	2.56E-01	Δq	2.22E-03	Δr	2.92E-02	Δs	0.00E+00	Δt	0.00E+00
Δu	6.19E+07	Δv	-4.14E+05	Δw	5.02E-03	Δx	0.00E+00	Δy	0.00E+00
Δz	0.00E+00	Δaa	0.00E+00	Δab	0.00E+00	Δac	0.00E+00	Δad	0.00E+00
Rango de temperatura	800-1000	Δae	298-1685	Δaf	298-1683	Δag	-78.9212	Δah	800-1000
Δai	0	Δaj	0	Δak	-78.9212	Δal	-78.9212	Δam	KJ/mol
Δan	16.8	Δao	27.3	Δap	44.715	Δaq	0	Δar	J/mol

$\Delta G = \Delta H + T \Delta S = -70373.07$ J/mol PARA T=298K

ECUACION PARA Cp

$$\Delta Cp = 271.032 + -2.31E-01 T + -6.11E+07 T^{-2} + 0.00E+00 T^2$$

DETERMINACION DE ΔH

$$d(\Delta H)/dT = \Delta Cp = 271.032 + -2.31E-01 T + -6.1092000 T^{-2} + 0.00E+00 T^2$$

$$\Delta H = C1 + 271.032 T - 0.1155 T^2 - 2.036E-07 T^3 + 0 T^4$$

SI $\Delta H = -78.9212$ Y T=298

$$-78921.2 = C1 + 275516.497 T - 0.1155 T^2 - 2.036E-07 T^3 + 0 T^4$$

$$-78921.2 = C1 + 275516.497 T - 354437.697 T^2 + 6.11E-07 T^3 + 0 T^4$$

ECUACION GENERAL PARA ΔH

$$\Delta H = -354438 T + 271.032 T^2 - 6.11E-07 T^3 + 0 T^4$$

DETERMINACION DE ΔG

$$d(\Delta G)/dT = -\Delta H/T = -354437.697/T + 271.032 + -1.16E-01 T + -6.1092000 T^3$$

$$\Delta G/T = C2 + -354437.697/T + 271.032 T - 0.116E-01 T^2 - 2.036E-07 T^4 + 0 T^5$$

SI $\Delta G/T = -236.151242$

$$-236.151242 = C2 + -2355.08992/T + 2118.93867 T - 2355.08992 T^3 + -236.151242 T^4$$

ECUACION GENERAL PARA ΔG

$$\Delta G = 2118.94 T + -354437.697/T - 1.16E-01 T^2 - 30546000/T^3 + 0 T^4$$

SISTEMA HIERRO DE 1000 A 1042K

Δa	a	b	c	d	D	DCx
	1	2	1	0	0	Prod.Reac
	Fe	Si	FeS2	0	0	649.482
	-641.90	23.93	55.442	0	0	-6.72E-01
	6.96E-01	2.72E-03	2.92E-02	0.00E+00	0.00E+00	828000.005
	0.00E+00	-4.14E+05	5.02E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1000-1042
	1000-1042	298-1685	-78.9212	0	0	KJ/mol
	0	0	-78.9212	0	0	J/mol
	18.8	27.3	44.715	0	0	

$\Delta G = \Delta H + T \Delta S = -70373.07$ J/mol PARA T=298K

ECUACION PARA Cp

$$\Delta Cp = 649.482 + -6.72E-01 T + 8.28E+05 T^{-2} + 0.00E+00 T^2$$

DETERMINACION DE ΔH

$a \Delta H1 + \Delta Cp = b \Delta H2$

$$\Delta H = C1 + 649.482 T + -3.36E-01 T^2 + 8.28E+05 T^{-2} + 0 T^3$$

Si $\Delta H = -78.9212$ Y T=298

$$-78921.2 = C1 + 160950.281$$

$$-78921.2 - 160950.281 = C1$$

ECUACION GENERAL PARA ΔH

$$\Delta H = -239871 + 649.482 T + -3.36E-01 T^2 + 8.28E+05 T^{-2} + 0 T^3$$

DETERMINACION DE ΔG

$a(\Delta G1/T) + \Delta H1 T = b \Delta G2$

$$\Delta G = C2 + -239871.481 T + 649.482 T^2 + -3.36E-01 T^3 + 828000.005 T^3$$

Si $\Delta G/T = -236.151242$

$$-236.151242 = C2 + -4409.703$$

$$-236.151242 - -4409.703 = C2$$

ECUACION GENERAL PARA ΔG

$$\Delta G = -4173.55 T + -239871.481 T^2 + 649.482 T^3 + -3.36E-01 T^4 + 414000.003 T^5 + 0 T^6$$

SISTEMA HIERRO DE 1042 A 1060K

Δ_f	a	Fe	b	Si	c	FeSi2	d	e	f
Δ_f	1	1964.25	2	23.93	1	55.442	0	0	0
Δ_f		-1.79E+00		2.22E-03		2.92E-02	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Δ_f		0.00E+00		-4.14E+05		5.02E-03	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Δ_f		0.00E+00		0.00E+00		0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Rangeo de temperatura		1042-1060		298-1685		298-1683	1042-1060	1042-1060	K./Jmol
Δ_f		0		0		-78.9212	0	0	-78.9212
Δ_f		18.8		27.3		44.715	0	0	-28.685

$\Delta G = \Delta H - T \Delta S = -70373.07$ J/mol PARA T=298K

EQUACION PARA CO

$$\Delta G = -1956.668 + 1.81E+00 T + 8.28E+05 T^{-2} + 0.00E+00 T^2$$

DETERMINACION DE ΔH

$$\Delta_f \Delta H = -1956.668 + 1.81E+00 T + 828000.005 T^{-2} + 0.00E+00 T^2$$

$$\Delta_f \Delta H = -78921.2 = -505374.53 + 426453.33 = C1$$

EQUACION GENERAL PARA ΔH

$$\Delta H = 426453.33 T + 1956.668 T^{-1} + 8.28E+05 T^{-2} + 0.00E+00 T^2$$

DETERMINACION DE ΔG

$$\Delta_f \Delta G(T) = -1956.668 + 426453.33 T^{-1} + 9.06E-01 T + 828000.005 T^2$$

$$\Delta_f \Delta G = -236.151242 = -12539.757 + 12303.6058 = C2$$

EQUACION GENERAL PARA ΔG

$$\Delta G = -12539.757 T + 426453.33 T^{-1} + 9.06E-01 T + 414000.003 T^2$$

SISTEMA HIERRO DE 1060 A 1184K

DCx	Prod-Reac
569 532	
-3 09E-01	
-290372000	
0 00E+00	
1060-1184	
-78 9212	KJ/mol
-28 1685	J/mol

D	0
0 00E+00	
0 00E+00	
0 00E+00	
0	
0	

C	FeSi2
55 442	
2 92E-02	
5 02E-03	
0 00E+00	
298-1685	
-78 9212	
44 715	

B	Si
23 93	
2 22E-03	
-4 14E+05	
0 00E+00	
298-1685	
0	
27 3	

PARA T=298K

$\Delta G^{\circ} = \Delta H^{\circ} - T \Delta S^{\circ} = -70373.07 \text{ J/mol}$

ECUACION PARA G_p: $\Delta G_p = 569 532 + -3.09E-01 T + -2.90E+08 T^{-2} + 0.00E+00 T^2$

DETERMINACIÓN DE ΔH

$9(\Delta H^{\circ}) - \Delta C_p = 569 532 + -3.09E-01 T + -290372000 T^{-2} + 0.00E+00 T^2$

$\Delta H^{\circ} = C1 + 569 532 + -1.56E-01 T^2 + -2.90E+08 T^{-1} + 0 T^3$

Si $\Delta H^{\circ} = -78 9212 \text{ Y } T=298$
 $-78921 2 = C1 + 1130393 23$
 $-78921 2 = -1209314 43 = C1$

ECUACION GENERAL PARA ΔH

$\Delta H^{\circ} = -1209314 + 569 532 T + -1.56E-01 T^2 + -2.90E+08 T^{-1} + 0 T^3$

DETERMINACIÓN DE ΔG

$9(\Delta G^{\circ})/RT = -\Delta H^{\circ}/T = -1209314.43 / T + 569 532 + -1.56E-01 T + -290372000 T^3$

$\Delta G^{\circ} = C2 + -1209314.43 / T + 569 532 + -1.56E-01 T + -145186000 / T^2 + 0 T^3$

Si $\Delta G^{\circ}/T = -236.151242$

$-236.151242 = C2 + -5621 80156$
 $-236.151242 = -5621 80156 = C2$

ECUACION GENERAL PARA ΔG

$\Delta G^{\circ} = 5385 66 + -1209314 43 T + 569 532 T^{-1} + -1.56E-01 T^2 + -145186000 / T^3$

SISTEMA HIERRO DE 1184 A 1665K

Prod-Reac	DCX
-16.408	
1.64E-02	
828000.005	
0.00E+00	
1184-1665	
-78.9212	KJ/mol
-28.685	J/mol

D	d
0	0
0.00E+00	
0.00E+00	
0.00E+00	
0	
0	

C	c
55.442	1
2.92E-02	
5.02E-03	
0.00E+00	
298-1683	
-78.9212	
44.715	

B	b
23.93	2
2.22E-03	
-4.14E+05	
0.00E+00	
298-1685	
0	
27.3	

A	a
23.99	1
8.39E-03	
0.00E+00	
1184-1665	
0	
18.8	

PARA T=298K

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S = -70373.07 \text{ J/mol}$$

ECUACIÓN PARA Cp

$$\Delta Cp = -16.408 + 1.64E-02 T + 8.28E+05 T^{-2} + 0.00E+00 T^2$$

DETERMINACIÓN DE ΔH

$$d(\Delta H)/dT = \Delta Cp = -16.408 + 1.64E-02 T + 828000.005 T^{-2} + 0.00E+00 T^{-2}$$

$$\Delta H = C1 + -16.408 T + 8.20E-03 T^2 + 8.28E+05 T^{-1} + 0 T^3$$

Si $\Delta H = -78.9212$ Y $T = 298$

$$-78921.2 = C1 + -6940.36873 = -71980.8413 = C1$$

ECUACIÓN GENERAL PARA ΔH

$$\Delta H = -71981 + -16.408 T + 8.20E-03 T^2 + 8.28E+05 T^{-1} + 0 T^3$$

DETERMINACIÓN DE ΔG

$$d(\Delta G)/dT = -\Delta H/T^2 = -71980.8413 T^{-1/2} - 16.408 T^{-3/2} + 828000.005 T^{-3} + 0 T^{-5/2}$$

$$\Delta G = C2 + -71980.8413 T^{1/2} - 16.408 \ln T + 8.20E-03 T + 414000.003 T^{1/2} + 0 T^2$$

Si $\Delta G = -236.151242$

$$-236.151242 = C2 + -155.172599 = -80.9786421 = C2$$

ECUACIÓN GENERAL PARA ΔG

$$\Delta G = -80.98 T + -71980.8413 T^{1/2} - 16.408 \ln T + 8.20E-03 T^2 + 414000.003 T^{1/2}$$

SISTEMA SILICIO

	a	b	c	d	O2	Prod-Reac
D _a	1	1	1	1	29.96	29.05
D _b					4.18E-03	-6.64E-02
D _c					-1.67E+05	-680000
D _d					0.00E+00	-1.86E-05
Rango de temperatura					298-	847 K-
DH=					0	843.01
DS=					205.1	174.4
						kJ/mol J/mol

DC = DH-TDS = 791038.8 J/mol PARA T=298K

ECUACIÓN PARA Cp

$$Cp = 29.05 + (-6.64E-02) T + (-880000) T^{-2} + (-1.86E-05) T^2$$

DETERMINACIÓN DE DH

$$d(DH)/dT = D Cp \quad 29.05 + (-6.64E-02) T + (-880000) T^{-2} + (-1.86E-05) T^2$$

$$DH = C1 + 29.05 T + (-3.32E-02) T^2 + (-6.80E+05) 1/T + (-6.21E-06) T^3$$

Si DH = 843.01 y T=298

$$843010 = C1 + 7826.50$$

$$843010 = 835183.50 = C1$$

ECUACIÓN GENERAL PARA DH

$$DH = 835183.50 + 29.05 T + (-3.32E-02) T^2 + (-680000) 1/T + (-6.21E-06) T^3$$

DETERMINACIÓN DE DG

$$d(DG)/dT = -DH/T^2 = -835183.50 / T^2 + 29.05 / T + (-3.32E-02) T + (-680000) T^3 + (-6.21E-06) T^2$$

$$DG/T = C2 + 835183.50 / T + 29.05 \ln T + (-3.32E-02) T - 340000 / T^2 - 3.11E-06 T^2$$

Si DG/T = 2654.49

$$2654.49262 = C2 + 2651.12527$$

$$2654.49262 = 2651.12527 = C2$$

ECUACIÓN GENERAL PARA DG

$$DG = 3.37 T + 835183.50 / T + 29.05 \ln T + (-3.32E-02) T^2 - 340000 / T^2 - 3.11E-06 T^3$$

SISTEMA SILICIO

	a	b	c	d	DCx Prod-Reac
D _a	1		1	1	-10.79
D _b	58.91	24.43	42.59	29.96	2.07E-03
D _c	1.00E-02	4.40E-04	8.37E-03	4.18E-03	1335000
D _d	0.00E+00	-3.16E+06	-1.66E+06	-1.67E+05	-1.26E-06
Rango de temperatura	0.00E+00	0.00E+00	-1.26E-06	0.00E+00	847 K -
DH=	847.	1100.	298.	298.	843.91 K/Jmol
DS=	-910.9	0	-66.99	0	174.4 J/mol
DS=	41.5	5.7	16.5	205.1	

DG=DH-TDS = 791938.8 J/mol PARA T=298K

ECUACION PARA Cp

$$Cp = -10.79 + 2.07E-03 T + 1335000 T^{-2} + -1.26E-06 T^2$$

DETERMINACIÓN DE DH

$$dDH/dT = Cp = -10.79 + 2.07E-03 T + 1335000 T^{-2} + -1.26E-06 T^2$$

$$DH = C_1 T + -10.79 T + 1.04E-03 T^2 + 1.34E+06 1/T + -4.20E-07 T^3$$

Si DH= 843.91 y T=298

$$843910 = C_1 + -7614.49$$

$$843910 = -7614.49 = C_1$$

ECUACION GENERAL PARA DH

$$DH = 851524.49 + -10.79 T + 1.04E-03 T^2 + 1335000 1/T + -4.20E-07 T^3$$

DETERMINACIÓN DE DG

$$d(DG/T)/dT = -DH/T^2 = -851524.49 1/T^2 + -10.79 1/T + 1.04E-03 T + 1335000 T^3 + -4.20E-07 T^4$$

$$DG/T = C_2 + 851524.49 1/T + -10.79 \ln T + 1.04E-03 T + 667500 1/T^2 + -2.10E-08 T^3$$

Si DG/T = 2657.51

$$2657.51275 = C_2 + 2911.13003$$

$$2657.51275 = 2911.13003 = C_2$$

SISTEMA SILICIO

Da	a	A	b	B	c	C	d	D	DCx
43.39	1	SiO2	3	0.11	1	SiC	2	CO	Prod-Reac
4.00E-02				3.89E-02		42.59		4.10E-03	55.69
-1.00E+06				-1.48E+05		8.37E-03		-4.60E+04	-1.40E-01
0.00E+00				1.74E-05		-1.66E+06		0.00E+00	-309000
299.847				298.1100		-1.26E-06		298.	-5.34E-05
-910				0		298.		-110.5	298.1100
41.5				5.7		-66.99		197.5	622.01
						16.5			352.9
									KJ/mol
									J/mol

DG=DH-TDS= 516845.8 J/mol PARA T=298K

EQUACION PARA Cp: $55.69 + (-1.40E-01) T + (-3.09E+05) T^2 + (-5.34E-05) T^3$

DETERMINACION DE DH

$d(DH)/dT = DCp = 55.69 + (-1.40E-01) T + (-309000) T^2 + (-5.34E-05) T^3$

$DH = C1 + 55.69 T + (-7.01E-02) T^2 + (-3.09E+05) T^3 + (-1.78E-05) T^4$

Si DH= 622.01 Y T=298

$622010 = C1 + 10934.1$

$622010 = 611076 = C1$

EQUACION GENERAL PARA DH

$DH = 611076 + 55.69 T + (-7.01E-02) T^2 + (-3.09E+05) T^3 + (-1.78E-05) T^4$

DETERMINACION DE DG

$d(DG)/dT = -DH/T^2 = -611075.9/T^2 + 55.69/T + (-7.01E-02) T + (-309000) T^3 + (-1.8E-05) T^4$

$DG = C2 + 611075.9/T + 55.69 \ln T + (-7.01E-02) T^2 + (-154500) T^3 + (-8.9E-06) T^4$

Si DG(T) = 1734.361879

$1734.361879 = C2 + 1756.75$

$1734.361879 = 1756.747 = -22.366 = C2$

EQUACION GENERAL PARA DG

$DG = -22.36 + 611076 + 55.69 \ln T + (-7.01E-02) T^2 + (-154500) T^3 + (-8.9E-06) T^4$

SISTEMA SILICIO

	a	b	c	d	
Da	58.91	24.43	47.59	28.41	-32.79
Db	1.00E-02	4.40E-04	8.37E-03	4.10E-03	5.21E-03
Dc	0.00E+00	-3.18E+06	-1.66E+06	-4.80E+04	7736000
Dd	0.00E+00	0.00E+00	-1.26E-06	0.00E+00	-1.26E-06
Rango de temperatura	847.	1100.	298.	298.	847.
DHE	-910	0	-56.99	-110.5	622.01
DS=	41.5	5.7	16.5	197.5	352.9

DCx Prod-Reac

DG=DH-TDS= 5168458 J/mol

PARA T=298K

EQUACION PARA Cp: $50.7 = -32.79 + 5.21E-03 T + 7.74E+06 T^{-2} + 1.79E-06 T^2$

DETERMINACIÓN DE DH

dDH/dT = DCp = $-32.79 + 5.21E-03 T + 7736000 T^{-2} + -1.26E-06 T^{-2}$

DH = C1 $-32.79 T + 2.61E-03 T^2 + 7.74E+06 1/T + -4.2E-07 T^3$

Si DH = 622.01 Y T=298

$622010 = C1 + -35511$

$622010 = 657521 = C1$

EQUACION GENERAL PARA DH

DH = $657521 T - 32.79 T + 2.61E-03 T^2 + 7.74E+06 1/T + -4.2E-07 T^3$

DETERMINACIÓN DE DG

d(DG)/dT = -DH/T = $-657520.932 1/T^2 - 32.79 1/T + 2.61E-03 + 7736000 T^3$

DG = C2 $657520.932 1/T - 32.79 \ln T + 2.61E-03 T + 3868000 1/T^2 - 2.1E-07 T^2$

Si DG = 1734.381879

$1734.381879 = C2 + 2348.94$

$1734.381879 = 2348.94 = -814.56 = C2$

EQUACION GENERAL PARA DG

DG = $514.56 T + 657521 T - 32.79 \ln T + 2.61E-03 T^2 + 3868000 1/T^2 - 2.1E-07 T^2$

SISTEMA SILICIO

Da	a	SiO2	43.39	b	CO	28.41	c	SiC	42.59	d	O2	29.96	DCx	15.73
Dc			4.00E-02			4.10E-03			8.37E-03			4.18E-03	Prod-Reac	-2.95E-02
Dd			-1.00E+06			-4.60E+04			-1.66E+06			-1.67E+05		-865500
DS=			0.00E+00			0.00E+00			-1.26E-06			0.00E+00		-1.26E-06
			298.847			298.			298.			298.		298.847
			-910			-110.5			-66.99			0		953.51
			41.5			197.5			16.5			205.1		85.15

DG=DH-TDS = 928135.3 J/mol PARA T=298K

ECUACION PARA Cp
 $Cp = 15.73 + -2.95E-02 T + -865500 T^{-2} + -1.26E-06 T^2$

DETERMINACION DE Dh

$dDH/dT = DCp$
 $DH = C1 + -2.95E-02 T + -865500 T^{-2} + -1.26E-06 T^{-2}$
 $DH = C1 + 15.73 + -1.47E-02 T^2 + -8.66E+05 1/T + -4.20E-07 T^3$

Si DH = 953.51 Y T=298
 $953510 = C1 + 6272.70$
 $953510 = 947237.30 = C1$

ECUACION GENERAL PARA DH

$DH = 947237.30 + 15.73 T + -1.47E-02 T^2 + -865500 1/T + -4.20E-07 T^3$

DETERMINACION DE DG

$d(DG/T)/dT = -DH/T^2 = -947237.30 1/T^2 + 15.73 1/T + -865500 T^3 + -4.20E-07 T^2$
 $DG/T = C2 + 947237.30 1/T + 15.73 \ln T + -1.47E-02 T + -432750 1/T^2 + -2.10E-07 T^2$

Si DG/T = 3114.55

$3114.54799 = C2 + 3098.31464$

$3114.54799 = 3098.31464 = 16.23 = C2$

ECUACION GENERAL PARA DG

$DG = 16.23 T + 947237.30 + 15.73 \ln T + -1.47E-02 T^2 + 432750 1/T + -2.10E-07 T^2$

SISTEMA SILICIO

D _a	a	SiO ₂	A	+	b	CO	B	+	c	SiC	C	+	d	O ₂	D	DCx	Prod-Reac
58.91	1	58.91	28.41	1	28.41	42.59	29.96	1.5	42.59	29.96	0.21	42.59	29.96	0.21	29.96	0.21	
1.00E-02		1.00E-02	4.10E-03		4.10E-03	8.37E-03	4.18E-03		8.37E-03	4.18E-03	5.00E-04	8.37E-03	4.18E-03	5.00E-04	4.18E-03	5.00E-04	
0.00E+00		0.00E+00	-4.60E+04		-4.60E+04	-1.66E+06	-1.67E+05		-1.66E+06	-1.67E+05	-1.86E500	-1.66E+06	-1.67E+05	-1.86E500	-1.67E+05	-1.86E500	
0.00E+00		0.00E+00	298.		298.	-1.26E+06	0.00E+00		-1.26E+06	0.00E+00	1147 P	-1.26E+06	0.00E+00	1147 P	0.00E+00	1147 P	
847.		847.	-110.5		-110.5	-66.99	0		-66.99	0	954.41	-66.99	0	954.41	0	954.41	
-910.9		-910.9	197.5		197.5	16.5	205.1		16.5	205.1	85.15	16.5	205.1	85.15	205.1	85.15	
41.5		41.5															

DG=DH-TDS= 929035.3 J/mol PARA T=298K

ECUACION PARA Cp

$$DCp = 0.21 + 5.00E-04 T + -1.86E500 T^2 + -1.26E-06 T^2$$

DETERMINACION DE DH

d(DH)/dT=DCp

$$DH = C1 + 5.00E-04 T + -1.86E500 T^2 + -1.26E-06 T^2$$

DH= C1 + 0.21 + 2.50E-04 T^2 + -1.87E+06 1/T + -4.20E-07 T^3

Si DH= 954.41 Y T=298

$$954.41 = C1 + 6333.73$$

$$954.41 - 6333.73 = C1$$

ECUACION GENERAL PARA DH

$$DH = 948076.27 + 0.21 T + 2.50E-04 T^2 + -1.86E500 1/T + -4.20E-07 T^3$$

DETERMINACION DE DG

d(DG)/dT = -DH/T^2

$$DG = 948076.27 T^{-1/2} + 0.21 T^{-1} + 2.50E-04 T + -1.86E500 T^3 + -4.20E-07 T^2$$

Si DG/T = 3117.57

$$3117.56812 = C2 + 3190.71521$$

$$3117.56812 - 3190.71521 = C2$$

ECUACION GENERAL PARA DG

$$DG = 948076.27 T^{-1/2} + 0.21 T^{-1} + 2.50E-04 T + -1.86E500 T^3 + -4.20E-07 T^2$$

SISTEMA SILICIO

DCx	Prod-Reac
37.14	-1.07E-01
790000	3.48E+05
-3.48E+05	1100.
689	K/Jmol
3609	J/mol

d	CO
2	28.41
	4.10E-03
	4.60E+04
	0.00E+00
	298.
	-110.5
	197.5

c	SI
1	23.93
	2.22E-03
	4.14E+06
	0.00E+00
	298.
	0
	18.8

b	B
2	0.11
	3.89E-02
	1.48E+05
	1.74E-05
	298.1100
	0
	5.7

a	A
1	SiO2
	43.39
	4.00E-02
	-1.00E+06
	0.00E+00
	298.847
	-910
	41.5

PARA T=298K

DG=DH-TDS= 581451.8 J/mol

ECUACION PARA Co: $37.14 + (-1.07E-01) T + 790000 T^{-2} + (-3.48E-05) T^2$

DETERMINACION DE DH

$d(DG)/dT = DCp = 37.14 + (-1.07E-01) T + 790000 T^{-2} + (-3.48E-05) T^2$
 $DH = C1 + 37.14 T - 5.37E-02 T^2 + 7.90E+05 1/T + (-1.16E-05) T^3$

$Si \quad DH = 689 \quad Y \quad T = 298$
 $689000 = C1 + 3338.65$
 $689000 - 3338.65 = C1$

ECUACION GENERAL PARA DH

$DH = 685661.35 + 37.14 T - 5.37E-02 T^2 + 790000 1/T + (-1.16E-05) T^3$

DETERMINACION DE DG

$d(DG)/dT = -DH/T = -685661.35 1/T^2 + 37.14 1/T + (-5.37E-02) T + 790000 T^3 - 1.16E-05 T^4$
 $C5/T = C2 + 685661.35 1/T + 37.14 \ln T - 5.37E-02 T + 395000 1/T^2 - 5.73E-06 T^2$

$Si \quad DG/T = 1951.18$
 $1951.18054 = C2 + 2101.36498$
 $1951.18054 - 2101.36498 = -150.18 = C2$

ECUACION GENERAL PARA DG

$DG = 153.18 + 685661.35 T + 37.14 T \ln T + 5.37E-02 T^2 + 395000 1/T - 5.73E-06 T^3$

SISTEMA SILICIO

D_a	a	1	+	A	SiO ₂	58.91	+	B	C	SI	+	D	CO	DCx	Prod-Reac
						1.00E-02		24.43	23.93	28.41		28.41		-27.02	-27.02
						0.00E+00		4.40E-04	2.22E-03	4.10E-03		4.10E-03		-5.00E-04	-5.00E-04
						0.00E+00		-3.16E+06	-4.14E+05	-4.60E+04		-4.60E+04		5820000	5820000
						847.		1100.	0.00E+00	0.00E+00		0.00E+00		0.00E+00	0.00E+00
						-910.94		0	298.	-110.5		-110.5		1100.	K/Jmol
						41.5		5.7	18.8	197.5		197.5		360.9	J/mol

DCp = -27.02 + -5.00E-04 T + 5820000 T² + 0.00E+00 T³

DCx = -27.02 + -5.00E-04 T + 5820000 T² + 0.00E+00 T³

PARA T=298K

DETERMINACIÓN DE DH

dDH/dT = DCp -27.02 + -5.00E-04 T + 5820000 T² + 0.00E+00 T³

DH = C1 + -27.02 T + -2.50E-04 T² + 5.82E+06 1/T + 0.00E+00 T³

DETERMINACIÓN DE DH

SI DH = 689.94 Y T=298

689940 = C1 + -27604.36

689940 = 717544.36 = C1

ECUACIÓN GENERAL PARA DH

DH = 717544.36 + 27.02 T + -2.50E-04 T² + 5820000 1/T + 0.00E+00 T³

DETERMINACIÓN DE DG

d(DG/T)/dT = -DH/T² = -717544.36 1/T² - 27.02 1/T + -2.50E-04 T + 5820000 T³ + 0.00E+00 T

DG/T = C2 + 717544.36 1/T + -27.02 ln T + -2.50E-04 T + 2910000 1/T² + 0.00E+00 T²

SI DG/T = 1954.33

1954.3349 = C2 + 2529.10816

1954.3349 = 2529.10816 = -574.77 = C2

ECUACIÓN GENERAL PARA DG

DG = -574.77 + 717544.36 T + -27.02 ln T + -2.50E-04 T² + 2910000 1/T + 0.00E+00 T³

SISTEMA SILICIO

D _a	23.93	SI
D _b	2.22E-03	
D _c	-4.14E+05	
D _d	0.00E+00	
Rango de temperatura	298-	
DH=	0	
DS=	18.8	

D _c x Prod-Reac	-10.5
	3.36E-02
	-419000
	0.00E+00
	847.
	-910 K/Jmol
	-182.4 J/mol

D _a	29.96	O ₂
D _b	4.18E-03	
D _c	-1.67E+05	
D _d	0.00E+00	
Rango de temperatura	298-	
DH=	0	
DS=	205.1	

D _a	43.39	SiO ₂
D _b	4.00E-02	
D _c	-1.00E+06	
D _d	0.00E+00	
Rango de temperatura	298-847	
DH=	-910	
DS=	41.5	

PARA T=298K

DG=DH-TDS -855644.8 J/mol

ECUACION PARA C_p

$$D_{c_p} = -10.5 + 3.36E-02 T + -419000 T^{-2} + 0.00E+00 T^2$$

DETERMINACION DE DH

$$d(DH)/dT = DC_p = -10.5 + 3.36E-02 T + -419000 T^{-2} + 0.00E+00 T^2$$

$$DH = C_1 T + -10.5 T + 1.68E-02 T^2 + -4.19E+05 1/T + 0.00E+00 T^3$$

SI $DH = \frac{-910}{T} + Y T = 298$

$$\frac{-910000}{T} = C_1 T + -231.05$$

$$-910000 = C_1 T^2 - 231.05 T$$

ECUACION GENERAL PARA DH

$$DH = -909768.95 + -10.5 T + 1.68E-02 T^2 + -419000 1/T + 0.00E+00 T^3$$

DETERMINACION DE DG

$$d(DG)/dT = -DH/T = -909768.95 1/T^2 + -10.5 1/T + 1.68E-02 T + -419000 T^3 + 0.00E+00 T^4$$

$$DG = C_2 T + -909768.95 1/T + -10.5 \ln T + 1.68E-02 T^2 + -209500 1/T^2 + 0.00E+00 T^3$$

SI DG/T = -2871.29

$$-2871.29128 = C_2 T + -2995.74372$$

$$-2871.29128 = -2995.74372 + 124.45 = C_2$$

ECUACION GENERAL PARA DG

$$DG = 124.45 T + -909768.95 1/T + -10.5 \ln T + 1.68E-02 T^2 + -209500 1/T^2 + 0.00E+00 T^3$$

SISTEMA SILICIO

a	b	c	d	D	DCx
1	1	1	0	0	Prod-Reac
Si	O2	SiO2			
23.93	29.96	58.91			5.02
2.22E-03	4.18E-03	1.00E-02		0.00E+00	3.64E-03
-4.14E+05	-1.67E+05	0.00E+00		0.00E+00	581000
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00		0.00E+00	0.00E+00
298.	298.	847.		0	847.
0	0	-910.9		0	-910.9
18.8	-205.1	41.5		0	-182.4
					J/mol

DCx = DH-TDS = -856544.8 J/mol PARA T=298K

ECUACION PARA Cp

$$Cp = 5.02 + 3.64E-03 T + 581000 T^{-2} + 0.00E+00 T^2$$

DETERMINACION DE DH

$$d(DH/dT) = DCp = 5.02 + 3.64E-03 T + 581000 T^{-2} + 0.00E+00 T^2$$

$$DH = C1 + 5.02 T + 1.82E-03 T^2 + 5.81E+05 1/T + 0.00E+00 T^3$$

Si DH = -910.9 Y T=298

$$-910900 = C1 + 5.02(298) + 1.82E-03(298)^2 + 5.81E+05(1/298) + 0.00E+00(298)^3$$

$$-910900 = C1 - 292.08 - 910607.92 = C1$$

ECUACION GENERAL PARA DH

$$DH = -910607.92 + 5.02 T + 1.82E-03 T^2 + 581000 1/T + 0.00E+00 T^3$$

DETERMINACION DE DG

$$d(DG/dT) = -DH/T = -910607.92 1/T + 5.02 + 1.82E-03 T + 581000 T^3 + 0.00E+00 T^2$$

$$DG = C2 + -910607.92 1/T + 5.02 \ln T + 1.82E-03 T + 290500 1/T^2 + 0.00E+00 T^2$$

Si DG(T) = -2874.31

$$-2874.31141 = C2 + -3088 14429$$

$$-2874.31141 = -3088 14429 + 213.83 = C2$$

ECUACION GENERAL PARA DG

$$DG = 213.83 T + -910607.92 + 5.02 \ln T + 1.82E-03 T^2 + 290500 1/T^2 + 0.00E+00 T^2$$

SISTEMA SILICIO

Da	a	1	A	Si	23.93	b	1	C	0.11	d	0	DCx	Prod-Reac
Db					2.22E-03				3.89E-02				18.55
Dc					-4.14E+05				-1.66E+06				-3.28E-02
Dd					0.00E+00				1.74E-05				-1.09E+00
DH=					298				298-1100				-1.98E+05
DS=					18.8				0				1100 K
DG=DH-TDS=					-64606				57				-66.99
													kJ/mol

PARA T=298K

EQUACION PARA Cp $DCp = 18.55 + -3.28E-02 T + -1.09E+00 T^2 + -1.86E-05 T^3$

DETERMINACION DE DH

$dDH/dT = DCp = 18.55 + -3.28E-02 T + -1.09E+00 T^2 + -1.86E-05 T^3$

$DH = C1 + 18.55 T + -1.64E-02 T^2 + -1.10E+06 1/T + -6.21E-06 T^3$

Si $DH = -66.99$ Y $T = 298$

$-66990 = C1 + 7595.450765$

$-66990 - 7595.450765 = C1$

EQUACION GENERAL PARA DH

$DH = -74585.45 + 18.55 T + -1.64E-02 T^2 + -1.09E+00 1/T + -6.21E-06 T^3$

DETERMINACION DE DG

$d(DG/T)/dT = -DH/T^2 = -74585.45 1/T^2 + 18.55 1/T + -1.64E-02 + -1.09E+00 T^3 -6.21E-06 T$

$DG/T = C2 + -74585.45 1/T + 18.55 \ln T + -1.64E-02 T + -549500 1/T^2 + -3.11E-06 T^2$

Si DG/T = -216.7986577

$-216.7986577 = C2 + -344.6184529$

$-216.7986577 - -344.6184529 = C2$

EQUACION GENERAL PARA DG

$DG = 127.82 + -74585.45 1/T + 18.55 \ln T + -1.64E-02 T^2 + -549500 1/T^2 + -3.11E-06 T^3$

SISTEMA SILICIO

D _a	a	1	A	SI	23.93	b	1	B	C	24.43	c	1	C	SIC	42.59	d	0	D	.	DCx	Prod.Reac
D _b			2.22E-03		4.40E-04			-3.16E+06		0.00E+00			8.37E-03		0.00E+00			0.00E+00		-5.77	5.71E-03
D _c			-4.14E+05		0.00E+00			1100.		-1.26E-06			-1.66E+06		0.00E+00			0.00E+00		1916000	-1.26E-06
D _d			0.00E+00		298.			0		-1.26E-06			298.		0			0		1100.	-1.26E-06
DH=			0		0			5.7		0			-66.99		0			0		-66.99	KJ/mol
DS=			18.8		0			5.7		0			16.5		0			0		0	J/mol

DC_p = -6.4606 J/mol PARA T=298K

ECUACION PARA Cp

$$DC_p = -5.77 + 5.71E-03 T + 1916000 T^2 + -1.26E-06 T^3$$

DETERMINACION DE DH

dCH/dT = DC_p

$$DH = -5.77 + 5.71E-03 T + 1916000 T^2 + -1.26E-06 T^3$$

$$DH = C1 + -5.77 + 5.71E-03 T + 1916000 T^2 + 1.92E+06 1/T + -4.20E-07 T^3$$

SI DH = -66.99 Y T = 298

$$-66990 = C1 + -7906.56949$$

$$-66990 = -59083.43 = C1$$

EQUACION GENERAL PARA DH

$$DH = -59083.43 + 5.77 T + 2.86E-03 T^2 + 1916000 1/T + 4.20E-07 T^3$$

DETERMINACION DE DG

d(DG_r)/dT = -DH/T

$$DG/T = C2 + -59083.43 1/T + -5.77 \ln T + 2.86E-03 T + 968000 1/T^2 + -2.10E-07 T^2$$

SI DG/T = -216.7986577

$$-216.7986577 = C2 + -177.0142594$$

$$-216.7986577 = -177.0142594 = C2$$

EQUACION GENERAL PARA DG

$$DG = -39.78 T + 59083.43 + 5.77 \ln T + 2.86E-03 T^2 + 968000 1/T^2 + 2.10E-07 T^3$$

SISTEMA SILICIO

D_a	a	SI	23.93
D_b	b	C.O2	44.14
D_c	c	1	42.59
D_d	d	O2	29.96
Rango de temperatura			
DH=	298		
DS=	0		
	18.8		

D_c	1	SIC	42.59
D_c	1	1	8.37E-03
D_c	1	1	-1.66E+06
D_c	1	1	-1.26E-06
D_c	1	1	298
D_c	1	1	-66.99
D_c	1	1	16.5

D_c	1	O2	29.96
D_c	1	1	4.18E-03
D_c	1	1	1.67E+05
D_c	1	1	0.00E+00
D_c	1	1	298
D_c	1	1	0
D_c	1	1	205.1

D_c	1	Prod-React	4.48
D_c	1	1	1.33E-03
D_c	1	1	-51.4000
D_c	1	1	-1.26E-06
D_c	1	1	298 K
D_c	1	1	326.51 kJ/mol
D_c	1	1	-10.9 J/mol

DG=DH-TDSI 329758.2 J/mol PARA T=298K

ECUACION PARA Cp $4.48 + 1.33E-03 T + -51.4000 T^2 + -1.26E-06 T^3$

DETERMINACION DE DH

dDH/dT=DCp 4.48 + 1.33E-03 T + -51.4000 T^2 + -1.26E-06 T^3

DH= C1 + 4.48 T + 6.65E-04 T^2 + -5.14E+05 1/T + -4.20E-07 T^3

SI DH= 326.51 Y T=298

$326510 = C1 + 3107.81$

$326510 = 323402.19 = C1$

ECUACION GENERAL PARA DH

DH= 323402.19 + 4.48 T + 6.65E-04 T^2 + -51.4000 1/T + -4.20E-07 T^3

DETERMINACION DE DG

d(DG/T)/dT = -DH/T^2 = 323402.19 1/T^2 + 4.48 1/T + -51.4000 T^3 + -4.20E-07 T

DG/T = C2 + 323402.19 1/T + 4.48 ln T + 6.65E-04 T + -2.10E-07 T^2

SI DG/T = 1106.57

1106.57114 = C2 + 1062.43375

1106.57114 = 1062.43375 = 44.14 = C2

ECUACION GENERAL PARA DG

DG= 44.14 T + 323402.19 1/T + 4.48 ln T + 6.65E-04 T + -2.10E-07 T^2

SISTEMA SILICIO

A		B		C		D		DCx	
SI	SI	CO	CO	SIC	SIC	O2	O2	Prod-Reac	K/Jmol
Da	23.93	28.41	42.59	42.59	29.96	29.96	29.96	5.23	4.351
Db	2.22E-03	4.10E-03	8.37E-03	8.37E-03	4.18E-03	4.18E-03	4.18E-03	4.14E-03	4.14E-03
Dc	-4.14E+05	-4.60E+04	-1.66E+06	-1.66E+06	-1.67E+05	-1.67E+05	-1.67E+05	-1.284500	-1.284500
Dd	0.00E+00	0.00E+00	-1.26E+06	-1.26E+06	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	-1.26E+06	-1.26E+06
Rango de temperatura	298	298	298	298	298	298	298	298 K	298 K
DH=	0	-110.5	-66.99	-66.99	0	0	0	43.51	43.51
DS=	18.8	197.5	16.5	16.5	205.1	205.1	205.1	-97.25	-97.25

DG=DH-TDS = 72490.5 J/mol

PARA T=298K

EQUACION PARA Cp

$$DcP = 5.23 + 4.14E-03 T - 1.284500 T^2 + -1.26E-06 T^3$$

DETERMINACION DE DH

$$DH(T) = DcP \cdot 5.23 + 4.14E-03 T + -1.284500 T^2 + -1.26E-06 T^3 + 4.20E-07 T^4$$

$$DH = C1 + 5.23 T + 2.07E-03 T^2 - 1.28E+06 T^3 + 4.20E-07 T^4$$

SI DH = 43.51 Y T=298

$$43510 = C1 + 37468.36 = 6041.65$$

EQUACION GENERAL PARA DH

$$DH = 37468.36 + 5.23 T + 2.07E-03 T^2 - 1.284500 T^3 + 4.20E-07 T^4$$

DETERMINACION DE DG

$$DG(T) = DH(T) - TS(T)$$

$$DG(T) = C2 + 37468.36 + 5.23 T + 2.07E-03 T^2 - 1.284500 T^3 + 4.20E-07 T^4 - T \ln T - 2.10E-07 T^2$$

$$SI DG(T) = 243.26$$

$$243.256711 = C2 + 102.57092 + 140.69 = C2$$

EQUACION GENERAL PARA DG

$$DG = 140.69 + 37468.36 + 5.23 T + 2.07E-03 T^2 - 1.284500 T^3 + 4.20E-07 T^4$$

ANEXO 1

7. Conclusiones

- La presencia de oxígeno en el sistema, interviene negativamente de tal forma que obstruye la formación del SiC, debido a que este reacciona muy espontáneamente con el silicio para formar óxido de silicio el cual tiene una estabilidad muy fuerte e impide obtener el carburo a partir de este compuesto.
- La formación del SiC se recomienda partiendo de silicio puro y carbono, por su estabilidad y espontaneidad, además de que en condiciones adiabáticas es posible obtener este compuesto por debajo de 1800K.
- La presencia de FeSi_2 en las muestras sinterizadas por el Dr. Zahair A. Munir, hacen evidencia que la termodinámica puede guiar la experimentación hacia lo que podemos obtener dentro de un sistema.
- El Compósito sinterizado por el Dr. Zahair es por mucho un material que ofrece muchísimas ventajas, los resultados obtenidos muestran la evidente superioridad que representa su aplicación, si bien no se alcanzó el mismo coeficiente de desgaste que la balata, si se obtuvo un resultado por más favorable (0.8), los resultados de desgaste tanto para el anillo como para la muestra 1, y puede incluirse la muestra 3 indican un menor desgaste, mayor estabilidad y por lo tanto una vida útil mayor para ambas partes.
- Una composición química con mayor cantidad de carburo de silicio, aumenta el coeficiente de fricción, y no afecta la vida útil del material de contaparte.
- Un material compuesto da mayor seguridad, en los valores obtenidos de las pruebas realizadas muestran que el comportamiento de los coeficientes de fricción se mantienen constantes y estables durante las pruebas dando la seguridad de que su propiedad de fricción permanecerá constante durante toda su vida.

8. Bibliografía

Archard, J. 1999. Contact and rubbing of flat surfaces. *J. Appl. Phys.*: 24: 981.

Atkins, P. 1986. Tablas de datos. En: *Fisicoquímica*. Ed. Iberoamericana. Printed: 953-956.

ASTM G77-98. 1998. Wear using block-on-ring test. En: *Standard test method for ranking resistance of materials to sliding*: 1-14.

Citak, R. Rogers, K. and Sandhage, K. 1999. "Low-temperature synthesis of $BaAl_2O_4$ /Aluminium bearing composites by the oxidation of solid metal-bearing precursors", *J. Amer. Ceram. Soc.*: 82: 237-240.

Dan, P. 2001. "Materiales prensados en caliente", División de materiales.
<http://www.ansto>

Fort, M. 2002. "Cuales son compuestos", Asociación de fabricantes de materiales compuestos.
<http://www.cfa-hq.org/composites.shtml>

Gaskell, R. 1982. Reactions involving pure condensed phases. En: *Metallurgical Thermodynamics*. Ed. Addison. Washington: 261-315.

Gwidon, W. And Grazyna, B. 1994. Wear behaviour of ceramic cutting-tools. *Key Eng. Mat.*: 96:137-164.

Hallen, J. Balmori, H. Balmori, D. Estrada; J. Gonzáles, J. And Manzano, A. 1997. Influence of Mg and stirring on the strength of an aluminium matrix composites obtained by compocasting, *Key Eng. Mat.*: 495-502.

- Finalmente las lecturas de temperatura tomadas no muestran que este pueda ser un factor importante dentro de la aplicación del material, debido a que tanto los compósitos como la muestra de referencia mostraron temperaturas muy cercanas entre sí (170 a 180°C en promedio).
- Con este punto dan por concluidos los objetivos de este trabajo, no sin antes mencionar como recomendación que los estudios termodinámicos pueden ser complementados con cálculos de cinética para evaluar el tiempo en que tarda en reaccionar todo el sistema, también la evaluación cuantitativa de los compuestos y elementos involucrados, para el análisis completo de balance de materia y energía.
- Los estudios en cuanto a la aplicación de este material son muy extensos y se pueden completar con pruebas mecánicas que serán tema de investigación posteriormente.

McHague, C. 2000, "Pan American Advanced Studies Institute – PA ASI", Universidad Federal de Rio de Janeiro, Brasil.

<http://www.notimat.coppe.ufrj.br/br/anteriores/espanhol/22/noticia.html>

Munir, Z. Maglia, F. Tamburini, U. Spinolo, G. 2000. Zirconia-based metaestable solid solutions through self-propagating high-temperature sintesis: Síntesis, characterization, and mechanistic investigations. J. Amer. Ceram. Soc: 83: 1935-1941.

Ordóñez, S.Rojas, P. Bustos, O. Martínez, V. 2002. "Tenacidad a la fractura de cerámicas basadas en el nitruro de silicio", Universidad de Santiago de Chile.

<http://www.cchen.cl/nucleotécnica/itm3.html>

Perry, R. 1992. Capacidades caloríficas de los elementos y compuestos inorgánicos. En: Manual del ingeniero químico. Ed. McGraw-Hill. Mexico: 159-166.

Refrac, S. 2002 "Presionar en caliente y vacío", Vinculación de difusión.

<http://www.refrac.com>

Richerson, D. 1992. Modern Ceramic Engineering, Marcel Dekker Inc. USA: 110-2000.

Rodríguez, D. 1999. Construcción de equipo para alta densificación de polvos metálicos y cerámicos usando sinterizado por plasma-chispa. Centro de investigación de materiales avanzados. Pre-propuesta.

SAE J661. 1997, Land, sea, air and space, surface vehiclerecommended practice, brake, Lining quality test procedure. En: The engineering society for advancing mobility: 1-9.

Sarkar, A. 1977. Teoría Molecular de Fricción y Desgaste. En: Desgaste de Metales. Ed. Limusa, México: 71-110.

Shin, D. Park, S. Choa, Y. and Nihara, K. 1999. Silicon/silicon carbide composites fabricated by infiltration of a silicon melt into charcoal, *J. Amer. Ceram. Soc.*: 82: 3251-3253.

Shon, J. And Munir, A. 1998. Synthesis of TiC and TiC-Cu composites and TiC-Cu functionally grades materials by electrothermal combustion. *J. Amer. Ceram. Soc.*: 81: 3243-3249

Schmidt, A. 1962. Appendix. En: Material and balances. Ed. Prentice-hall, New York: 309-407.

Smith, W. 1993. Introducción a la Ciencia e ingeniería de materiales. En: Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. Ed. McGraw Hill, España: 1-14

Smith, W. 1993. Materiales Compuestos. En: Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. Ed. McGraw Hill, España: 848-860.

Takeuchi, T. Tabuchi, M. Kondoh, I. Tamari, N. and Kageyama, H. 2000. Synthesis of dense lead titanate ceramics with sumicrometer grains by spark plasma sintering. *J. Amer. Ceram. Soc.*: 83: 541-544

Tomanari, T. Mitsuharu, T. Hiroyoki K. 1999. Preparation of dense BaTiO₃ Ceramics with sumicrometer grains by spark plasma sintering. *J. Am. Ceram. Soc.*: 82: 939-943.

Upadhyaya, G. And Dube, R. 1979. Fugacidad, actividad y constante de equilibrio. En: problemas de termodinámica y cinética en metalurgia. Ed. Géminis. Buenos Aires: 75-95.

Wells, T. 2002. "Freno con disco de carbono", contenidos.

<http://www.contenidos.com/fisica/f1/frenos.htm>

William, E. And Mark, R. 1994. Property control by processing. En: Ceramic Microstructures. Ed. Chapman Hall: Sheffield: 551-558.

Xia, T. Munir, Z. Tang, Y. Zhao, W. Wang, T. 2000. Structure in Combustión síntesis of Al_2O_3 -TiC composites. J. Am. Ceram. Soc: 83:507-512

Harvey, E. 1965. Fricción y formas aerodinámicas. En: Física moderna universitaria. Ed: UTEA, México: 82-86.

Himmelblau, D. 1995. Balances de energía. En: Principios y cálculos básicos de la ingeniería Química. Ed. CECSA, México: 388-465.

Hutchings, I. 1992. Sliding Wear. En: Tribology. Ed. Edward Arnold. London: 77-122.

Jennings, R. 2002 "Escuela de Ingeniería de Materiales", Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.

<http://www.unsa.edu.pe/afisicas/ing.materiales/serviciosim.html>

John, D. 1998. Propiedades Termodinámicas. En: Lange Manual de Química. Ed. McGrawHill, México: 104-109.

Juárez, A. 2002. "Curso de ingeniería de materiales", Ciateq.

<http://ciateq.mx/~ajuarez/p7/P7-1.HTM>

Kobaschewski, O. 1994. Appendix. En: Materials Thermochemistry, Ed. Pergamon Press. EU: 2003-2014.

Manual Técnico. 2002. "Frenos ceramicos", El rincón del porschista.

http://leo.worldonline.es/jaumepor/español/técnica/fre_cer.htm

Maron, S. And Prutton, C. 1973. Primera ley de la termodinámica. En: Fundamentos de fisicoquímica. Ed. Limusa, México: 109-141.

Maron, S. And Prutton, C. 1973. Termoquímica. En: Fundamentos de fisicoquímica. Ed. Limusa, México: 143-147.

DATOS TEMODINÁMICOS

	Cp J/(mol K)				DH° KJ/mol	DG° KJ/mol	S° J/mol K	RANGO KELVIN, K	REF.
	A	B	C	D					
C	-	-	-	-	0	0	5,6940	-	1
A	-	-	-	-	0	0	5,6940	-	2
R	11,191	1,095E-02	-4,890E+05	-	0	-	-	273-1373	3
B	-	-	-	-	0	0	5,7400	-	4
O	17,200	4,270E-03	-8,790E+05	-	0	0	5,6940	298-2300	5
N	24,430	4,400E-04	-3,163E+06	-	0	-	5,7000	1100-	5
O	0,110	3,894E-02	-1,480E+05	1,738E-05	0	-	5,7000	298-1100	6

F I E R R O	-	-	-	-	0	0	27,2979	-	1
	17,291	2,671E-02	-	-	0	-	-	273-1041	2
	25,623	1,410E-02	-	-	-	-	-	1041-1179	2
	35,169	-	-	-	-	-	-	1179-1674	2
	-	-	-	-	0	0	27,2800	-	3
	-	-	-	-	-	-	-	-	4
	28,180	-7,320E-03	-2,900E+05	2,504E-05	-	-	27,3000	298-800	5
	-263,450	2,558E-01	6,192E+07	-	-	-	27,3000	800-1000	5
	-641,910	6,963E-01	-	-	-	-	27,3000	1000-1042	5
	1946,250	-1,788E+00	-	-	-	-	27,3000	1042-1060	5
	-561,950	3,341E-01	2,912E+08	-	-	-	27,3000	1060-1184	5
	23,990	8,360E-03	-	-	-	-	27,3000	1184-1665	5
	12,728	3,174E-02	2,512E+05	-	-	-	-	298-1033	6
	46,599	0,000E+00	0,000E+00	-	-	-	-	1033-1183	6
24,283	8,290E-03	0,000E+00	-	-	-	-	1183-1673	6	

Si	-	-	-	-	0	0	18,8406	-	1
	24,032	2,583E-03	-4,229E+05	-	-	-	-	273-1174	2
	-	-	-	-	0	0	18,83	-	3
	-	-	-	-	0	-	19	-	4
	23,930	2,220E-03	-4,140E+05	-	0	-	18,8	298-1685	5

FeSi	-	-	-	-	-73,6877	-73,6877	46,0548	-	1
	44,129	1,918E-02	-	-	-	-	-	273-903	2
	38,238	2,244E-02	2,680E+04	-2,093E-07	-78,9212	-	44,7150	298-1683	5

FeSi2	-	-	-	-	-81,2239	-78,2932	55,6844	-	1
	55,442	2,922E-02	5,024E+03	0,000E+00	-81,2239	-	55,6844	298-900	5

SiC	-	-	-	-	-73,2690	-70,7569	16,6216	-	1
	37,221	1,218E-02	-1,189E+06	-	-	-	-	273-1629	2
	42,590	8,370E-03	-1,661E+06	-1,260E-06	-66,9900	-	16,5000	298-	5

DATOS TEMODINÁMICOS (continuación)

	Cp J/(mol K)				DH°	DG°	S°	RANGO	REF
	A	B	C	D	KJ/mol	KJ/mol	J/mol K	KELVIN, K	
SiO2	-	-	-	-	-911,5501	-857,247	41,868		1
	45,5105	4,E-02	-1,E+06	-	-	-	-	273-848	2
	45,8455	2,E-02	-	-	-	-	-	848-1873	2
	-	-	-	-	-910,94	-856,64	41,84		3
	43,39	4,E-02	-1,E+06	-	-910,9	-	41,5	298-847	5
	58,91	1,E-02	-	-	-	-	-	847-	5
	46,9756	3,E-01	-1,E+06	-	-	-	-	298-848	6
	60,3318	8,E-03	0,E+00	-	-	-	-	840-2000	6

CO	-	-	-	-	-110,6153	-137,3689	198,0356	-	1
	27,6328	5,E-03	-	-	-	-	-	298-2000	2
	-	-	-	-	-110,53	-137,17	197,67	-	3
	28,41	4,E-03	-5,E+04	-	-110,5	-	197,5	-	5
	28,4283	4,E-04	-5,E-04	-	-110,61	-	-	298-2500	6

CO2	-	-	-	-	-393,7685	-394,6478	213,8199	-	1
	43,2915	1,E-02	-8,E+05	-	-	-	-	273-2500	2
	-	-	-	-	-393,51	-394,36	213,74	-	3
	44,14	9,E-03	-9,E+05	-	-393,5	-	213,7	298-	5
	44,2545	9,E-03	-9,E+05	-	-393,76	-	-	298-2500	6

O2	-	-	-	-	0	0	205,1658	-	1
	34,6248	1,E-03	-8,E+05	-	-	-	-	-	2
	-	-	-	-	0	0	205,138	-	3

FeO	-	-	-	-	-266,4479	-245,3046	57,5266	-	1
	52,8374	6,E-03	-3,E+05	-	-	-	-	273-1173	2
	48,79	8,E-03	-2,E+07	-	-263	-	60,1	298-	5
	48,818	8,E-03	-3,E+05	-	266,67	-	-	298-1650	6

- 1.- John, D. 1998
- 2.- Perry, R. 1992
- 3.- Atkins, P. 1986
- 4.- Gaskell, R. 1982
- 5.- Kobaschewski, O. 1994
- 6.- Schmidt, A. 1962

Los cálculos fueron realizados con la bibliografía 5.

ANEXO 2