Caso de estudio de desgaste. Viabilidad del uso de bolas de rodamiento de nitruro de silicio para aplicaciones espaciales

1. Introducción

1.1. Subtema introducción 1

Texto Un rodamiento es un tipo de cojinete que utiliza rodillos para minimizar la fricción entre la superficie del eje y la superficie del rodamiento. Según Marghitu, un cojinete es un conector que permite que los miembros conectados se mueven relativos uno al otro al aplicarse una carga axial o radial [1]. A diferencia de los cojinetes deslizantes que dependen únicamente de una delgada capa de lubricación para reducir el contacto entre los distintos componentes, los rodamientos utilizan rodillos que reducen el área de contacto entre estos y el eje. Tales rodillos pueden ser cilíndricos (rodillos de aguja) o esféricos (bolas de rodamiento). A comparación de los cojinetes deslizantes, los rodamientos presentan una menor fricción inicial y permiten un mejor alineamiento del eje a largo plazo [1]. Adicionalmente, los rodamientos son fáciles de lubricar y requieren poca atención a lo largo de su vida útil. Por estas razones, los rodamientos son componentes mecánicos utilizados ampliamente en un gran espectro de aplicaciones industriales, tecnológicas y de investigación. Específicamente, el relativamente bajo mantenimiento requerido para el uso de rodamientos los vuelve excelentes candidatos para su uso en el campo espacial donde los procesos de lubricación y reemplazo implican mayores dificultades y costos.

Este estudio se enfocará hacia los rodillos esféricos, es decir, las bolas de rodamiento. Tales piezas tradicionalmente han sido fabricadas de diversas aleaciones de acero inoxidable por su versatilidad y disponibilidad. Sin embargo, existen alternativas de materiales cerámicos como el nitruro de silicio que presentan propiedades macroscópicas atractivas como un elevado rango térmico de operación, una mayor resistencia mecánica y una alta dureza. El propósito de este estudio es entonces evaluar la viabilidad del uso de bolas de rodamiento de nitruro de silicio para aplicaciones en el campo espacial. Esta evaluación se llevará a cabo mediante el análisis y la comparación de las propiedades relevantes del nitruro de silicio y de las aleaciones de acero inoxidable que sean pertinentes. Adicionalmente, se hará referencia a los estándares internacionales y se dará una recomendación sobre la implementación de los rodamientos con bolas de nitruro de silicio para aplicaciones espaciales.

La importancia de un estudio como este es que les permite a los diseñadores una mayor libertad al tener una opción que les permita reducir peso, aumentar la fiabilidad, simplificar el mantenimiento y eliminar interferencias magnéticas dentro de sus soluciones para el campo espacial. Esta mayor libertad se puede manifestar en la forma de un amplio rango de soluciones.

2. Antecedentes

2.1. Dimensiones y estándares

Los estándares más comúnmente utilizados en la industria de los rodamientos son el americano y el internacional. Según Marghitu, el estándar americano es establecido por el Comité de Ingenieros de Rodamientos Anulares de los Productores Americanos de Rodamientos Anti-Fricción (ABEC y AFBMA por sus respectivas siglas en inglés) [1]. Por otro lado, el estándar internacional, denominado ISO-492 es mantenido por la Organización Internacional de Normalización (ISO) [2]. Ambos estándares son equivalentes y están definidos usando unidades del sistema internacional. Tales documentos establecen distintos grados de precisión que corresponden a distintos niveles de tolerancias para las dimensiones más importantes del rodamiento. Sin embargo, las características de las bolas no están consideradas en estos estándares, sino que se encuentran en publicaciones adicionales (ISO 3290 y ANSI-ABMA 10A) [3], [4].

El estándar ISO 3290 tiene dos partes, una que corresponde a bolas de acero (ISO 3290:1) y otra que trata de bolas cerámicas de nitruro de silicio (ISO 3290:2) [3], [4]. Para las bolas de metal, esta norma internacional reconoce un gran número de diámetros que van desde 0.3 hasta 104.775 milímetros. Adicionalmente, se establecen grados de precisión para la manufactura de dichas bolas. Estos grados van desde G3 hasta G200 como se muestra en el cuadro 1.

Grado	**Tolerancia diámetro ($\pm\mu m$)**	**Desviación esférica (μm)**	**Rugosidad superficial (μm)**
G 3	0.08	0.08	0.01
G 5	0.13	0.13	0.014
G 10	0.25	0.25	0.02
G 16	0.4	0.4	0.025
G 20	0.5	0.5	0.032
G 24	0.6	0.6	0.04
G 28	0.7	0.7	0.05
G 40	1	1	0.06
G 60	1.5	1.5	0.08
G 100	2.5	2.5	0.1
G 200	5	5	0.15

Cuadro 1: Grados de precisión para bolas de acero según ISO 3290:1

Además de dimensiones y grados, el estándar también define varios parámetros relacionados a la varianza dimensional dentro de un lote de bolas. Sin embargo, estos parámetros no son relevantes para el objeto de estudio. Por otro lado, según el estándar ISO 3290:2, las dimensiones y tolerancias requeridas para bolas de nitruro de silicio son idénticas con la diferencia de que solo se consideran diámetros hasta 57.15 milímetros y grados a partir del G 100 [3].

Es importante resaltar que en ninguno de estos estándares se encuentran definidas propiedades macroscópicas de los materiales como la densidad, la dureza, el módulo de elasticidad, etc. En lo que se refiere a las bolas de acero, el documento no hace referencia alguna a aleaciones particulares. En lo que respecta a la dureza, las normas dicen: “Los valores de dureza serán acordados entre el cliente y el proveedor [sic]” [3], [4].

2.2. Fricción

Según Ashby, el deslizamiento de una superficie sobre otra implica el vencimiento de una fuerza de fricción estática proporcional a la fuerza que mantiene a las superficies en contacto (normal a estas en el punto de contacto) [5]. El coeficiente que caracteriza esta relación, denominado coeficiente de fricción estática μ_s.

Ashby explica que dos superficies colocadas una sobre otra sólo hacen contacto en los puntos donde las asperezas microscópicas hacen contacto. En estas asperezas, la fuerza normal N causa una deformación plástica compresiva que incrementa el área de contacto hasta llegar a un equilibrio donde el esfuerzo normal experimentado por cada material sea igual al esfuerzo de fluencia a compresión del material como se muestra en la Figura 1 [5].

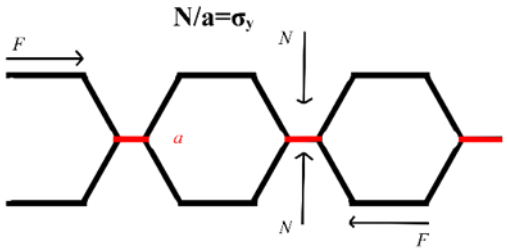

Figura 1: Punto de equilibrio

Una vez alcanzado el punto de equilibrio, podemos considerar que $N \approx \sigma_y a$, por lo que el área real de contacto será proporcional a la fuerza normal. A lo largo de esta área real de contacto, la deformación plástica junta las asperezas de ambas superficies a tal grado que se forman uniones átomo a átomo. Esto significa que, para poder deslizar una superficie sobre la otra, se debe aplicar un esfuerzo cortante igual o mayor al límite elástico a cortadura. Por último, con respecto al menor coeficiente de fricción cinética, Ashby escribe:

“Una vez que las superficies están en movimiento, los átomos tienen menos tiempo para formar uniones átomo-átomo en los contactos entre asperezas que cuando las superficies

están en contacto estático; esto es equivalente a considerar que el área de contacto sobre la cual se aplica el esfuerzo cortante se ve reducida" [5].

Para un rodamiento, es muy importante reducir la fricción existente entre sus distintas piezas, ya que el trabajo aplicado para vencer la fuerza de fricción es disipado en forma de calor. Este calor disipado es una fuente de ineficiencia en cualquier sistema mecánico. Adicionalmente, esta disipación implica un incremento en la temperatura de operación para el rodamiento y los componentes aledaños, lo que puede tener efectos adversos dependiendo de la aplicación. En lo que concierne a las bolas de rodamiento, una mayor temperatura de operación se ve reflejada en una mayor disposición a la fatiga del material [5].

Cabe recalcar que, en un vacío, los metales presentan elevados coeficientes de fricción debido a su inestabilidad química que facilita las uniones atómicas entre las superficies. En una atmósfera con oxígeno o humedad, se forma una capa de óxido que es más estable y reduce considerablemente el coeficiente de fricción del metal. Los materiales cerámicos gozan de una menor reactividad química por lo que en general poseerán menores coeficientes de fricción [5].

2.3. Desgaste, fatiga y vida útil

Existen dos tipos de desgaste, el desgaste adhesivo y el desgaste abrasivo. El desgaste adhesivo se da cuando la adhesión ($\mu_s > 5$) entre dos superficies es suficiente para desprender pedazos de material de una de las superficies con los esfuerzos cortantes siendo aplicados a los puntos de contacto. En casos de fricción entre materiales distintos, la superficie con menor esfuerzo de fluencia tiende a desgastarse, mientras que, en casos con el mismo material, ambas superficies experimentan desgaste [5].

El desgaste abrasivo es causado por partículas duras (también llamadas abrasivas) que, al poseer una mayor dureza que el material siendo desgastado, llegan a rayar, penetrar y remover material de la superficie. A menudo, las partículas abrasivas son provenientes de procesos de desgaste adhesivo o son producto de un entorno hostil [5].

El desgaste, ya sea adhesivo, abrasivo, o ambos, puede afectar el buen funcionamiento de un rodamiento o incluso promover la fatiga en los componentes de este debido a cargas desbalanceadas o asimétricas [6]. En rodamientos, el desgaste se encuentra en la forma de líneas en las pistas causados por la concentración de la carga debido a la ligera deformación elástica en la pista y en la esfera. La lubricación inadecuada del rodamiento es un factor clave en el desgaste de un rodamiento.

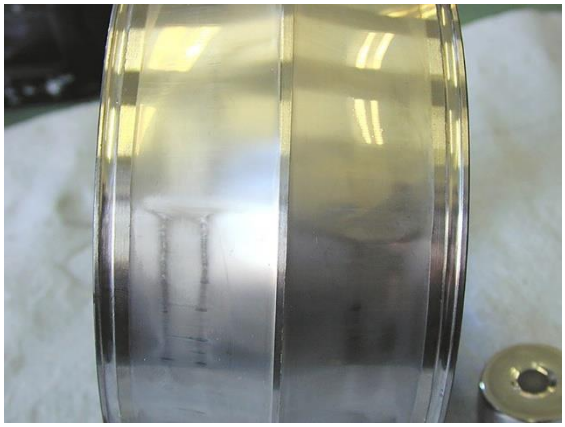

Figura 2: Desgaste abrasivo en una pista [6]

Por otro lado, la fatiga es un tipo de falla que ocurre en estructuras cuando éstas son sometidas a esfuerzos dinámicos y fluctuantes [7]. La fatiga es un problema común en metales, cerámicos y polímeros que ocurre después de largos períodos de solicitudes cíclicas. Según SKF, la fatiga en las superficies de contacto es la principal causa de falla en los rodamientos [8]. Un estudio realizado por Parker y Zaretsky (1975) encontró que no hay una diferencia importante entre la tendencia a la fatiga de rodamientos de acero y la tendencia a la fatiga de rodamientos de nitruro de silicio [9].

Es importante mencionar que un aumento en temperatura resulta en una mayor tendencia a que ocurra un fallo por fatiga. Este tipo de fallos son repentinos, catastróficos y sin advertencia alguna [7]. Por esta razón, toda aplicación debe considerar el tipo de solicitaciones y el rango de temperatura de operación de cada estructura con cuidado. Es importante establecer una vida útil para cada componente para reemplazar adecuadamente las piezas necesarias y evitar un imprevisto.

2.4. Lubricación

Como ya se mencionó, la fricción entre superficies es un proceso que disipa el trabajo en forma de calor. Para eficientizar un proceso mecánico, así como controlar la temperatura, es necesario reducir la fricción entre las distintas superficies. Una manera para disminuir estas pérdidas es mediante el uso de un lubricante. En términos generales, un lubricante es una sustancia que puede soportar la fuerza normal que junta a las distintas superficies de tal manera que no haya contacto entre estas. Adicionalmente, el lubricante es capaz de responder rápidamente a los esfuerzos cortantes para facilitar el movimiento [5].

Al reducir la fricción entre las superficies, la lubricación ayuda a prevenir el desgaste adhesivo en los puntos de contacto y a alargar la vida útil de un rodamiento [6].

2.5. Nitruro de silicio

Según Ritzhaupt-Kleissl et. al (1992), el nitruro de silicio es uno de los materiales cerámicos más prometedores para la fabricación de bolas de rodamiento debido a algunas de sus propiedades macroscópicas [10]. Para empezar, cuenta con un bajo peso específico que es de gran utilidad en aplicaciones de peso crítico, además de reducir las cargas centrífugas en rodamientos que operan a altas velocidades. Por otro lado, este material no presenta comportamiento magnético y es un buen aislante eléctrico. El nitruro de silicio también cuenta con una dureza excepcional [11], lo cual reduce la abrasión causada por el contacto con otras piezas incluso con lubricación inadecuada o nula. Adicionalmente, este material cuenta con una elevada resistencia mecánica a la deformación plástica, lo cual les permite a las piezas fabricadas de nitruro de silicio conservar su geometría original por un mayor tiempo, haciendo a este cerámico un excelente candidato para su uso en maquinaria de precisión. Por último, el nitruro de silicio presenta buenas propiedades térmicas y es apto para ser utilizado bajo condiciones extremas de temperatura.

Los nitruros de silicio son materiales cerámicos constituidos por silicio y nitrógeno. De entre todos los nitruros de silicio, nos enfocaremos en el tritatetranitruro de silicio (Si_3N_4) debido a su considerablemente mayor disponibilidad. La alta disponibilidad se debe a la naturaleza relativamente inerte del material y a la facilidad de su producción [12]. El tritatetranitruro (de ahora en adelante será referido simplemente como nitruro de silicio) de silicio puede ser fabricado a partir de silicio pulverizado, dióxido de silicio o una solución de silicio en aluminio mediante su calentamiento a diversas temperaturas en el rango de 1250°C-1450°C en una atmósfera de nitrógeno [12]. Tales métodos culminan en nitruro de silicio en forma pulverizada que necesita de un proceso de densificación para poder formar piezas sólidas como bolas de rodamiento. Este procesamiento adicional es crucial para la aptitud de la pieza final en distintas aplicaciones, ya que factores como el tamaño de grano y la estructura cristalina influyen enormemente en las propiedades macroscópicas del material.

Figura 3: Bolas de rodamiento de nitruro de silicio

A pesar de la facilidad de producción del nitruro de silicio, el procesamiento necesario para la fabricación de componentes mecánicos con este material es complicado, costoso y en desarrollo [13]. Comúnmente en el campo de los cerámicos se puede utilizar la sinterización después del conformado, un proceso que busca utilizar calor y presión para fomentar uniones entre partículas con el objetivo formar un sólido de densidad controlada sin llegar al punto de

fusión del material [14]. Sin embargo, en el caso del nitruro de silicio, este material no puede ser calentado más allá de los 1850°C, ya que a esta temperatura se comienzan a disociar los constituyentes elementales del material [11]. Por esta razón, no es posible utilizar métodos comunes de sinterización sin añadir una cantidad considerable de aditivos. Tales aditivos presentan problemas en las piezas terminadas. Según Ritzhaupt-Kleissl et. al (1992), los aditivos adicionados al nitruro de silicio para su sinterización forman fases amorfas en los límites de grano de la pieza, lo cual deteriora las propiedades mecánicas [10]. Por estas razones, existe un gran desarrollo e investigación respecto al uso de métodos de densificación más especializados (como el sinterizado por plasma) y a la optimización de métodos existentes.

2.6. Aceros comúnmente utilizados

La norma ISO 683-17 establece categorías de acero para ser usados en rodamientos, la composición de numerosas aleaciones dentro de estas, así como límites de tolerancia para la presencia de cada elemento aleante [15]. Para este documento nos centraremos en la aleación 52100 definida en el estándar ASTM A 295 [16]. Esta aleación sigue los lineamientos encontrados en la norma ISO 683-17 y corresponde a la designación 100Cr6 dentro de esta.

Adicionalmente, estas especificaciones caracterizan algunas propiedades macro y microscópicas de la aleación como la dureza y el tamaño de grano. La composición por porcentaje másico, así como algunas de estas propiedades se encuentran en el cuadro 2.

Fracción masal (wt%)

Designación	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	O	Al
100Cr6 (ISO 683-172)	0.93-1.05	0.25-0.45	0.025	0.015	0.15-0.35	1.35-1.65		0.1	0.3	0.002	0.05
52100 (ASTM A 295)	0.93-1.05	0.25-0.45	0.025	0.015	0.15-0.35	1.35-1.60	0.25	0.1	0.3	.0015	0.05

Designación	Dureza máx. (Rockwell B)	Tamaño de grano (aprox.)[1]	Resistencia a la tracción
52100 (ASTM A 295)	HRB92	ASTM No. 8	760 (MPa)

[1] **Número de grano al ser templado desde temperaturas austeníticas normales**

Cuadro 2: Composición de los aceros

Podemos observar que el acero 51200 contiene porcentajes masales relativamente altos de carbono y cromo. Según el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de MIT (1996), un incremento en el contenido de carbono en un acero generalmente resulta en una aleación menos dúctil, pero con mayor resistencia [17]. Por otro lado, la presencia de Cromo aumenta la resistencia a la corrosión del material. Según Thomas (2019), la adición de Cromo en el acero para rodamientos se hizo a principios del siglo pasado para disminuir la velocidad de la transformación austenita-perlita y facilitar la producción de un acero martensítico duro [18]. El Níquel y el Cobre tienen un efecto similar. El Manganeso presente en la aleación permite que el acero sea laminado en caliente mientras que el Sulfuro y el Fósforo son elementos indeseables que reducen la ductilidad del acero, por lo que la fracción masal dada es la máxima cantidad permisible para el grado relevante. Tanto el silicio como el aluminio previenen la oxidación del metal y el aluminio adicionalmente promueve la formación de granos más finos. Por último, el Molibdeno aumenta la resistencia de la aleación a altas temperaturas y reduce la propensidad a la corrosión [17].

Las bolas de rodamiento de acero son maquinadas a partir de fragmentos de varillas de metal que son cortadas a un tamaño mayor que las esferas terminadas antes de cualquier proceso de endurecimiento [19]. Posteriormente, a estas piezas de acero se les aplica un proceso de

conformado en frío para otorgarles una forma esférica. Sin embargo, esta pieza cuenta con un exceso de material que se acumula en la zona que queda entre cada lado de la prensa. Este exceso es limado y posteriormente la pieza es lijada hasta obtener una geometría satisfactoriamente esférica. Por último, las bolas son sometidas a un proceso de endurecimiento por temple y son lavadas y clasificadas por grado.

Figura 4: Bolas de rodamiento de acero 52100

El proceso de temple en las bolas de rodamiento se lleva a cabo a una temperatura ligeramente menor a la temperatura eutectoide del acero. En el proceso de producción se modera la tasa de enfriamiento del metal. Esto permite obtener distintas microestructuras al término del proceso de endurecimiento [7]. Un enfriamiento rápido resultará en un acero martensítico, mientras que enfriamientos controlados con pausas a ciertas temperaturas (según un diagrama TTT) darán lugar a aceros perlíticos y bainíticos.

3. Desarrollo

Para poder hacer un análisis sobre el posible reemplazo de bolas de rodamiento de acero por bolas de rodamiento de nitruro de silicio, es necesario dividir las comparaciones entre los materiales en dos secciones; las propiedades macroscópicas y la microestructura de estos.

3.1. Propiedades Macroscópicas

Tomando al acero 51200 como representativo de las bolas de acero para rodamientos, podemos comparar las propiedades macroscópicas de ambos materiales (cuadros 3, 4, 5 y 6). Todos los datos sobre el nitruro de silicio son promediados de los extremos proporcionados por Azo Materials. A diferencia del acero 52100 que tiene una composición bien definida, existen piezas de nitruro de silicio con propiedades diferentes unas de otras. El proceso de

manufactura, así como los aditivos y el procesamiento de la pieza tienen un efecto sobre las propiedades macroscópicas del material que es mayor a aquel encontrado en el acero.

Material	Densidad	Capacidad Térmica	Expansividad Térmica	Conductividad Térmica	Máxima temperatura de operación
Acero 52100	7810 (kg/m^3)	502.4 (J/kgK)	11.9 (μm/mC)	46.6 (W/mK)	430 (C)
Nitruro de Silicio	2.81 (kg/m^3)	886.5 (J/kgK)	2.55 (μm/mC)	26.5 (W/mK)	1165 (C)

Cuadro 3: Datos obtenidos de Azo [11]**,** [20]

Se puede observar que el nitruro de silicio es significativamente más ligero mientras que posee propiedades térmicas muy superiores a las del acero en cuestión. La baja densidad del material permite su utilización en aplicaciones de peso crítico, además de reducir las fuerzas centrífugas producidas en la operación a altas velocidades. La reducción de estas fuerzas reduce la fricción entre las bolas y la pista del rodamiento al disminuir la fuerza normal al punto de contacto entre estas. Esta menor fricción aumentará la eficiencia mecánica del rodamiento, cortará el incremento de temperatura asociado a su operación y disminuirá el desgaste adhesivo sobre las superficies. Un menor desgaste adhesivo incrementará la vida útil del rodamiento al conservar la geometría original del rodamiento por un mayor tiempo, reduciendo también las cargas desbalanceadas que promueven la fatiga en el material.

En términos de las propiedades térmicas de los materiales, la elevada capacidad térmica del nitruro de silicio le permite absorber una mayor cantidad de calor, lo cual reduce la severidad de los cambios bruscos en las condiciones de operación. Adicionalmente, la expansividad térmica es significativamente menor, lo cual significa que incluso bajo condiciones elevadas de temperatura, las bolas de rodamiento conservarán mejor su precisión dimensional. En cuestión de la conductividad térmica, podemos observar que el nitruro de silicio es un buen aislante a comparación del acero 51200. Esta observación es importante, pero la cualidad deseada dependerá de la aplicación. Por último, podemos observar que la máxima temperatura de operación mecánica es mucho mayor para el nitruro de silicio, lo cual significa que en gran medida conservará sus propiedades mecánicas a esas elevadas temperaturas.

Material	Módulo de Young	Módulo de Compresibilidad	Módulo de Cizalladura	Coeficiente de Poisson	Dureza
Acero 52100	200 (GPa)	140 (GPa)	80 (GPa)	0.285	848 (Vickers)
Nitruro de Silicio	231 (GPa)	180.5 (GPa)	96.15 (GPa)	0.255	19250 (Vickers)

Cuadro 4: Datos obtenidos de Azo

El módulo de elasticidad (módulo de Young) es similar para los materiales y en un rodamiento, una bola no experimenta esfuerzos a tracción, por lo que no es de demasiada importancia. Sin embargo, el módulo de compresibilidad (bulk modulus) determina la elasticidad del material bajo esfuerzos de compresión. Según Morales-Espejel (2019), un rodamiento opera bajo una deformación elástica tanto en las esferas como en las pistas [6]. Un mayor módulo de compresibilidad reduciría esta deformación y permitiría conservar la geometría original. Sin embargo, siendo el nitruro de silicio un material frágil, esta menor elasticidad compresiva debe de ser acompañada por menores tolerancias en la fabricación de las bolas para evitar una ruptura. En términos de la fricción, Ashby dice que la deformación que ocurre en las asperezas de las superficies es mayormente plástica [5]. Sin embargo, en el pequeño rango elástico de este fenómeno, un mayor módulo de compresibilidad reduce la deformación elástica y disminuye el área de contacto entre las asperezas. De similar manera, la deformación cortante que existe en los procesos de fricción es plástica, por lo que el módulo de cizalladura no es de mayor importancia, ya que fuera de la fricción, las esferas no experimentan esfuerzos cortantes.

Para una bola de rodamiento, la dureza del material es importante, ya que influye sobre la vida útil del rodamiento. La dureza es la resistencia de un material a ser rayado o penetrado, por lo que un material más duro sufrirá un menor desgaste tanto adhesivo como abrasivo. Adicionalmente, usando esta definición de dureza, podemos considerar que es una medida que tiene que ver con el esfuerzo de fluencia a compresión en la superficie de los materiales. Según Ashby, esto significa que para materiales duros, la deformación plástica en las asperezas de las superficies será menor, por lo que el área de contacto incrementará más lentamente. Sin embargo, por lo general los materiales duros poseen uniones átomo-átomo de mayor fuerza, lo que causará que la unión entre las superficies en contacto sea mayor. Esto significa que, en sistemas sin lubricación, es preferible buscar contactos de un material duro con un material blando (**Ashby**) para minimizar la fricción entre ellos, aunque esto acelere el desgaste en el material blando. Sin embargo, al utilizar lubricación adecuada, la mayor fuerza de unión se vuelve irrelevante y los materiales duros necesariamente experimentan una menor fricción.

En el caso del nitruro de silicio, existe una gran varianza respecto a la dureza del material. Esto se debe a que existen tres microestructuras que pueden ser favorecidas durante el proceso de producción. Cada una de estas microestructuras presenta una dureza distinta, siendo la microestructura cúbica la que presenta mayor dureza (35.31 GPa) [21].

Por último, ha de ser mencionado que un acero puede llegar a exhibir comportamiento magnético y eléctricamente conductivo [7]. Por otra parte, el nitruro de silicio no exhibe ninguno de estos comportamientos.

Material	Magnetismo	Conductividad
Acero 52100	Si	Si
Nitruro de Silicio	No	No

Cuadro 5: Datos obtenidos de Azo

3.2. Microestructura

El nitruro de silicio presenta tres estructuras cristalográficas distintas; una trigonal, correspondiente a la fase α del sistema Si-N, una hexagonal, correspondiente a la fase β de este mismo sistema y una cúbica correspondiente a la fase γ [21], [22]. La fase con mayor dureza es el nitruro de silicio gamma, aunque esta necesita de un proceso de fabricación a altas presiones y temperaturas para poder existir [21]. La fase beta es la más estable de las tres, aunque presenta la menor dureza superficial. Esto significa que, al someterse a elevadas temperaturas, el material se transformará a la fase beta. Por estas razones, esta fase es la más común en el mercado.

Por otro lado, el acero 52100 para rodamientos es sometido a un proceso de endurecimiento al enfriar de manera controlada la bola de rodamiento en estado austenítico. El resultado de este proceso puede ser un acero martensítico, perlítico o bainítico dependiendo de la ruta de enfriamiento.

La martensita es una microestructura metaestable del acero que es producto de una transformación sin difusión de la austenita. Se obtiene al enfriar rápidamente la pieza austenítica de acero. La temperatura inicial del enfriamiento, así como la temperatura final de este, influyen en la dureza final de la pieza. Es común, sin embargo, volver a calentar la pieza lentamente a una menor temperatura que la temperatura de austenización para liberar las cargas internas formadas durante el enfriamiento y así reducir la posibilidad de una ruptura súbita, sacrificando dureza por ductilidad [23]. La martensita es la fase más dura del acero, lo cual hace a los aceros martensíticos necesariamente frágiles. Esta fragilidad se hace más severa al incrementar el porcentaje de carbono en la aleación, lo cual promueve la formación de láminas martensíticas (en lugar de agujas) que fomentan la creación de microgrietas en el material. La concentración necesaria de carbono para comenzar la formación de martensita laminar es aproximadamente la eutectoide. Sin embargo, la adición de cromo en aleaciones como la 52100 puede trasladar este punto de tal manera que es posible obtener aceros altos en carbono en un estado martensítico no laminar [23].

La perlita es una microestructura del acero compuesta por laminas alternantes de ferrita y cementita [7]. Esta microestructura cuenta con la menor dureza de las tres microestructuras endurecidas del acero. Como la dureza es una propiedad fundamental para una bola de rodamiento, los aceros perlíticos no son utilizados en este campo.

La bainita es producto de una transformación austenítica que consta de de una dispersión fina de cementita dentro de ferrita. La bainita tiene una dureza máxima menor a aquella de la martensita, aunque al intentar aumentar la ductilidad en la martensita mediante un segundo calentamiento, se pueden obtener niveles equivalentes de dureza con respecto a la martensita [7]. Sin embargo, cuando se tienen aleaciones altas en carbono, donde comienza la formación de la martensita laminar que fragiliza al acero, es posible encontrar, para un nivel de dureza martensítico dado, uno similar de bainita con una menor fragilidad.

4. Resultados

Teniendo en cuenta los extremos de temperatura encontrados en el campo espacial, las propiedades térmicas del nitruro de silicio vuelven a este material una opción cualitativamente superior al acero para las bolas de rodamiento. Adicionalmente, la adhesión entre metales no lubricados en un el espacio exterior es un problema disminuido mediante el uso de bolas de rodamiento de nitruro de silicio que son más estables químicamente [5]. El menor grado de atención y mantenimiento requeridos para el funcionamiento correcto de estos componentes también constituye una ventaja considerable para aplicaciones especializadas donde el servicio de los sistemas mecánicos es complicado. Sin embargo, al tener en cuenta que el 90% de los rodamientos falla por fatiga del material y que el estudio de Parker & Zaretsky concluyó que no había una diferencia considerable entre la tendencia a la fatiga de los rodamientos de nitruro de silicio y los rodamientos de acero, podemos concluir que no existe una mejora significativa en la vida útil de un rodamiento de nitruro de silicio [6], [9].

5. Conclusiones

Las excelentes propiedades térmicas y mecánicas del nitruro de silicio lo hacen una opción atractiva para fabricar bolas de rodamiento para aplicaciones espaciales. Existen ventajas definitivas sobre las soluciones existentes de acero en cuanto a su eficiencia mecánica y su operación en entornos hostiles, aunque no haya una mejora significativa en la vida útil de estos componentes. Sin embargo, el campo del nitruro de silicio es uno con mucha oportunidad para la optimización en áreas de producción, procesamiento e implementación. Mejores métodos de producción, así como procesos de sinterizado optimizados resultarían en un menor costo y en mejores propiedades macroscópicas.

6. Referencias

[1] D. B. Marghitu and J. D. Irwin, *Mechanical Engineer's Handbook*, 1st ed. Auburn: Academic Press, 2001.

[2] International Organization for Standardization, "Rolling bearings - Radial bearings - Geometrical product specifications (GPS) and tolerance values," *ISO*, vol. 492, 2014.

[3] International Organization for Standardization, “Rolling bearings - Balls - Ceramic balls,” *ISO*, vol. 3290, no. 2, 2014.

[4] International Organization for Standardization, “Rolling bearings - Balls - Steel balls,” *ISO*, vol. 3290, no. 1, 2014.

[5] M. F. Ashby and D. R. H. Jones, *Materiales para ingeniería 1*, 1a ed. Editorial Reverté, 2008.

[6] G. E. Morales-Espejel, “Wear and Surface Fatigue in Rolling Bearings,” *Evolution*, 2019.

[7] W. D. Callister, *Fundamentals of materials science and engineering*, 5a ed. John Wiley & Sons, 2001.

[8] SKF, “Rodamientos,” *Grupo SKF*, 2015.

[9] R. J. Parker and E. v. Zaretsky, “Fatigue Life of High-Speed Ball Bearings With Silicon Nitride Balls,” *J. Lubr. Technol.*, vol. 97, no. 3, pp. 350–355, 1975, doi: 10.1115/1.3452596.

[10] H.-J. Ritzhaupt-Kleissl, A. Kühne, and R. Oberacker, “Optimized Fabrication of Silicon Nitride Ball Bearing Parts BT - Hot Isostatic Pressing— Theory and Applications,” 1992, pp. 165–170. doi: 10.1007/978-94-011-2900-8_26.

[11] AZO Materials, “Silicon Nitride (Si3N4) Properties and Applications,” 2001. https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=53

[12] J. W. Mellor, *A Comprehensive Treatise on Inorganic and Theoretical Chemistry*, vol. 8. Longmans, Green and Co., 1931.

[13] G. Ziegler, J. Heinrich, and G. Wötting, “Relationships between processing, microstructure and properties of dense and reaction-bonded silicon nitride,” *J. Mater. Sci.*, vol. 22, no. 9, pp. 3041–3086, 1987, doi: 10.1007/BF01161167.

[14] R. M. German, *Sintering theory and practice*, 1a ed. John Wiley & Sons, 1996.

[15] International Organization for Standardization, “Heat-treated steels, alloy steels and free-cutting steels - Ball and roller bearing steels,” *ISO*, vol. 683, no. 17, 2014.

[16] ASTM, “Standard Specification for High-Carbon Anti-Friction Bearing Steel,” *ASTM*, vol. A 295, 2005.

[17] MIT Department of Civil and Environmental Engineerin, “Chemical Composition of Structural Steels,” 1999. http://web.mit.edu/1.51/www/pdf/chemical.pdf

[18] L. Thomas, “History and Properties of 52100 Steel,” 2019. https://knifesteelnerds.com/2019/01/28/history-and-properties-of-52100-steel/

[19] K. Thayer, “How are bearing balls made?,” 2019. https://insights.globalspec.com/article/12349/how-are-bearing-balls-made

[20] AZO Materials, “AISI 52100 Steel (UNS G52986),” 2012. https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6704

[21] J Z Jiang, F Kragh, D J Frost, K StÃ¥hl, and H Lindelov, “Hardness and thermal stability of cubic silicon nitride,” *J. Phys. Condens. Matter*, vol. 13, no. 22, pp. L515–L520, 2001, doi: 10.1088/0953-8984/13/22/111.

[22] hardmaterials.de, “Crystal structures of Si3N4.” http://www.hardmaterials.de/html/alpha-si3n4__beta-si3n4.html

[23] L. Thomas, “Bainite vs Martensite - The Secret to Ultimate Toughness?,” 2018. https://knifesteelnerds.com/2018/07/09/bainite-vs-martensite/