

25

Fecha de presentación: enero, 2024

Fecha de aceptación: junio, 2024

Fecha de publicación: julio, 2024

ESTRATEGIAS

PARA LA IDENTIFICACIÓN DE MATERIALES EN RODAMIENTOS: UN ENFOQUE PRÁCTICO PARA PERSONAL TÉCNICO

STRATEGIES FOR THE IDENTIFICATION OF MATERIALS IN BEARINGS: A PRACTICAL APPROACH FOR TECHNICAL PERSONNEL

Jorge Andrés Rodas Buenaño ^{1*}

E-mail: ua.jorgerb85@uniandes.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-5786-5262>

Giovanny Vinicio Pineda Silva ¹

E-mail: ua.giovannypineda@uniandes.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4159-2156>

Antonio Gabriel Castillo Medina ¹

E-mail: ua.antonio83@uniandes.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0045-7495>

Esteban Fernando López Espinel ¹

E-mail: ua.estebanle84@uniandes.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7502-3463>

*Autor para correspondencia

¹ Universidad Regional Autónoma de Los Andes, Ambato, Ecuador.

Cita sugerida (APA, séptima edición)

Rodas Buenaño, J., A., Pineda Silva, G. V., Castillo Medina, A. G. & López Espinel, E. (2024). Estrategias para la identificación de materiales en rodamientos: un enfoque práctico para personal técnico. *Universidad y Sociedad*, 16(4), 242-253.

RESUMEN

La identificación eficiente de materiales en rodamientos y la selección adecuada son desafíos críticos en la ingeniería mecánica. Este estudio aborda estos desafíos con el objetivo general de desarrollar estrategias prácticas para capacitar al personal técnico en la toma de decisiones sobre la adquisición de rodamientos. Los resultados revelan que, a pesar de compartir geometría y composición, la resistencia mecánica varía significativamente entre rodamientos de diferentes marcas. La composición química y el proceso de fabricación emergen como factores clave en esta variación. Las estrategias propuestas enfatizan la evaluación integral y la adaptabilidad a condiciones operativas específicas. Se concluye que al implementar estas estrategias puede mejorar la eficiencia y confiabilidad de los sistemas mecánicos en entornos industriales ecuatorianos.

Palabras clave: Equipos, Rendimiento mecánico, Cargas extremas, Fuerzas de contacto.

ABSTRACT

Efficient identification of bearing materials and proper selection are critical challenges in mechanical engineering. This study addresses these challenges with the overall goal of developing practical strategies to train technical personnel in bearing procurement decision making. The results reveal that, despite sharing geometry and composition, the mechanical resistance varies significantly between bearings of different brands. The chemical composition and manufacturing process emerge as key factors in this variation. The proposed strategies emphasize comprehensive evaluation and adaptability to specific operating conditions. It is concluded that by implementing these strategies you can improve the efficiency and reliability of mechanical systems in Ecuadorian industrial environments.

Keywords: Equipment, Mechanical performance, extreme loads, Contact forces.

INTRODUCCIÓN

Los rodamientos constituyen componentes mecánicos con la capacidad de transmitir movimiento entre múltiples partes dentro de una máquina. Al aplicar una fuerza externa, los componentes que ruedan, junto con sus anillos, tienden a iniciar un patrón de movimiento repetitivo entre sí. Esto conduce a un tipo de contacto que varía y genera niveles elevados de tensiones en la superficie. Debido a que estos componentes experimentan innumerables ciclos durante su vida útil, estas tensiones cíclicas pueden ocasionar la formación de grietas y, como resultado, provocar fallos debido al desgaste causado por el contacto constante (Villa-Covarrubias et al., 2020).

Al tener una tasa de confiabilidad del 90% han sido utilizados durante décadas en una amplia gama de equipos, desde grandes bombas, turbinas hidráulicas, vehículos, hasta electrodomésticos y juguetes. A lo largo de los años, se han realizado modificaciones graduales en los rodamientos para mejorar su vida útil, capacidad de carga, velocidad y eficiencia. Como resultado, actualmente hay una amplia variedad de rodamientos disponibles en el mercado, en diferentes tipos y tamaños (Ma et al., 2024).

Conforme aumenta la demanda de eficiencia energética y confort, los rodamientos de rueda han evolucionado hacia unidades más compactas, al ser esenciales para los automóviles y cumplir el rol de establecer una conexión entre el eje de transmisión y la rueda (Liu et al., 2024). El rodamiento falla necesariamente debido a la fatiga por contacto de rodadura entre la bola y el camino de rodadura del aro interior o exterior (Shao et al., 2024). Dado que en el campo automotriz se requieren rodamientos que puedan utilizarse durante mucho tiempo sin sufrir daños.

Según la teoría del estrés por contacto, presentada por Hertz en 1881, y su aplicación en el análisis matemático de la geometría de la forma, el área de contacto y la distribución de tensiones entre objetos con superficies curvas (Ma et al., 2022). La teoría de Hertz se amplía para destacar que las tensiones máximas, responsables de la fractura de los rodamientos de bolas (Luo et al., 2024), que se generan específicamente bajo la superficie de contacto.

Se subraya la necesidad de entender las tensiones tridimensionales generadas en el área de contacto, al ser cruciales para evaluar la resistencia de componentes mecánicos. La teoría de Hertz fundamenta la evaluación de tensiones y deformaciones en el punto de contacto entre elementos rodantes y trayectorias de rodadura (Köhn et al., 2020). Existen tres modos de manifestación de fuerzas de contacto:

- El primero ocurre cuando una esfera o rodillo se ejerce sobre una superficie plana,
- El segundo cuando dos esferas o rodillos se comprimen entre sí, y
- El tercero cuando un rodillo o esfera se presiona sobre una superficie curva cóncava.

La región de contacto se deforma al aplicar fuerza sobre dos objetos, al asumir formas elípticas, circulares o rectangulares al depender de la geometría de los objetos. En el caso específico examinado, la teoría de Hertz se aplica cuando una bola entra en contacto con la pista externa, al cumplir condiciones como materiales uniformes, áreas de contacto pequeñas en comparación con el radio de curvatura, comportamiento elástico de las superficies en contacto y carga perpendicular a las superficies de contacto.

El enfoque de estudio de Hertz se utiliza para analizar parámetros clave que afectan el comportamiento de los rodamientos, como la geometría, la carga aplicada y las propiedades del material (Tian et al., 2024). De modo que permite la identificación de las causas subyacentes de las fallas de los rodamientos (Xu et al., 2023). Las fallas en los rodamientos, especialmente en los de las ruedas, se deben a la fatiga por contacto de rodadura entre la bola y el camino de rodadura del aro interior/exterior. De modo que se clasifican en tipos de bolas y rodillos cónicos según el elemento rodante y la carga del vehículo (Yang et al., 2023).

Para ello, se introduce el módulo de Young como un parámetro que describe el comportamiento elástico de un material, especialmente en tracción y compresión. Este módulo es constante en un material elástico lineal e isotrópico, y es siempre mayor que cero, según el científico Thomas Young.

Selección e identificación de materiales en rodamientos.

La elección del método y la técnica depende del tipo de material del rodamiento y del nivel de detalle requerido para la identificación. Además, la disponibilidad de equipos y la capacitación del personal técnico son factores cruciales para la implementación exitosa de estas técnicas en el contexto industrial en Ecuador o cualquier otro país. Entre las técnicas y los métodos de selección se encuentran:

1. Espectrometría de rayos X (EDX y WDX):
 - Descripción: Esta técnica analítica se utiliza para determinar la composición química de los materiales en rodamientos. La Espectrometría de Rayos X de Energía Dispersiva (EDX) y de Longitud de Onda Dispersiva

(WDX) son métodos que identifican elementos químicos y sus concentraciones.

- Aplicabilidad: Ampliamente utilizada para la identificación de aleaciones metálicas en rodamientos. Proporciona información sobre la composición de aceros y otros materiales.

2. Espectrometría de masas:

- Descripción: Técnica que mide la masa y la carga de iones, al proporcionar información sobre la composición atómica y molecular del material.

- Aplicabilidad: Puede ser útil para analizar la composición de elementos en materiales no metálicos en rodamientos.

3. Microscopía electrónica de barrido (SEM):

- Descripción: Proporciona imágenes detalladas de la superficie y permite el análisis de la composición química a nivel microscópico.

- Aplicabilidad: Útil para examinar la morfología y composición de las superficies de los rodamientos, al identificar posibles defectos o desgastes.

4. Espectroscopía Raman:

- Descripción: Mide las vibraciones moleculares, al proporcionar información sobre la estructura molecular del material.

- Aplicabilidad: Puede ser valiosa para identificar materiales poliméricos o compuestos orgánicos en rodamientos.

5. Análisis de difracción de rayos X (XRD):

- Descripción: Identifica la estructura cristalina de los materiales, al ser útil para la identificación de fases en aleaciones y compuestos.

- Aplicabilidad: Permite caracterizar la estructura cristalina de los elementos presentes en los rodamientos.

Influencia de la composición química en el rendimiento mecánico de los rodamientos.

En Ecuador, donde las condiciones climáticas pueden variar desde ambientes húmedos en la costa hasta condiciones más secas en regiones interiores o de mayor altitud, la resistencia a la corrosión y al desgaste se vuelve crucial. Por lo tanto, la composición química de los rodamientos debe adaptarse para garantizar un rendimiento óptimo en diferentes entornos. Entre las características de estos elementos a tener en cuenta se encuentran:

I- Cromo (Cr):

- Impacto: El cromo es fundamental para mejorar la resistencia a la corrosión y al desgaste en ambientes hostiles. Rodamientos con contenido de cromo, como

los aceros inoxidable, son más adecuados para condiciones adversas y húmedas, como en ciertas regiones de Ecuador.

II-Carbono (C):

- Impacto: La cantidad de carbono influye en la dureza del acero. Cuanto mayor sea el contenido de carbono, mayor será la dureza, pero esto puede aumentar la fragilidad. La selección cuidadosa del contenido de carbono es esencial para equilibrar la dureza y la tenacidad del material en rodamientos.

III-Fósforo (P) y Azufre (S):

- Impacto: Ambos elementos son considerados impurezas y pueden afectar la maquinabilidad y la tenacidad del acero. Contenidos excesivos de fósforo y azufre pueden contribuir a la formación de inclusiones no metálicas, al debilitar el material.

IV-Manganeso (Mn) y Silicio (Si):

- Impacto: Estos elementos se utilizan para desoxidar el acero. El manganeso mejora la tenacidad y la resistencia, mientras que el silicio contribuye a la resistencia y la maquinabilidad. Un equilibrio adecuado es crucial para garantizar un buen rendimiento.

V-Níquel (Ni), Molibdeno (Mo) y Cobre (Cu):

- Impacto: Estos elementos pueden mejorar la resistencia a la corrosión y al desgaste. La adición de níquel, molibdeno y cobre puede proporcionar propiedades mejoradas en ciertos entornos, especialmente en áreas donde la corrosión es un desafío, como en climas tropicales o húmedos.

VI-Vanadio (V) y Titanio (Ti):

- Impacto: Estos elementos pueden contribuir a la formación de carburos, al mejorar la resistencia al desgaste. Sin embargo, su presencia debe controlarse para evitar la formación excesiva de carburos, que podría debilitar el material.

La selección de materiales con propiedades equilibradas y específicas para las condiciones locales contribuye a la durabilidad y la eficiencia de los rodamientos en aplicaciones industriales en Ecuador. Por tanto, se hace necesario en las entidades tener un personal técnico formado y preparado en el momento de realizar la compra y adquisición de los rodamientos. Por ende, el presente estudio tiene como objetivo general desarrollar un conjunto de prácticas para la identificación eficiente de materiales en rodamientos, orientadas a capacitar al personal técnico encargado de la selección y aprobación de ofertas de compra. Con el fin de optimizar la toma de decisiones en la adquisición de rodamientos y garantizar un rendimiento mecánico superior. Entre los objetivos específicos se encuentran:

- Evaluar y analizar el rendimiento en términos de resistencia y comportamiento mecánico entre el rodamiento Ishinomoto 6007- 2RSC3 y el rodamiento NTN 6007LLUC3 al aplicar a la teoría de contacto de Hertz.
- Proveer propuestas, estrategias y buenas prácticas basadas en los resultados obtenidos, con el objetivo de mejorar la toma de decisiones en la identificación de materiales y la selección de rodamientos por parte del personal técnico.
- Desarrollar material didáctico y recursos de capacitación que faciliten la comprensión y aplicación de las estrategias propuestas, al asegurar la transferencia efectiva de conocimientos al personal técnico.

MATERIALES Y MÉTODOS

El proceso de investigación se ha basado en el análisis del contacto mecánico de dos rodamientos de misma geometría y diferente procedencia. Con el fin de evaluar el rendimiento de los materiales utilizados por los diferentes fabricantes, para establecer una diferencia o similitud entre los mismos mediante el cálculo de contacto mecánico de Hertz y pruebas experimentales de compresión.

Los objetos seleccionados para el desarrollo de la investigación son rodamientos de una hilera de bolas de eje delantero comercializados en el Ecuador para el vehículo liviano Suzuki Forza. Entre los objetos de prueba se encuentran uno de las marcas comerciales NTN modelo 6007LLUC3 e ISHINOMOTO modelo 6007- 2RSC3 (ver figuras 1 a la 5).

Fig 1: Cojinetes a ser analizados.



Fuente: Elaboración propia.

Fig 2: Rodamiento NTN 6007LLUC3 seccionado.



Fuente: Elaboración propia.

Fig 3: Rodamiento Ishinomoto 6007-RS C3 seccionado.



Fuente: Elaboración propia.

En primera instancia se obtuvo las dimensiones de los rodamientos necesarias para el cálculo del área de contacto mecánico a través de labores metrológicas. En este primer acercamiento se verifica que las geometrías de los dos tipos de rodamientos comparten las mismas dimensiones.

Fig 4: Toma de medidas pistas de rodadura.



Fuente: Elaboración propia.

Fig 5: Toma de medidas de bola de rodamiento.



Fuente: Elaboración propia.

Para la determinación del material de cada bola y pista de los dos rodamientos se utiliza el método de ensayo de espectrometría por rayos X el cual arroja composición química de cada componente. Con los resultados de este análisis se pudo determinar el material utilizado en la fabricación de cada componente, al establecer el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson, datos primordiales para establecer la presión máxima de contacto.

Por otro lado, se determinaron las cargas que soporta el rodamiento mediante el pesaje del vehículo en básculas individuales por cada rueda. Se evidencia que el peso que soporta cada rodamiento del eje delantero es de 215 kg que equivalen a una fuerza de 2109 N. Se aplican las siguientes fórmulas de teoría de contacto mecánico de Hertz para obtener el tamaño de la elipse de contacto

y la carga máxima del área de contacto. Se definen las siguientes ecuaciones:

Módulo de elasticidad relativo (ecuación 1):

$$E' = \frac{2E_A E_B}{(1 - \nu_A^2)E_B + (1 - \nu_B^2)E_A} \quad (1)$$

Donde:

E' = Módulo de elasticidad equivalente

E_A = Módulo de elasticidad del elemento bola

E_B = Módulo de elasticidad del elemento pista

ν_A = Coeficiente de Poisson del elemento bola

ν_B = Coeficiente de Poisson del elemento pista

Radio de contacto en el eje x (ecuación 2):

$$\frac{1}{R_x} = \frac{1}{r_{Ax}} + \frac{1}{r_{Bx}} \quad (2)$$

Donde:

R_x = radio en el eje x

r_{Ax} = radio de la bola en el eje x

r_{Bx} = radio de la pista en el eje x

Radio de contacto de la pista (ecuación 3):

$$\frac{1}{R_y} = \frac{1}{r_{Ay}} + \frac{1}{r_{By}} \quad (3)$$

Donde:

R_y = radio en el eje y

r_{Ay} = radio de la bola en el eje y

r_{By} = radio de la pista en el eje y

Radio equivalente sobre una superficie plana (ecuación 4):

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_y} \quad (4)$$

Integrales elípticas completas del primer y segundo tipo (ecuación 5 y 6):

$$\xi = 1.0003 + \frac{0.5968}{\frac{R_x}{R_y}} \quad (5)$$

$$\Psi = 1.5277 + 0.6023 \ln \left(\frac{R_x}{R_y} \right) \quad (6)$$

La relación de elipticidad (k) es una función de los radios principales de los sólidos en contacto solamente (ecuación 7).

$$\bar{k} = 1.0339 \left(\frac{R_x}{R_y} \right)^{0.6360} \quad (7)$$

Los ejes semi-mayor (a) y semi-menor (b) de la elipse de contacto y la deformación (δ) en el centro del contacto (ecuación 8, 9 y 10) y se representan según la figura 6.

$$a = \left(\frac{6k^2 \xi W R}{\pi E'} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

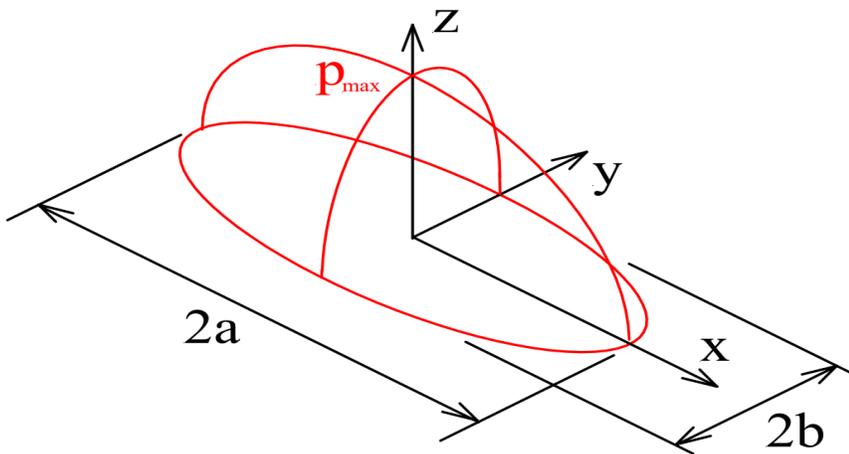
$$b = \left(\frac{6 \xi W R}{\pi k E'} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

$$\delta = \Psi \left[\left(\frac{9}{2 \xi R} \right) \left(\frac{W}{\pi k E'} \right)^2 \right]^{\frac{1}{3}} \quad (10)$$

Presión máxima en la elipse de contacto (ecuación 11).

Fig 6: Área elíptica de contacto ($2a$), ($2b$), (δ) y P_{max} .

$$P_{max} = \frac{3W}{2\pi ab} \quad (11)$$



Fuente: Elaboración propia.

Para determinar el rendimiento de los rodamientos sometidos a la carga normal, estos son sometidos a ensayos de compresión donde se aplicó la fuerza antes mencionada de 2109 N para corroborar el tamaño de los ejes de la elipse. Basados en estos resultados se someten posteriormente a nuevos ensayos de compresión y en este caso se llega a dos valores. El primero a un valor aproximado de 48KN y el segundo a punto de rotura máximo para determinar la resistencia máxima del material de cada componente y evidenciar una diferencia clara entre los rodamientos en estudio. Con estos resultados se verifican los cálculos de contacto mecánico con la fuerza máxima aplicada en los ensayos físicos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de las mediciones de las geometrías de los dos rodamientos arrojaron que la bola cuenta con un diámetro de 7,94 mm y la pista cuenta con un radio de curvatura de 3,97mm en los dos rodamientos para ser utilizados en los cálculos de contacto de Hertz. Para desarrollar los cálculos de contacto mecánico es necesario conocer el tipo de material involucrado en el contacto. Para ello, se ha realizado una espectrometría de rayos X a los elementos pista exterior, bola y pista interior de cada rodamiento ensayo. De modo que ha arrojado los siguientes resultados de

composición química del rodamiento Ishinomoto 6007-2RSC3 según la tabla 1. Mientras que se muestra la composición química de del rodamiento NTN 6007LLUC3 en la tabla 2.

Tabla 1: Composición química rodamiento Ishinomoto 6007- 2RSC3.

ISHINOMOTO									
Componente/aleación	Fe	Cr	Co	Mn	Si	P	S	Cu	Mo
Pista exterior	97.59%	1.27%	0.53%	0.28%	0.135%	0.128%	0.071%	-	-
Bola	96.82%	1.15%	0.6%	0.28%	0.51%	0.4%	0.23%	-	-
Pista interior	98.01%	1.31%	-	0.31%	0.152%	0.134%	0.092%	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2: Composición química rodamiento NTN 6007LLUC3.

NTN									
Componente/aleación	Fe	Cr	Co	Mn	Si	P	S	Cu	Mo
Pista exterior	97.47%	1.29%	0.38%	0.38%	0.138%	0.129%	0.057%	0.12%	0.034%
Bola	96.39%	1.04%	-	0.44%	0.85%	0.8%	0.47%	-	-
Pista interior	97.39%	1.32%	0.42%	0.45%	0.163%	0.158%	0.1%	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Se pudo determinar que los dos rodamientos están fabricados con una aleación de acero inoxidable con un porcentaje de cromo de entre el 1,04% y el 1,32%. El módulo de elasticidad correspondiente a un acero inoxidable es de aproximadamente 200 GPa y el coeficiente de Poisson es de 0,3. Con estos valores se pudo calcular el módulo de elasticidad equivalente, así como los valores de las ecuaciones descritas anteriormente al obtener una carga de 2109N (ver tabla 3).

Tabla 3: Resultados cálculo teoría de contacto de Hertz para los rodamientos ISHINOMOTO y NTN.

b=	2075.929 μm
2b=	4151.859 μm
$\bar{\psi}$ =	1.945
δ =	121.97 μm
Pmax=	3319.26 Mpa

Fuente: Elaboración propia.

Los dos rodamientos al compartir geometría, dimensiones y material una vez sometidos a ensayos de compresión a la carga de 2109N evidencian un comportamiento similar y describieron el área elíptica de contacto con las medidas de $2a= 2,35\text{mm}$, $2b= 1,46\text{ mm}$ y δ de 0,015mm de la tabla 3. Posteriormente dos ejemplares adicionales fueron ensayados a una fuerza de aproximadamente 48KN para evidenciar un área aumentada en cuanto a valores de los ejes semi-mayor (a) y semi-menor (b) (ver tabla 4 y 5).

Tabla 4: Resultados cálculo teoría de contacto de Hertz para rodamiento ISHINOMOTO a 48135 N.

$R_x=$	0.0793 m
$R_y=$	0.039 m
$R=$	0.026 m
$R_x/R_y=$	2
$\xi=$	1.298
$k^- =$	1.606
$E'=$	$219.78 \cdot 10^9$ Pa
$a=$	3335.386 μm
$2a=$	6670.773 μm
$b=$	2075.929 μm
$2b=$	4151.859 μm
$\psi^- =$	1.945
$\delta=$	121.97 μm
$P_{\text{max}}=$	3319.26 Mpa

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5: Resultados cálculo teoría de contacto de Hertz para rodamiento NTN a 48150 N.

$R_x=$	0.0793 m
$R_y=$	0.039 m
$R=$	0.026 m
$R_x/R_y=$	2
$\xi=$	1.298
$k^- =$	1.606
$E'=$	$219.78 \cdot 10^9$ Pa
$a=$	3335.733 μm
$2a=$	6671.466 μm
$b=$	2076.145 μm
$2b=$	4152.290 μm
$\psi^- =$	1.945
$\delta=$	121.99 μm
$P_{\text{max}}=$	3319.61 Mpa

Fuente: Elaboración propia.

La diferencia entre las tablas solo radica en la carga aplicada a cada rodamiento con una diferencia de 15 N. Sin embargo una vez medida la elipse de contacto se evidencian valores iguales entre los dos rodamientos en cuanto a (a) y (b) (ver figuras 7 a la 10).

Fig 7: Elipse (a) de contacto en pista exterior.



Fuente: Elaboración propia.

Fig 8: Medida (a) de la elipse de contacto.



Fuente: Elaboración propia.

Fig 9: Medida (b) de la pista exterior.



Fuente: Elaboración propia.

Fig 10: Medida (b) de la pista interior.



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos de la investigación detallada sobre la identificación de materiales y la selección de rodamientos revelan datos significativos que pueden influir en la toma de decisiones del personal técnico. En primer lugar, al medir las geometrías de los dos rodamientos bajo prueba, se ha determinado que ambos compartían dimensiones similares, con una bola de 7,94 mm de diámetro y una pista con un radio de curvatura de 3,97 mm. Estos datos han sido fundamentales para los cálculos de contacto de Hertz, al proporcionar información crucial sobre las tensiones y deformaciones en la interacción de los rodamientos durante la carga.

Además, la espectrometría de rayos X ha revelado la composición química de los rodamientos Ishinomoto y NTN, al identificar una aleación de acero inoxidable con un contenido de cromo que oscila entre el 1,04% y el 1,32%. Estos resultados son esenciales para comprender la resistencia y durabilidad de los rodamientos, debido que el cromo desempeña un papel crítico en la capacidad del material para resistir la fatiga por contacto y otras tensiones cíclicas.

En cuanto a las pruebas de compresión, los rodamientos han exhibido comportamientos similares bajo una carga de 2109 N, al describir áreas elípticas de contacto con dimensiones específicas. Este hallazgo respalda la necesidad de entender la interacción entre geometría, materiales y carga en el rendimiento de los rodamientos. Sin embargo, la divergencia se hizo evidente al someter los rodamientos a cargas mayores, donde el NTN demuestra una resistencia significativamente superior en comparación con el Ishinomoto.

Con base en los resultados obtenidos en la investigación sobre el contacto mecánico de rodamientos, se proponen soluciones específicas y buenas prácticas dirigidas al personal técnico en Ecuador. De modo que se encuentre orientado a mejorar en la toma de decisiones en la

identificación de materiales y selección de rodamientos en los procesos de compra y de adquisición.

Propuestas y buenas prácticas para mejorar la toma de decisiones en la identificación de materiales y selección de rodamientos.

I-Implementación de programas de capacitación continua:

- Establecer programas de formación continua para el personal técnico, enfocados en la identificación de materiales en rodamientos y las técnicas de espectrometría de rayos X.
- Incluir módulos prácticos que permitan a los técnicos aplicar los conocimientos adquiridos en situaciones reales.

II-Desarrollo de manuales técnicos especializados:

- Crear manuales técnicos específicos que detallen las metodologías de identificación de materiales y la aplicación de técnicas de espectrometría de rayos X.
- Proporcionar guías paso a paso para la interpretación de resultados y la toma de decisiones informadas.

III-Colaboración con laboratorios especializados:

- Fomentar la colaboración con laboratorios especializados en espectrometría de rayos X para realizar pruebas de identificación de materiales en casos donde la infraestructura interna pueda ser limitada.
- Establecer acuerdos de cooperación para acceder a servicios de análisis detallado.

IV-Creación de redes de conocimiento:

- Facilitar la creación de redes de conocimiento entre el personal técnico y expertos en identificación de materiales y selección de rodamientos.
- Promover el intercambio de experiencias y buenas prácticas a través de conferencias, seminarios y foros especializados.

V-Utilización de herramientas de apoyo a la decisión:

- Desarrollar o implementar herramientas digitales que ayuden al personal técnico en la toma de decisiones, al proporcionar análisis rápidos de composición química y recomendaciones de rodamientos basadas en datos recopilados.

VI-Evaluación continua de rendimiento:

- Establecer métricas de rendimiento y llevar a cabo evaluaciones continuas para medir la eficacia de las estrategias implementadas.
- Realizar revisiones periódicas para identificar áreas de mejora y ajustar los procesos según sea necesario.

VII- Acceso a información detallada de fabricantes:

- Establecer relaciones cercanas con fabricantes de rodamientos para obtener información detallada sobre la composición química y las características de rendimiento.
- Utilizar esta información para mejorar la precisión en la identificación de materiales y la selección de rodamientos.

VIII- Incorporación de estándares internacionales:

- Adoptar y aplicar estándares internacionales, como los establecidos por la ISO, para la selección y prueba de rodamientos.
- Asegurar que el personal técnico esté familiarizado y siga las mejores prácticas recomendadas por organizaciones reconocidas.

IX- Integración de enfoques multidisciplinarios:

- Fomentar la colaboración entre ingenieros mecánicos, químicos y especialistas en materiales para abordar la identificación de materiales desde un enfoque multidisciplinario.
- Aprovechar la diversidad de conocimientos para mejorar la comprensión y toma de decisiones.

X- Actualización periódica de conocimientos:

- Establecer un sistema de actualización periódica de conocimientos para garantizar que el personal técnico esté al tanto de los avances tecnológicos y las nuevas metodologías en identificación de materiales y selección de rodamientos.

La implementación de estas propuestas y buenas prácticas proporciona al personal técnico en Ecuador las herramientas y conocimientos necesarios para mejorar significativamente la toma de decisiones en la identificación de materiales y selección de rodamientos. De modo que contribuye así a la eficiencia y confiabilidad de los sistemas mecánicos en diversos sectores industriales.

Material didáctico y recursos de capacitación para estrategias en identificación de materiales en rodamientos.

La combinación de estos recursos didácticos y herramientas de capacitación asegura una transferencia efectiva de conocimientos, adaptada a las necesidades y contextos específicos del personal técnico en Ecuador. De modo que facilita la implementación exitosa de las estrategias propuestas en la identificación de materiales en rodamientos. Entre los que se destacan:

1. Guía práctica ilustrada:

- Diseñar una guía práctica con ilustraciones detalladas que explique paso a paso el protocolo para la identificación de materiales en rodamientos mediante espectrometría de rayos X.

- Incluir imágenes de equipos, configuraciones y ejemplos de muestras para una comprensión visual.

2. Presentaciones interactivas:

- Crear presentaciones interactivas que destaquen conceptos clave, principios de funcionamiento de la espectrometría de rayos X y casos de estudio específicos para la realidad ecuatoriana.

- Integrar elementos visuales, como gráficos y animaciones, para clarificar procesos y resultados.

3. Videos tutoriales:

- Desarrollar videos tutoriales que muestren la ejecución práctica del protocolo en el terreno. Incluir demostraciones reales de preparación de muestras, configuración de equipos y análisis de resultados.

- Entrevistas con expertos locales para compartir experiencias prácticas.

4. Sesiones de capacitación presenciales:

- Organizar sesiones presenciales de capacitación con expertos en la identificación de materiales en rodamientos mediante espectrometría de rayos X.

- Incluir sesiones prácticas donde los participantes puedan aplicar el protocolo bajo supervisión.

5. Manuales detallados:

- Elaborar manuales detallados que profundicen en los fundamentos teóricos, que expliquen los principios físicos detrás de la espectrometría de rayos X y la relevancia de cada parámetro.

- Incluir estudios de casos específicos de rodamientos comunes en el entorno industrial ecuatoriano.

6. Plataforma de E-Learning:

- Desarrollar una plataforma de aprendizaje en línea que ofrezca módulos interactivos, evaluaciones y recursos descargables.

- Permitir el acceso a contenido educativo desde cualquier lugar y en cualquier momento.

7. Simuladores virtuales:

- Crear simuladores virtuales que permitan a los técnicos practicar virtualmente la aplicación del protocolo en diferentes escenarios.

- Incluir retroalimentación inmediata para mejorar la comprensión y habilidades prácticas.

8. Sesiones de preguntas y respuestas:

- Organizar sesiones regulares de preguntas y respuestas, ya sea en persona o a través de plataformas en línea, donde los participantes puedan plantear dudas y obtener clarificaciones adicionales.
9. Foros de discusión:
- Establecer foros en línea donde el personal técnico pueda compartir experiencias, discutir desafíos específicos y colaborar en la resolución de problemas relacionados con la identificación de materiales en rodamientos.
10. Evaluaciones y certificaciones:
- Implementar evaluaciones periódicas para medir la comprensión y competencia del personal técnico.
 - Otorgar certificaciones a aquellos que completen con éxito la capacitación, al validar las habilidades y conocimientos adquiridos.

DISCUSIÓN

Los resultados revelan la complejidad inherente en la identificación de materiales y la selección de rodamientos, al destacar la interdependencia de factores geométricos, químicos y mecánicos. La similitud en las geometrías y materiales de los rodamientos Ishinomoto y NTN bajo cargas normales destaca la calidad de ambos productos, al respaldar el uso generalizado en diversas aplicaciones (Rejith et al., 2023). Sin embargo, la diferencia en el rendimiento mecánico bajo cargas extremas subraya la necesidad de una evaluación detallada y contextualizada al seleccionar rodamientos para aplicaciones específicas (Cubillas et al., 2022).

El análisis de la composición química revela que el contenido de cromo, un elemento crucial en la resistencia a la fatiga por contacto, es ligeramente mayor en el NTN en comparación con el Ishinomoto. Esta diferencia puede explicar la variación en el rendimiento bajo cargas extremas y destaca la necesidad de considerar no solo la calidad general del material, sino también la presencia de elementos específicos que influyen en su comportamiento mecánico.

La capacidad del rodamiento NTN para soportar una carga máxima considerablemente mayor sugiere la importancia de una selección precisa basada en las condiciones de operación previstas. La discusión subraya la necesidad de evaluar no solo la calidad intrínseca de los rodamientos, sino también su idoneidad para situaciones específicas. De modo que garantice una selección que optimice la vida útil y el rendimiento del sistema mecánico. Además, los resultados resaltan la viabilidad de implementar estrategias específicas en el proceso de

selección para maximizar la eficiencia y la confiabilidad de los sistemas mecánicos en contextos industriales.

CONCLUSIONES

La investigación destaca la necesidad crítica de una evaluación integral al seleccionar rodamientos, al considerar no solo dimensiones y geometría, sino también la composición química de los materiales. La similitud en la geometría y la composición de los rodamientos Ishinomoto y NTN bajo cargas normales resalta su idoneidad general. Sin embargo, la divergencia en su rendimiento bajo cargas extremas subraya la necesidad de una evaluación detallada para garantizar un rendimiento óptimo en condiciones específicas de operación.

Los resultados evidencian que, a pesar de compartir dimensiones y composición, la diferencia en la capacidad para resistir cargas máximas entre el NTN e Ishinomoto radica en el material y el proceso de fabricación. La mayor resistencia del NTN, respaldada por una carga máxima superior y una presión de contacto más alta, sugiere que la elección del material y el método de manufactura son factores determinantes en la robustez mecánica de los rodamientos. Esta conclusión destaca la necesidad de considerar estos aspectos al seleccionar rodamientos para aplicaciones específicas.

La investigación subraya la necesidad de estrategias contextualizadas en la selección de rodamientos, especialmente en entornos industriales en Ecuador. La variación en el rendimiento bajo diferentes cargas resalta la necesidad de adaptar la selección de rodamientos a las condiciones operativas previstas. La implementación de estrategias que integren conocimientos sobre geometría, composición química y carga operativa es esencial para optimizar la eficiencia y confiabilidad de los sistemas mecánicos en diversos sectores industriales en el contexto ecuatoriano.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cubillas, D., Olave, M., Llavori, I., Ulacia, I., Larrañaga, J., Zurutuza, A., & Lopez, A. (2022). Semi-analytical methodology to predict fretting damage areas in angular contact ball bearing raceways under variable loading. *Wear*, 508-509(November), 1-4. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164822002344>
- Köhn, A. O., Silva, F. d. A., Köhn, A. O., & Silva, F. d. A. (2020). A study of the stress field generated by the contact between a sphere and a flat plate for a simplified model of deep-groove ball bearing. *Ingeniería e Investigación*, 40(2), 37-42. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0120-56092020000200037&script=sci_arttext

- Liu, Y., Zhang, H., Hu, P., Wang, Y., & Shi, Y. (2024). Research on the vibration characteristics of the ball bearing considering the uncertain bearing-shaft interference fit. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 238(1), 48-63. <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/09544062231167021>
- Luo, M., André, H., Guo, Y., & Peng, Y. (2024). Analysis of contact behaviours and vibrations in a defective deep groove ball bearing. *Journal of Sound and Vibration*, 570(February), 1-9. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022460X23005539>
- Ma, S., Li, W., Yan, K., Li, Y., Zhu, Y., & Hong, J. (2022). A study on the dynamic contact feature of four-contact-point ball bearing. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 174(Jul), 1-6. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0888327022002783>
- Ma, S., Tian, C., Yang, C., Yan, K., Stefano, L., & Hong, J. (2024). New bearing model with flexible cage and study of dynamic behavior under variable-speed. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 208(February), 3-6. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327023009536>
- Rejith, R., Kesavan, D., Chakravarthy, P., & Narayana Murty, S. V. S. (2023). Bearings for aerospace applications. *Tribology International*, 181(March), 2-7. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X23000993>
- Shao, Z., Zhu, Y., Zhang, P., Cao, Y., Wang, B., Xu, Z., Liu, H., Gu, X., Liu, H., Li, D., & Zhang, Z. (2024). Effect of primary carbides on rolling contact fatigue behaviors of M50 bearing steel. *International Journal of Fatigue*, 179(February), 1-4. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112323005558>
- Tian, J., Su, H., Wang, Z., Zuo, K., Wang, D., & Guo, D. (2024). Comparative analysis of angular contact bearing stiffness calculated by Hertz contact and thermo-elastohydrodynamic lubrication. *Tribology International*, 192(April), 2-8. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301679X24000021>
- Villa-Covarrubias, B., Piña-Monarez, M. R., Barraza-Contreras, J. M., & Baro-Tijerina, M. (2020). Stress-Based Weibull Method to Select a Ball Bearing and Determine Its Actual Reliability. *Applied Sciences*, 10(22), 8100. <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/22/8100>
- Xu, F., Ding, N., Li, N., Liu, L., Hou, N., Xu, N., Guo, W., Tian, L., Xu, H., Lawrence Wu, C.-M., Wu, X., & Chen, X. (2023). A review of bearing failure Modes, mechanisms and causes. *Engineering Failure Analysis*, 152(October), 3-8. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630723004727>
- Yang, Z., Hong, J., Wang, D., Ma, Y., & Cheng, R. (2023). Failure analysis of an aero-engine inter-shaft bearing due to clearance between the outer ring and its housing. *Engineering Failure Analysis*, 150(August), 2-5. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350630723002522>