

	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO	Documento F-AC-DBL-007	Código 30-09-2024	Fecha C
	Dependencia DIVISIÓN DE BIBLIOTECA	Aprobado SUBDIRECTOR ACADEMICO	Pág. 0(117)	

RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	Brayan Arley Bayona Reyes		
FACULTAD	Ingenierías		
PLAN DE ESTUDIOS	Ingeniería mecánica		
DIRECTOR	Dr. Ricardo Andrés García León		
CODIRECTOR	Dr. José Martínez Trinidad		
TÍTULO DE LA TESIS	Análisis estadístico del comportamiento tribológico del acero DIN-16MnCr5 sometido a diferentes tratamientos termoquímicos.		
TITULO EN INGLES	Statistical analysis of the tribological behavior of DIN-16MnCr5 steel subjected to different thermochemical treatments.		
RESUMEN			
El estudio evalúa el comportamiento tribológico del acero DIN-16MnCr5 sometido a seis tratamientos termoquímicos y tres condiciones de carga. Mediante ensayos de desgaste bola sobre plano y análisis ANOVA con metodología de superficie de respuesta (RSM), se determinaron las variables de respuesta. El borurado y el fosfatado de manganeso mostraron el mejor desempeño, reduciendo significativamente la fricción y el desgaste, mejorando significativamente la resistencia superficial del acero en condiciones severas de operación.			
RESUMEN EN INGLES			
The study evaluates the tribological behavior of DIN 16MnCr5 steel subjected to six thermochemical treatments and three load conditions. Through ball-on-flat wear tests and ANOVA analysis using the Response Surface Methodology (RSM), the response variables were determined. Boriding and manganese phosphating exhibited the best performance, significantly reducing friction and wear, and greatly enhancing the surface resistance of the steel under severe operating conditions.			
PALABRAS CLAVES	Tribología, tratamientos termoquímicos, acero DIN-16MnCr5, desgaste superficial, análisis ANOVA, RSM		
PALABRAS CLAVES EN INGLES	Tribology, thermochemical treatments, DIN-16MnCr5 steel, surface wear, ANOVA analysis, RSM.		
CARACTERÍSTICAS			
PÁGINAS:	PLANOS:	ILUSTRACIONES:	CD-ROM:

**Análisis estadístico del comportamiento tribológico del acero DIN-16MnCr5
sometido a diferentes tratamientos termoquímicos.**

Brayan Arley Bayona Reyes

Facultad de Ingenierías, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña

Ingeniería Mecánica

Dr. Ricardo Andrés García León

Dr. José Martínez Trinidad

22 de octubre de 2025

Índice

Lista de Figuras.....	5
Lista de Tablas	7
Capítulo 1. Análisis estadístico del comportamiento tribológico del acero DIN-16MnCr5 sometido a diferentes tratamientos termoquímicos.....	8
1.1. Planteamiento del Problema.....	8
1.2. Formulación del Problema	10
1.3. Objetivos	10
1.3.1. Objetivos General	10
1.3.2. Objetivos Específicos.....	10
1.4. Justificación.....	11
1.5. Delimitaciones.....	12
1.5.1. Geográfica.....	12
1.5.2. Temporal	13
1.5.3. Conceptual	13
1.5.4. Operativa.....	13
Capítulo 2. Marco Referencial.....	14
2.1. Marco Histórico	14
2.1.1. Antecedentes internacionales	15
2.1.2. Antecedentes nacionales.....	16
2.1.3. Antecedentes regionales	17
2.2. Marco Conceptual	17
2.2.1. Conceptos relevantes para la investigación.....	18
2.3. Marco Teórico.....	24
2.3.1. Ciencia de materiales.....	24
2.3.2. Clasificación de materiales y propiedades mecánicas.....	25
2.3.3. Diagrama de Hierro-Carbono.....	25
2.3.4. Acero DIN-16MnCr5.	26
2.3.5. Tratamientos termoquímicos.....	27
2.3.6. Microestructura, mecanismo de desgaste y dureza superficial.	27
2.3.7. Relación entre ductilidad y tenacidad.....	27
2.3.8. Propiedades mecánicas obtenidas en los procesos termoquímicos.....	28
2.3.9. Análisis estadísticos aplicados en estudios tribológicos.	28
2.3.10. Ensayo de desgaste por deslizamiento en seco.....	29
2.3.11. Relación H/E (Dureza/Módulo elástico)	29
2.3.12. Microscopia Electrónica de Barrido (MEB).....	30
2.4. Marco Legal.	30
2.4.1. Normas técnicas Internacionales	31
2.4.2 Normas Técnicas Colombianas (NTC)	32
2.4.3. Normatividad de seguridad industrial.	33

2.4.4. Normativas ambientales.	33
2.4.5. Propiedad intelectual.	34
Capítulo 3. Diseño metodológico	35
3.1. Tipo de investigación	35
3.2. Población y muestra	36
3.2.1. Población	36
3.2.2. Muestra	36
Capítulo 4. Resultados	38
4.1. Desarrollar un análisis bibliométrico sobre los tratamientos termoquímicos aplicados al acero DIN-16MnCr5, utilizando el software Bibliometrix, con el fin de caracterizar sus propiedades físicas, químicas y tribológicas.	38
4.1.1. Generar la ecuación de búsqueda considerando las palabras claves del estudio con la finalidad de obtener información precisa en la base de datos Scopus.....	38
4.1.2. Buscar información académica relacionada con los tratamientos termoquímicos aplicados al acero DIN-16MnCr5, utilizando bases de datos académicas tales como, Scopus, ScienceDirect y Google académico. con el fin de recopilar información relevante para el análisis bibliométrico y la caracterización de propiedades del material.....	40
4.1.3. Clasificar la información consultada sobre las propiedades físicas y mecánicas del acero DIN-16MnCr5, elaborando un resumen comparativo mediante la elaboración de tablas y matrices técnicas que permitan evidenciar los cambios en las propiedades del material en función del tratamiento aplicado.	41
4.2. Obtener las propiedades mecánicas y tribológicas del acero DIN-16MnCr5 sometido a distintos tratamientos termoquímicos, considerando variables como dureza superficial, coeficiente de fricción, tasa de desgaste y resistencia al desgaste.	53
4.2.1. Preparar las muestras del acero DIN-16MnCr5 para ser sometido a 6 tratamientos termoquímicos diferentes (sin tratar, nitrurado, carburado, nitrurado con postoxidación, recubrimiento de fosfato de manganeso y el proceso de borurado por paquete de polvo).	53
4.2.2. Someter cada muestra a ensayos tribológicos bajo tres niveles de carga diferentes (5 N, 10 N y 20 N) usando un tribómetro, para medir dureza superficial, coeficiente de fricción, tasa de desgaste y resistencia al desgaste.....	62
4.2.3. Registrar y estructurar los datos obtenidos en una matriz de datos según el tipo de tratamiento, la condición de carga y las variables de respuesta.	65
4.3.1. Identificar mediante análisis de varianza (ANOVA) y otras herramientas estadísticas, los tratamientos que generan mejoras significativas en el desempeño del acero, proponiendo condiciones óptimas para aplicaciones industriales.	76
4.3.2. Utilizar modelos de regresión lineal múltiple e interacción para predecir la respuesta tribológica según tratamiento y carga.....	81
4.3.3. Verificar los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas en los datos experimentales mediante pruebas como Shapiro-Wilk (normalidad) y Levene (homogeneidad de varianzas).	84
Capítulo 5. Conclusiones	97
Capítulo 6. Recomendaciones.....	99

Referencias.....	101
Apéndice.	113
Tabla de resultados estimados para: k, CoF y ancho de pista.	113

Lista de Figuras

Figura 1. Curvas de enfriamiento para tratamientos térmicos.	20
Figura 2. Diagrama Fe-C.	26
Figura 3. Ensayo de desgaste por deslizamiento en seco.....	29
Figura 4. Nube de palabras generada en el análisis.	42
Figura 5. Producción científica anual	43
Figura 6. Crecimiento de las diez palabras principales a lo largo del tiempo.	45
Figura 7. Red de coocurrencia entre palabras clave.	46
Figura 8. Palabras claves más comunes en publicaciones.	47
Figura 9. Distribución de artículos y citas por revistas mas influyenes.	48
Figura 10. Principales autores, su impacto en Número de artículos y número de citas...	49
Figura 11. Distribución del número de artículos publicados por instituciones.....	50
Figura 12. Mapa mundial de colaboración entre países.....	52
Figura 13. Visualización de la Conexión entre Descriptores de Investigación, Autores Contribuyentes y Ubicación Geográfica.....	53
Figura 14. Representación esquemática ensayo de desgaste por deslizamiento en seco..	62
Figura 15. Vista en sección transversal mediante SEM de muestras de acero DIN- 16MnCr5 expuesta mediante: a) Nitruado, b) Cementación, c) Nitruado + Post-oxidación, d) Cementación + Fosfato de Manganeso, y e) Borurado.....	66
Figura 16. Pistas de desgaste para todo el conjunto experimental.....	69
Figura 17. Análisis residual para: a) k; b) CoF; c) Ancho de pista.....	84
Figura 18. Análisis de Pareto estandarizado a) k, b) CoF, c) Ancho de pista.....	85
Figura 19. Grafica efectos principales para a) k, b) CoF, c) Ancho de pista.....	87

Figura 20. Graficas de iteración para a) k; b) CoF; c) Ancho de pista.	88
Figura 21. Graficas de probabilidad normal para a) k; b) CoF; c) Ancho de pista.....	90
Figura 22. Superficies de respuesta estimada para a) k; b) CoF; c) Ancho de pista.....	92
Figura 23. Contornos de superficies de respuestas estimadas para a) k; b) CoF; c) Ancho de pista.	95

Lista de Tablas

Tabla 1. Propiedades mecánico-físicas relevantes del acero DIN-16MnCr5	26
Tabla 2. Recopilación de Información para el Análisis Bibliométrico.....	40
Tabla 3. Tipología de documentos.....	43
Tabla 4. Dureza superficial y espesor del recubrimiento para cada tratamiento.	71
Tabla 5. Matriz de datos según el tipo de tratamiento, la condición de carga y las variables de respuesta	75
Tabla 6. Diseño Experimental.....	76
Tabla 7. Efectos estimados de las variables de respuesta.	79
Tabla 8. Resultados del ANOVA para las variables de respuesta analizadas.	80
Tabla 9. Coeficientes de regresión del (MSR) para las variables de respuesta.	82

Capítulo 1. Análisis estadístico del comportamiento tribológico del acero DIN-16MnCr5 sometido a diferentes tratamientos termoquímicos.

1.1. Planteamiento del Problema.

La optimización de las propiedades mecánicas de los aceros convencionales se ha convertido en un tema de creciente interés en el sector industrial. Históricamente, los aceros han sido el pilar de la construcción, la industria automotriz, y la ingeniería en general, debido a su versatilidad, resistencia y costo relativamente bajo. No obstante, las exigencias actuales, como la necesidad de reducir el peso de los componentes, mejorar la resistencia al desgaste y aumentar la vida útil de las piezas, han impulsado la investigación en alternativas que permitan superar las limitaciones inherentes de los aceros convencionales Macías Delgado Julio et al., (2019).

Uno de los principales retos en la industria actual es la modificación y optimización de superficies metálicas destinadas a aplicaciones de contacto en componentes mecánicos de alta exigencia. En este contexto, la ingeniería de superficies se orienta al incremento del desempeño funcional de los materiales a través del mejoramiento de propiedades mecánicas específicas, tales como la dureza superficial, la tenacidad y el comportamiento tribológico; estas mejoras contribuyen significativamente a la reducción del desgaste y la fricción, lo cual repercute en un mayor rendimiento operativo y una prolongación de la vida útil de los elementos sometidos a condiciones de contacto continuo Carrera Espinoza et al., (2024). Con la finalidad de mejorar las propiedades mecánicas de los aceros tradicionales, algunos autores han propuesto la aplicación de tratamientos térmicos, los cuales permiten mejorar sus propiedades al punto de poder compararse con aceros avanzados de alta resistencia (Herrera et al., 2021).

Según Mohan y Arul, (2018) el acero 16MnCr5 es un acero de baja aleación utilizado ampliamente en la fabricación de componentes industriales y automotrices los cuales se encuentran sometidos a un alto desgaste como (engranes, ejes, cigüeñales, entre otros); la exposición continua a esfuerzos mecánicos y de fricción pueden producir un desajuste en las condiciones óptimas de

funcionamiento, lo que eventualmente genera problemas en su confiabilidad y desempeño funcional en los sistemas que integran dichos componentes.

Sin embargo, este material es susceptible a la mejora de sus propiedades cuando es sometiéndolo a diferentes tratamientos termoquímicos, como nitrurado, carburado, nitrurado post-oxidación, entre otros, los cuales brindan la posibilidad de modificar su microestructura, lo que resulta en el incremento de las propiedades mecánicas del material, así lo afirma Solís Romero et al., (2024), quien además recomienda la prolongación de estos tratamientos para obtener mejores resultados.

Li, X., Olofsson, U., y Bergseth, et al., (2017) estudiaron que el recubrimiento es una estrategia innovadora orientada a mejorar resistencia al desgaste y a la capacidad de carga en superficies sometidas al contacto (rodante deslizando), así mismo evalúa el comportamiento tribológico del 16MnCr5, en su estado inicial como modificado, mediante la formación de tribopelículas a partir de su pretratamiento superficial. Los resultados indicaron que el pretratamiento favorece la formación de una tribopelícula que reduce significativamente el coeficiente de fricción y mejora la resistencia al desgaste, evidenciando su efectividad para aplicaciones de alto contacto mecánico

El control estadístico de procesos según, Roland Torres Soria y Timoteo Segundo Alonso, et al., (2023) lo definen como un conjunto de técnicas y herramientas orientadas a la recopilación y análisis de datos relativos a la variabilidad de un proceso, con el objetivo de medir y controlar las desviaciones que inciden en las características de calidad exigidas por la aplicación requerida. Así mismo en su estudio, plantean como finalidad identificar las causas de las variaciones en la dureza de piezas de acero fundido sometidas a diversos tratamientos térmicos, la metodología empleada se basó en la observación y análisis de datos históricos, utilizando herramientas informáticas como Excel y Minitab.

Considerando lo anterior, el presente trabajo de investigación tiene como objetivo analizar, mediante herramientas estadísticas, la influencia que tienen los tratamientos termoquímicos (sin tratar, nitrurado, carburado, nitrurado con postoxidación, recubrimiento de fosfato de manganeso y el proceso de borurado por paquete de polvo) sobre el comportamiento tribológico del acero DIN-16MnCr5 bajo tres

condiciones distintas de carga (5, 10 y 20 N), realizando un análisis bibliométrico, caracterizado propiedades físicas, químicas y tribológicas antes y después de ser sometidos a estos procesos; los datos obtenidos permitirán determinar, a través de métodos de control estadístico de procesos y análisis de varianza (ANOVA), la significancia del tratamiento aplicado y su impacto sobre la respuesta tribológica del material, aportando criterios cuantitativos para optimizar su desempeño en aplicaciones de alto desgaste.

1.2. Formulación del Problema

¿Qué tratamiento termoquímico presenta estadísticamente una mejora significativa en las propiedades tribológicas en el acero DIN-16MnCr5?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivos General

Analizar estadísticamente el comportamiento del acero DIN-16MnCr5 sometido a distintos tratamientos termoquímicos, con el fin de identificar cómo influyen estos procesos en sus propiedades tribológicas y mecánicas.

1.3.2. Objetivos Específicos

Desarrollar un análisis bibliométrico sobre los tratamientos termoquímicos aplicados al acero DIN-16MnCr5, utilizando el software Bibliometrix, con el fin de caracterizar sus propiedades físicas, químicas y tribológicas.

Obtener las propiedades mecánicas y tribológicas del acero DIN-16MnCr5 sometido a distintos tratamientos termoquímicos, considerando variables como dureza superficial, coeficiente de fricción, tasa de desgaste y resistencia al desgaste.

Realizar el análisis estadístico de los resultados experimentales mediante el software Statgraphics, aplicando pruebas de ANOVA para comparar el efecto de los tratamientos termoquímicos sobre las variables de interés.

1.4. Justificación.

Numerosos estudios han demostrado que los tratamientos térmicos adecuados dependiendo de la aplicación y el material, pueden modificar sus propiedades y microestructura. En el caso de los aceros dúplex, Dizisaz et al., (2025), observaron un aumento en el esfuerzo de ruptura tras un tratamiento térmico de envejecimiento, aunque a costa de una reducción en la ductilidad, esto sugiere que existe un equilibrio entre la dureza y la tenacidad que debe ser cuidadosamente evaluado dependiendo de la aplicación.

No obstante, a pesar de la amplia disponibilidad de técnicas de tratamiento superficial, persiste una brecha significativa en el conocimiento relacionado con la selección óptima del tratamiento termoquímico más eficaz para mejorar el comportamiento tribológico del acero DIN-16MnCr5; esta problemática se acentúa cuando se introducen variables operativas críticas, como las distintas condiciones de carga, que influyen directamente en el desempeño de las capas tratadas.

La mayoría de los estudios existentes se limitan a evaluar individualmente los efectos de tratamientos como la cementación o la nitruración en condiciones de laboratorio estandarizadas, sin considerar la variabilidad que implica el entorno operativo real ni la interacción de múltiples factores sobre las propiedades mecánicas y tribológicas del material.

Otra limitante encontrada en la literatura, es la escasa aplicación de métodos estadísticos robustos, como el análisis de varianza (ANOVA) o el control estadístico de procesos (SPC)

impide establecer con precisión qué tratamiento genera mejoras estadísticamente significativas y cuáles son las condiciones más favorables para su aplicación Herrera Villafranca et al., (2012).

Esta carencia de criterios cuantitativos y comparativos limita la capacidad de los ingenieros para tomar decisiones basadas en evidencia, lo que puede derivar en la selección de tratamientos subóptimos, sobrecostos en procesos de manufactura, o fallos prematuros en componentes críticos.

En ese sentido, este proyecto propone integrar métodos estadísticos como el análisis de varianza (ANOVA) y el control estadístico de procesos (SPC) para comparar cuantitativamente los efectos de diferentes tratamientos sobre variables críticas como la dureza, el coeficiente de fricción y la resistencia al desgaste. Esta perspectiva, respaldada en el enfoque de ingeniería de superficies y análisis de datos, permitirá no solo identificar el tratamiento más eficiente, sino también establecer criterios técnicos para su aplicación según las condiciones de carga específicas Romero et al., (2016).

Por tanto, este estudio no solo fortalecerá el conocimiento científico en ciencia de materiales y tribología, sino que también ofrecerá herramientas prácticas para la toma de decisiones en la industria. Sus hallazgos serán especialmente útiles en sectores como el automotriz, la metalmecánica y la fabricación de maquinaria pesada.

1.5. Delimitaciones

1.5.1. Geográfica

El actual proyecto de investigación se realizará utilizando, el laboratorio de ciencia de los materiales para analizar la microestructura de los aceros. Por otra parte, se realiza la búsqueda de información asesorada por el director de tesis, en la oficina del grupo de investigación

INGAP, del semillero de investigación SIIST de la Universidad Francisco de Paula Santander, Ocaña.

1.5.2. Temporal

La investigación se desarrollará dentro del segundo semestre del año 2025, comprendiendo un periodo de 8 semanas del año en curso a partir de la fecha de aprobación del anteproyecto.

1.5.3. Conceptual

El estudio se enmarca en los conceptos de tribología, tratamientos termoquímicos (sin tratar, nitrurado, carburado, nitrurado con post-oxidación, recubrimiento de fosfato de manganeso y el proceso de borurado por paquete de polvo), propiedades mecánicas superficiales (dureza, desgaste, fricción) y análisis estadístico.

1.5.4. Operativa

La investigación se desarrollará de forma experimental bajo condiciones de laboratorio, utilizando el acero DIN-16MnCr5 como material base. Se aplicarán tratamientos termoquímicos específicos, se evaluará el comportamiento tribológico mediante ensayos bajo tres condiciones de carga diferentes, se emplearán técnicas de medición como ensayo de micro dureza y análisis de desgaste, y los resultados serán procesados estadísticamente mediante herramientas como ANOVA y análisis de control estadístico de procesos.

Capítulo 2. Marco Referencial

2.1. Marco Histórico

Los materiales metálicos han ocupado un papel imprescindible en el desarrollo industrial y tecnológico de nuestra sociedad; gracias a su abundancia, bajo costo de producción, características y propiedades mecánicas; los aceros convencionales han jugado un papel fundamental en sectores claves como la construcción, la industria automotriz, la manufactura y la producción de maquinaria pesada, esto lo posiciona como uno de los materiales estructurales más utilizados en la actualidad.

Tal como lo menciona Tylecote et al., (2002) durante el periodo comprendido por la revolución industrial, se originaron nuevas técnicas de producción de los aceros como el convertidor Bessemer o el horno Siemens-Martin, lo que permitió una producción masiva de aceros con diferentes aleaciones las cuales respondían a las necesidades de cada sector; con este crecimiento industrial surgió una nueva demanda de materiales con propiedades más específicas, capaces de soportar condiciones de operación más exigentes.

Estas exigencias dieron lugar al desarrollo de tratamientos térmicos y termoquímicos; en su artículo Zhang et al., (2022) presenta cómo térmicamente se modifica la microestructura del acero, potenciando las propiedades mecánicas presentes en el material adaptándolo a cada necesidad, buscando su optimización y caracterización.

Particularmente, el acero 16MnCr5 se ha consolidado como una de las aleaciones más utilizadas en la industria automotriz y de maquinaria debido a su buena templeabilidad y capacidad para ser endurecido superficialmente; sin embargo, su uso intensivo en condiciones de alta fricción y carga ha evidenciado la necesidad de optimizar sus propiedades mecánicas para

garantizar un mayor rendimiento funcional y una vida útil prolongada de los componentes fabricados con este material.

Para entender la estructura interna de los materiales a una escala microscópica, los investigadores han adoptado un enfoque más profundo mediante el uso de herramientas de vanguardia como la microscopía electrónica y la difracción de rayos X, revelando las propiedades subyacentes que definen el comportamiento del material Mendoza Ramírez et al., (2020).

Es por esto, en la literatura encontramos como se han desarrollado diversas estrategias para potenciar las características mecánicas de los materiales, tales como: tratamientos térmicos optimizados, adición de aleantes específicos y procesamiento termo mecánico controlado, demostrando ser efectivos en la mejora de las propiedades mecánicas de diversos materiales Zhang et al., (2022)

2.1.1. Antecedentes internacionales

Estudios académicos han explorado el comportamiento tribológico del acero DIN-16MnCr5 bajo diferentes tratamientos termoquímicos, en los que demuestran notables mejoras al desgaste y coeficiente de fricción; investigaciones realizadas en México, Carrera Espinoza et al., (2024) aplicaron un tratamiento dúplex combinando nitrurado por gas y borurización en hornos pack sobre acero DIN-16MnCr5, logrando una marcada disminución en el coeficiente de fricción y un incremento notable en la resistencia al desgaste gracias a mejoras en la dureza y el módulo elástico.

Estudios realizados en Turquía por, Baykara y Atik, et al., (2025) evidencian un enfoque centrado en el efecto de la profundidad de la cementación y la textura superficial, estos

desgaste en aplicaciones automotrices como juntas universales.

Wong-Ángel et al., (2020), investigaron la tribocorrosión del acero DIN-16MnCr5 tras carburización combinada con recubrimiento de fosfato de manganeso, observando mejoras en la protección superficial frente a desgaste y corrosión; así mismo, analizaron la sinergia entre desgaste y corrosión en muestras nitruradas con post-oxidación, empleando tribocorrosión en solución salina, y documentaron cómo estos tratamientos modifican la respuesta tribológica en ambientes corrosivos.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Estudios universitarios nacionales han evaluado tratamientos termoquímicos en aceros Fe-Mn-Al y su comparación con el acero 16MnCr5, según Ipaz et al., (2013) consideran metodologías de tribología, como el ensayo pin-on-disk, para analizar el efecto de los tratamientos térmicos en la resistencia al desgaste, encontrando que el 16MnCr5 presenta buena combinación de dureza superficial y tenacidad interna tras cementación y temple.

El Departamento de Materiales y Minerales y grupos de investigación interdisciplinarios de la Universidad Nacional de Colombia han desarrollado proyectos relacionados con la tribología de materiales metálicos que incluyen análisis de superficies tratadas y su comportamiento frente al desgaste y otras solicitudes, aunque no enfocado exclusivamente en el acero DIN-16MnCr5.

Estos antecedentes destacan la relevancia de seguir impulsando la investigación sobre los tratamientos termoquímicos en los aceros, dado que facilitan el desarrollo de las mejoras en las propiedades del material, ajustándose a las demandas de la industria contemporánea.

2.1.3. Antecedentes regionales

Aunque el estudio de García León et al., (2020) se centró en fundición gris nodular, su metodología experimental resulta altamente aplicable al análisis del acero de cementación DIN-16MnCr5, especialmente en el contexto de tratamientos térmicos y termoquímicos; el uso de técnicas como el temple, el recocido y la caracterización mediante SEM, EDS y ensayos de dureza Brinell permite evaluar con precisión los cambios microestructurales y mecánicos inducidos por estos procesos, en el caso del 16MnCr5, que se caracteriza por una buena respuesta a la cementación y nitrurado, una adaptación de estos tratamientos podría mejorar notablemente su dureza superficial sin comprometer la tenacidad del núcleo. Así, la experiencia local demostrada en Ocaña por dicho estudio representa una base valiosa para desarrollar investigaciones orientadas al mejoramiento del comportamiento tribológico y mecánico de este tipo de acero en aplicaciones industriales exigentes.

2.2. Marco Conceptual

El acero DIN-16MnCr5 es un acero aleado con una composición química que incluye una excelente respuesta a tratamientos termoquímicos Hasçelik, et al., (2025).

Según Metinvest et al., (2025) este es clasificado como un acero para cementación, utilizado ampliamente en la fabricación de componentes mecánicos que requieren una alta dureza superficial combinada con un núcleo tenaz y resistente, como engranajes, ejes y piñones, así mismo, nos indica que su buena maquinabilidad en estado recocido y una capacidad de endurecimiento significativa cuando se expone a tratamientos de difusión superficial.

2.2.1. Conceptos relevantes para la investigación.

2.2.1.1. Tratamientos térmicos. Los tratamientos térmicos son procesos controlados de calentamiento y enfriamiento aplicados a los materiales, especialmente a los metales, para modificar sus propiedades mecánicas y microestructurales. Estos tratamientos permiten optimizar características como la dureza, tenacidad, ductilidad y resistencia al desgaste de un material, adecuándolo para aplicaciones específicas, estas prácticas son fundamentales en la ingeniería de materiales, ya que permiten adaptar los metales a diversas condiciones de servicio J.R. Davis, et al., (2004).

2.2.1.2. Tratamientos termoquímicos. Son procesos de modificación superficial que combinan calor y la introducción de elementos químicos sobre la superficie del material, generando capas endurecidas sin alterar significativamente la tenacidad del núcleo; García León et al., (2020) nos muestra técnicas de temple y recocido en su estudio sobre la fundición gris nodular.

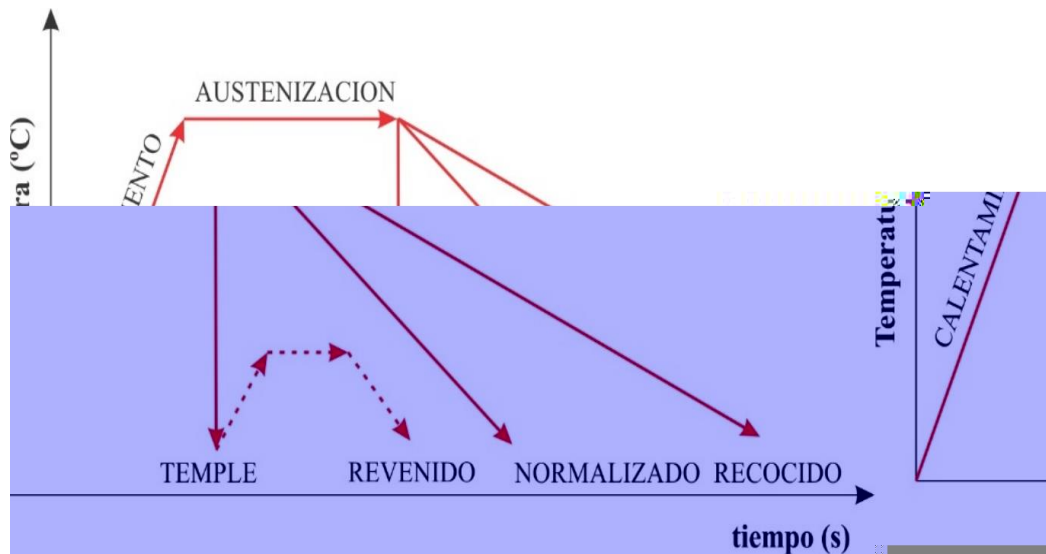
2.2.1.3. Temple. Este es un tratamiento térmico que implica calentar un material, por lo general acero, a una temperatura específica para enfriarlo rápidamente en agua o aceite; este proceso genera una microestructura dura y resistente debido a la formación de martensita, lo cual aumenta la dureza y resistencia del material, pero así mismo incrementa la fragilidad de este Callister y Rethwisch, et al., (2011).

2.2.1.4. Recocido. Es un tratamiento térmico que consiste en calentar el material a una temperatura elevada, mantenerlo en esa temperatura durante un período específico y luego enfriarlo lentamente, generalmente en un horno. Este proceso reduce la dureza del material y aumenta su ductilidad, facilitando su posterior mecanizado o deformación plástica. El recocido también ayuda a aliviar tensiones internas y a refinar la microestructura, mejorando la homogeneidad del material Callister y Rethwisch et al., (2020).

2.2.1.5. Normalizado. Este proceso tiene como objetivo principal proporcionar al acero

enfriamiento progresivo, orientado a disminuir las tensiones internas y favorecer la ductilidad del metal. Esta comparación resalta cómo la gestión precisa de la temperatura y el enfriamiento resulta determinante en las propiedades finales del acero.

Figura 1. Curvas de enfriamiento para tratamientos térmicos.



Nota. Imagen tomada de Derematerialia, (2025)

2.2.1.7. Nitruado. Tratamiento termoquímico de endurecimiento superficial que se realiza a temperaturas relativamente bajas, sin necesidad de un temple posterior. El proceso consiste en la difusión de nitrógeno en la superficie del acero, generalmente a partir de una atmósfera de gas amoníaco, lo que provoca la formación de nitruros de hierro y, de manera más importante, de nitruros estables con elementos de aleación como el aluminio, cromo y molibdeno. Esta formación de nitruros confiere una dureza superficial excepcionalmente alta, una resistencia superior al desgaste y a la corrosión, y mejora significativamente la resistencia a la fatiga en componentes sometidos a esfuerzos de flexión y torsión Córdova Valencia et al., (2003).

2.2.1.8. Carburado. Tratamiento termoquímico que consiste en enriquecer la superficie de los aceros de bajo carbono con átomos de carbono, al someter las piezas a altas temperaturas (usualmente entre 850 °C y 950 °C) en una atmósfera rica en carbono, lo que permite que este elemento difunda hacia el interior de la superficie metálica; este proceso genera una capa superficial dura y resistente al desgaste, mientras el núcleo se mantiene más dúctil y tenaz. Tras la carburado, normalmente se realiza un temple rápido para fijar la dureza de la capa enriquecida en carbono, logrando así propiedades mecánicas superiores requeridas en aplicaciones industriales de alta exigencia Ríos Diez et al., (2020).

2.2.1.9. Nitruado con postoxidación. Proceso termoquímico en el que primero se forma una capa dura y resistente llamada "capa blanca" sobre el acero mediante la incorporación de nitrógeno a través de nitruado iónica a temperaturas alrededor de 540 °C. Esta capa está compuesta principalmente por nitruros de hierro, pero presenta microporos que pueden reducir la resistencia a la corrosión. Por ello, se realiza una postoxidación, que consiste en crear una fina capa de óxido de magnetita (Fe_3O_4) sobre la capa nitruada, sellando esos poros y mejorando notablemente la resistencia a la corrosión sin afectar la dureza. El resultado es un material con alta dureza superficial, hasta cinco veces mayor que la del acero sin tratar, y una menor susceptibilidad a la corrosión, ideal para aplicaciones industriales que requieren ambas características Díaz Guillén et al, (2012).

2.2.1.10. Recubrimiento de fosfato de manganeso. Proceso químico en el cual se forma una capa cristalina adherente sobre la superficie del acero mediante la inmersión en una solución ácida que contiene sales de fosfato e iones de manganeso; la formación de la capa implica la corrosión controlada del acero, seguida por la precipitación y cristalización de fosfatos de manganeso, que protegen el metal y reducen el desgaste en aplicaciones industriales, este recubrimiento mejora la resistencia a la corrosión y la lubricidad de las piezas metálicas, además de servir como una excelente base para pinturas o recubrimientos posteriores Manuel et al, (2020).

2.2.1.11. Borurado por paquete de polvo. Tratamiento termoquímico que consiste en introducir la pieza de acero en una caja sellada que contiene una mezcla de polvos, entre ellos carburo de boro como agente borurante, junto con activadores y diluyentes; la caja se somete a temperaturas entre 850 y 1050 °C durante un tiempo que puede variar de 1 a 12 horas, facilitando la difusión del boro en la superficie del acero y la formación de capas duras de boruros de hierro (FeB y Fe₂B) este proceso aumenta significativamente la dureza y la resistencia al desgaste del material; el borurado por polvo es apreciado por su simplicidad, bajo costo y facilidad de manejo Cortes Herrera y Pingarrón, et al., (2016).

2.2.1.12. Tribología. Es la ciencia que estudia la fricción, el desgaste y la lubricación en superficies que interactúan con movimiento relativo, su objetivo es optimizar sistemas mecánicos y prolongar la vida útil de componentes, esta disciplina analiza los mecanismos de pérdida de material, como el desgaste abrasivo, adhesivo y por fatiga, que son comunes en piezas como engranajes, rodamientos y ejes Martín Alfonso y Valencia et al., (2015).

2.2.1.12 Microestructura. Describe la organización interna de los materiales, incluyendo el tamaño de grano, fases presentes y la distribución de los componentes, en los aceros, la microestructura depende de su composición química y de los tratamientos térmicos aplicados, lo cual afecta directamente propiedades como dureza, tenacidad y ductilidad Macías Delgado Julio, et al., (2019).

2.2.1.13. Dureza. Resistencia que presenta un material a la indentación o penetración por un cuerpo más duro, es decir, refleja la capacidad del material para resistir deformaciones plásticas superficiales permanentes bajo la acción de fuerzas externas; esta es medida mediante ensayos como Rockwell, Brinell o Vickers, los cuales cuantifican esta resistencia a partir del tamaño o profundidad de la indentación resultante Carrera Espinoza et al., (2024).

2.2.1.14. Fricción. Es la fuerza que se opone al movimiento relativo entre dos superficies en contacto, esta depende de la naturaleza de las superficies y de la fuerza normal aplicada entre ellas; generando elevación de temperaturas causando desgastes en las superficies Hutchings y Shipway et al., (2017).

2.2.1.15. Desgaste. Es el proceso de deterioro gradual de una superficie material debido a la acción mecánica repetida, como fricción, abrasión o impacto con otros cuerpos; existen varios mecanismos de desgaste, incluidos desgaste adhesivo, abrasivo, por fatiga y corrosivo, que dependen de las condiciones de servicio y del tipo de material Arunkumar et al., (2020).

2.3. Marco Teórico.

2.3.1. Ciencia de materiales.

Estudia cómo la composición química, la estructura interna y el procesamiento de los materiales afectan sus propiedades y comportamiento; la composición involucra la naturaleza y proporción de los átomos o iones presentes, mientras que la estructura se refiere a la organización de estos átomos en diferentes niveles, desde la disposición electrónica hasta la microestructura, incluyendo el tipo de enlace químico y la estructura cristalina o amorfa, Callister Jr et al., (2020); el procesamiento abarca los métodos y tratamientos aplicados para modificar o controlar dicha estructura, lo que a su vez influye directamente en las propiedades físicas, mecánicas, térmicas y químicas del material, esta interrelación composición-estructura-

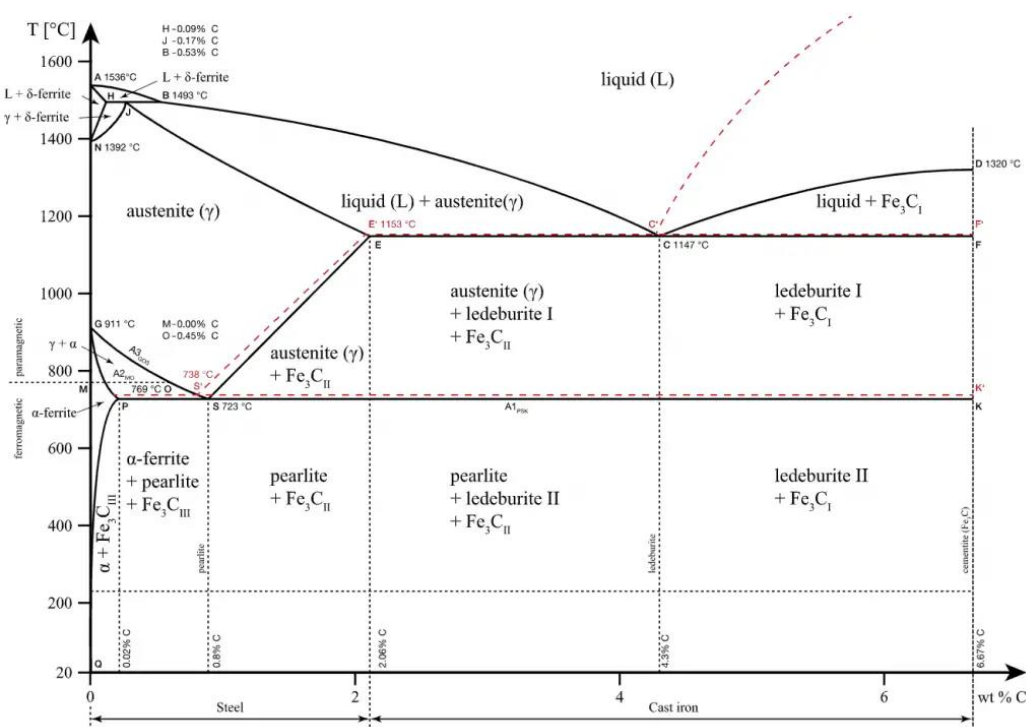
procesamiento-propiedades es fundamental para diseñar materiales con características específicas y predecir su comportamiento en aplicaciones particulares Carrera Espinoza et al., (2024)

2.3.2. Clasificación de materiales y propiedades mecánicas.

La ciencia de materiales establece criterios sistemáticos para la clasificación de los materiales en función de sus propiedades físicas, mecánicas y de su respuesta frente a diversos entornos de operación. Los materiales metálicos, cerámicos, poliméricos y compuestos presentan microestructuras y comportamientos diferenciados que condicionan su idoneidad en aplicaciones específicas de ingeniería; particularmente, los aceros se categorizan atendiendo a su composición química y los tratamientos termo-mecánicos a los que son sometidos, variables que inciden de manera directa en parámetros críticos como la resistencia mecánica, la ductilidad, la dureza y otras propiedades determinantes para el análisis y diseño estructural. Tylecote et al., (2002).

2.3.3. Diagrama de Hierro-Carbono

El diagrama de hierro-carbono (Figura 2) es una herramienta clave para comprender las fases microestructurales de los aceros. Muestra cómo la temperatura y la cantidad de carbono influyen directamente en la estructura interna de estos materiales. Por ejemplo, permite identificar fases como la ferrita, la austenita, la perlita y la cementita, que definen las propiedades mecánicas finales del acero, como su dureza, resistencia y ductilidad.

Figura 2. Diagrama Fe-C.

Nota. Imagen tomada de William F. Smith (2014).

2.3.4. Acero DIN-16MnCr5.

Es un acero aleado al cromo-manganeso, estandarizado bajo la norma DIN EN 10084, y ampliamente utilizado en componentes mecánicos sometidos a esfuerzos elevados y desgaste; su composición química típica incluye entre 0.14 0.19% de carbono, 1.00 1.30% de manganeso y 0.80 1.10% de cromo, lo que le confiere buenas propiedades mecánicas tras tratamiento térmico. Pertenece al grupo de los aceros de cementación, lo que permite obtener una superficie endurecida (hasta 60 HRC) y resistente al desgaste, manteniendo un núcleo tenaz y dúctil

Callister y Rethwisch et al., (2020).

Tabla 1. Propiedades mecánico-físicas relevantes del acero DIN-16MnCr5

Propiedad	Valor
Módulo de corte	80 GPa
Módulo de Young	~200 GPa
Fuerza de fluencia	415 MPa
Dureza (H)	1.5 2.1 GPa

Conductividad térmica	~46 W/mK
Coeficiente de Poisson	0.27-0.30
Resistencia a la tracción	520 MPa (800 1100 N/mm ²)
Carburado	860 980 °C (H=7.4 GPa)
Nitrurado	420 °CN y 580 °C BS (H ~6.50 GPa)
Nitrurado más postoxidación	

Nota. Datos tomados de Ortiz et al., (2020) y Otai Special Steel (2020)

2.3.5. Tratamientos termoquímicos.

Son procesos de modificación superficial aplicados a materiales metálicos, con el objetivo de mejorar propiedades como la dureza, fatiga, resistencia al desgaste y corrosión; estos se diferencian de los tratamientos convencionales debido a la difusión de elementos químicos activos Callister y Rethwisch, et al., (2020).

2.3.6. Microestructura, mecanismo de desgaste y dureza superficial.

Tratamientos termoquímicos como nitrurado, carburado, borurado, entre otros, modifican profundamente la microestructura superficial del acero, generando capas endurecidas compuestas por fases de martensitas, nitruros o boruros dependiendo del tratamiento aplicado, presentan una transición gradual de las propiedades mecánicas, con gradientes de dureza desde la superficie hacia el núcleo, que permanece más dúctil y tenaz Carrera Espinoza et al., (2024).

2.3.7. Relación entre ductilidad y tenacidad.

Estas propiedades mecánicas, aunque diferenciadas son complementarias en el comportamiento de los materiales; la tenacidad corresponde a la cantidad de energía que el material puede absorber previo a su fractura involucrando tanto la deformación elástica como plástica; mientras la ductilidad se define como la capacidad de un material para experimentar deformaciones plásticas significativas antes de la fractura Callister Jr, et al., (2020) y Rethwisch, et al., (2011).

2.3.8. Propiedades mecánicas obtenidas en los procesos termoquímicos.

El análisis de los tratamientos termoquímicos aplicados al acero DIN-16MnCr5 presenta que cada proceso ofrece ventajas específicas en términos de propiedades mecánicas.

El *nitrurado* y el *carburado* proporcionan un buen balance entre dureza y tenacidad, siendo esta la más adecuada para elementos que estén sometidos a carga dinámicas; el *nitrurado con post-oxidación*, presenta una mayor protección anticorrosiva y reducción del coeficiente de fricción, ideales para elementos aplicados en bombas y tuberías; por su parte, el *recubrimiento de fosfato de manganeso* no alcanza niveles elevados de dureza, pero mejora la lubricidad y la resistencia a la corrosión siendo útil como tratamiento complementario; finalmente, el *borurado* genera la mayor dureza superficial y resistencia al desgaste, aunque presente la desventaja que dicha capa resultante es frágil, debido a esto debe seleccionarse cuidadosamente la composición de la capa para lograr evitar la rotura y así mejorar la capacidad de soportar cargas Guzmán y Valle et al., (2018) y Ortiz et al., (2020).

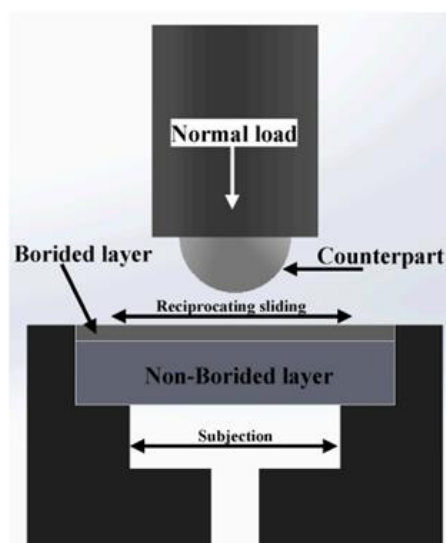
2.3.9. Análisis estadísticos aplicados en estudios tribológicos.

El análisis estadístico es esencial en estos estudios para interpretar cuantitativamente los efectos diferentes tratamientos sobre parámetros como el coeficiente de fricción, la tasa de desgaste o la dureza superficial; uno de los métodos más utilizados es el análisis de varianza que permite determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos aplicados; este enfoque estadístico no solo garantiza la validez científica de las conclusiones, sino que también contribuye al diseño de superficies optimizadas para aplicaciones industriales con mayor exigencia Mendoza Figueroa y Sánchez Almeida, et al., (2020).

2.3.10. Ensayo de desgaste por deslizamiento en seco.

Este tipo de análisis se utiliza compuesto para evaluar la resistencia tribológica de superficies boruradas en materiales como aceros, y se realiza bajo parámetros como carga, distancia de deslizamiento y velocidad de gradual para determinar el beneficio del tratamiento superficial; la Figura 3, ilustra un ensayo tribológico de deslizamiento recíproco, donde una bola aplica una "carga normal" sobre una muestra con capa superficial de boro y una contraparte, el movimiento alternado permite comparar el comportamiento frente al desgaste entre la zona tratada y la no tratada Carrera Espinoza et al., (2016).

Figura 3. Ensayo de desgaste por deslizamiento en seco.



Nota. Imagen tomada de García León et al., (2021).

2.3.11. Relación H/E (Dureza/Módulo elástico)

Es un parámetro clave en tribología para evaluar la capacidad de los materiales y recubrimientos de absorber deformaciones elásticas y resistir el inicio de la deformación plástica cuando están sujetos a cargas superficiales, como ocurre en el desgaste y la fricción. Un mayor valor de H/E se correlaciona con una mejor distribución de las tensiones y una reducción

de las huellas permanentes, lo que resulta en una mayor resistencia al desgaste y mayor durabilidad de los elementos mecánicos sometidos a contacto intenso; este parámetro es especialmente relevante en aplicaciones industriales donde la eficiencia energética, la disminución de reparaciones, el ahorro de materiales y la extensión de la vida útil son prioritario Beake et al., (2022).

2.3.12. Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)

Es una técnica de caracterización que permite obtener imágenes de muy alta resolución de la superficie de una muestra, a diferencia de los microscopios ópticos que usan luz, el MEB utiliza un haz de electrones para "escanear" el material; este método se lleva a cabo en una cámara de vacío, en donde un haz de electrones es dirigido hacia la superficie de la muestra y, al chocar con ella, genera distintas señales que son recogidas por detectores; los electrones secundarios proporcionan información sobre la topografía, mientras que los electrones retrodispersados revelan datos sobre la composición química, permitiendo diferenciar entre áreas con elementos pesados o ligeros Guillermina González Mancera y Ma Eugenia Noguez Amaya, et al., (2006).

2.4. Marco Legal.

Este trabajo de investigación se adhiere a las normativas, estándares y regulaciones tanto nacionales como internacionales, que aseguran la calidad, reproducibilidad y seguridad de los experimentos.

2.4.1. Normas técnicas Internacionales

Normas ASTM (American Society for Testing and Materials)

ASTM E3-

Establece una guía para la preparación de muestras metalográficas, que incluye el corte, montaje, pulido y ataque químico de materiales metálicos para el examen microscópico de su microestructura; además, proporciona recomendaciones sobre el tipo de abrasivos, lubricantes y equipos a utilizar en cada etapa, asegurando la reproducibilidad y calidad de los análisis metalográficos.

ASTM G119-

Guía estándar utilizada para cuantificar la sinergia entre el desgaste y la corrosión en materiales metálicos expuestos a soluciones líquidas o lodos; proporciona una metodología para calcular el daño adicional que ocurre cuando ambos procesos de degradación suceden simultáneamente, en comparación con el daño que causarían de forma independiente.

ASTM G133-

-on-

Método de prueba estándar que evalúa el desgaste por deslizamiento en un sistema de *bola sobre plano* con movimiento recíproco; esta norma es utilizada para determinar la resistencia al desgaste de los materiales mediante la medición del volumen de desgaste y coeficiente de fricción.

ASTM G115-

Guía estándar que establece los procedimientos para medir los coeficientes de fricción; su objetivo principal es asegurar que los datos tribológicos obtenidos en diferentes laboratorios y con distintos equipos, sean estandarizados, comparables y útiles para la comunidad científica.

ASTM G99-

-on-

Regula los ensayos de desgaste por deslizamiento mediante un dispositivo de tipo pin-on-disk, ampliamente utilizada para evaluar el comportamiento tribológico de materiales metálicos y recubrimientos, establece procedimientos estandarizados para medir la pérdida de volumen, la tasa de desgaste y el coeficiente de fricción bajo condiciones controladas de carga, velocidad y recorrido.

Normas ISO (International Organization for Standardization)

Determination of the thickness of surface-

Establece los métodos para medir la profundidad de capas endurecidas en aceros sometidos a tratamientos térmicos y termoquímicos, define parámetros como la profundidad de cementación (CHD), la profundidad de endurecimiento superficial (SHD), la profundidad de nitrurado (NHD) y el espesor de la capa de compuestos (CLT).

ISO 3534-

Vocabulary and Symbols Part 1: General Statistical

Establece la terminología fundamental y los símbolos aplicados en estadística y probabilidad. Su objetivo es unificar el lenguaje técnico utilizado en el análisis estadístico.

2.4.2 Normas Técnicas Colombianas (NTC)

Cubre técnicas tanto químicas húmedas como instrumentales para caracterizar aceros, incluyendo manejo de datos y cumplimiento con requisitos normativos, esta verifica la composición y calidad del acero DIN-16MnCr5 antes y después de tratamientos termoquímicos.

NTC 3353

Define los términos y métodos de ensayo aplicables a la siderurgia en Colombia, específicamente para evaluar las propiedades mecánicas de los aceros mediante pruebas estandarizadas, garantizando la uniformidad en la calidad de los productos siderúrgicos.

2.4.3. Normatividad de seguridad industrial.

GTC 45:2012: "Guía para la identificación de los peligros y la valoración de los riesgos en seguridad y salud ocupacional"

Brinda una orientación para la identificación de peligros y la evaluación de riesgos en el campo de la seguridad y salud en el trabajo, con el propósito de establecer e implementar medidas de control y prevención que garanticen condiciones laborales seguras.

2.4.4. Normativas ambientales.

ISO

Requisitos Con Orientación Para Su

Define los requisitos para un sistema de gestión ambiental eficaz, ofreciendo un marco de referencia que facilita a las organizaciones mejorar su desempeño ambiental, asegurar el cumplimiento de la normativa vigente y gestionar de manera adecuada los riesgos asociados al entorno.

Regula la gestión integral de los residuos peligrosos en Colombia, estableciendo las obligaciones para su manejo, almacenamiento, transporte, tratamiento y disposición final, con el objetivo de proteger la salud humana y el medio ambiente.

2.4.5. Propiedad intelectual.

Acuerdo 035 de 2003: "Reglamento sobre Propiedad Intelectual en la Universidad Francisco de Paula Santander"

Capítulo 3. Diseño metodológico

3.1. Tipo de investigación

Para el desarrollo de esta investigación se adopta un enfoque científico, debido que presenta proceso metódico y sistemático orientado a la solución de problemas mediante la obtención de nueva información sustentada en datos experimentales; El estudio se dirige al mejoramiento de las propiedades mecánicas del acero DIN-16MnCr5, a partir de la aplicación de un diseño experimental en el área de tratamientos termoquímicos de materiales. Bajo estas premisas, se establecen los siguientes aspectos metodológicos de la investigación:

Según el nivel de profundidad: La investigación se clasifica como explicativa, dado que busca establecer relaciones de causalidad entre los tratamientos termoquímicos aplicados al acero DIN-16MnCr5 y las propiedades tribológicas resultantes, específicamente la dureza superficial, la tasa de desgaste y el coeficiente de fricción. Para el análisis de los datos experimentales se empleará el método estadístico de análisis de varianza (ANOVA), el cual permitirá identificar diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos y correlacionar las variables objeto de estudio; paralelamente, se llevará a cabo una revisión bibliográfica sistemática orientada a fundamentar los procedimientos experimentales y a contextualizar los hallazgos obtenidos, este enfoque integral posibilitará no solo la validación estadística de los resultados, sino también la comprensión de los mecanismos subyacentes que determinan el desempeño tribológico del material, aportando criterios técnicos para su optimización en condiciones de operación específicas.

Según el diseño de la investigación: El presente estudio es de naturaleza documental y experimental; la fase documental consiste en el análisis bibliométrico de literatura científica en bases de datos académicas como Scopus, ScienceDirect y Google Académico, con el fin de

identificar el estado del arte sobre los tratamientos termoquímicos aplicados al acero DIN-16MnCr5 y sistematizar la información mediante tablas y matrices comparativas; la fase experimental se desarrolla bajo un diseño factorial completo, en el cual se manipulan las variables independientes y se miden sus efectos sobre variables de respuesta como la dureza, el coeficiente de fricción y la resistencia al desgaste, aplicando herramientas estadísticas como ANOVA y la metodología de superficie de respuesta.

Según el propósito de la investigación: Este estudio combina características de la investigación básica y aplicada; resulta investigación básica debido que genera y sistematiza conocimiento sobre el comportamiento tribológico del acero DIN-16MnCr5 sometido a distintos tratamientos termoquímicos, aportando fundamentos científicos al campo de la tribología; al mismo tiempo, es aplicada, pues sus resultados buscan dar solución a problemas prácticos de la industria metalmecánica y automotriz, al recomendar los tratamientos más eficientes para mejorar el desempeño y prolongar la vida útil de los componentes sometidos a condiciones de desgaste.

3.2. Población y muestra

3.2.1. Población

La población de estudio consiste en probetas de acero DIN 16MnCr5 dispuestas a recibir seis (6) tipos de tratamientos termoquímicos y ser evaluados bajo condiciones tribológicas controladas, permitiendo obtener resultados significativos para su análisis estadístico.

3.2.2. Muestra

La muestra se constituyó por 18 probetas cilíndricas de 20 mm de diámetro y 4 mm de espesor, preparadas según la norma ASTM E3-11, donde se consideraran seis tratamientos superficiales (sin tratamiento, nitrurado, carburado, nitrurado con postoxidación, borurado por

paquete de polvo, y carburado con fosfatado de manganeso); para cada tratamiento, las probetas fueron ensayadas bajo tres cargas normales (5 N, 10 N, 20 N), con tres réplicas por combinación, sumando un total de 54 pruebas experimentales; las variables registradas en estos ensayos incluyeron la tasa de desgaste específica (k), el coeficiente de fricción, la profundidad y el ancho de la huella de desgaste, que cuantifica la capacidad del desgaste

Capítulo 4. Resultados

4.1. Desarrollar un análisis bibliométrico sobre los tratamientos termoquímicos aplicados al acero DIN-16MnCr5, utilizando el software Bibliometrix, con el fin de caracterizar sus propiedades físicas, químicas y tribológicas.

4.1.1. Generar la ecuación de búsqueda considerando las palabras claves del estudio con la finalidad de obtener información precisa en la base de datos Scopus.

La metodología se basa en una búsqueda sistemática de literatura para equilibrar dos aspectos clave, *sensibilidad* (encontrar la mayor cantidad de estudios relevantes) y *especificidad* (evitar resultados irrelevantes) para poder lograr estos requerimientos, Scopus fue la plataforma principal elegida debido a su amplia cobertura multidisciplinaria y sus herramientas de búsqueda avanzadas que permiten crear estrategias complejas con una sintaxis precisa lo que asegura una recopilación de datos exhaustiva y de alta calidad, así mismo se realizaron búsquedas en otras bases de datos como Science Direct y Google académico.

Con el fin de garantizar la recopilación de información científica precisa y relevante al objeto de estudio, se construyó una ecuación de búsqueda integral en la base de datos Scopus, empleando las palabras clave relacionadas con el material de interés, su comportamiento tribológico y los principales tratamientos termoquímicos aplicados; para optimizar la obtención de resultados y maximizar la sensibilidad de la búsqueda, se utilizaron operadores booleanos como *AND*, *OR* y *NOT* que permiten combinar los conceptos de manera lógica, así como *símbolos de truncamiento* como (***) el cual facilita la inclusión de variantes morfológicas de los términos de búsqueda.

El desarrollo de la ecuación de búsqueda siguió un proceso iterativo que incluyó la identificación de conceptos claves derivados del marco teórico de la investigación. Los términos de búsqueda se organizaron en tres bloques conceptuales principales:

1. *Términos relacionados con el material específico DIN-16MnCr5, incluyendo sus variantes nomenclaturales y composiciones equivalentes.*
2. *Términos relacionados con el comportamiento tribológico, a propiedades como fricción, desgaste, dureza y resistencia al desgaste.*
3. *Términos relacionados con tratamientos termoquímicos, incluyendo carburización, recubrimiento de fosfato, nitrurado y borurado.*

Para garantizar la integridad de la estrategia, se empleó un método de optimización que compara los resultados obtenidos mediante términos de indexación estandarizados con aquellos recuperados mediante búsqueda de texto libre, esto permitió identificar términos potencialmente relevantes que pudieron haber sido omitidos inicialmente, esta aproximación sistemática facilita la identificación de sinónimos y variaciones terminológicas que enriquecen la estrategia de búsqueda y mejoran su capacidad de recuperación.

La implementación de truncamientos permitió capturar variaciones morfológicas de los términos técnicos, siendo particularmente útil para términos como "tribolog*" (*que incluye tribology, tribological, tribologist*), "carburiz*" (*carburizing, carburization*), y "nitrid*" (*nitration, nitrured, nitrudation*); los operadores de proximidad y las búsquedas por frases exactas se utilizaron estratégicamente para mejorar la precisión cuando fue necesario combinar conceptos específicos; entendido esto, se estandariza y se designa la siguiente ecuación de búsqueda:

TITLE-ABS-KEY (("DIN Steel" OR "DIN alloy" OR "DIN 16MnCr5" OR "16MnCr5") AND (tribolog OR wear OR "wear resistance" OR friction OR "friction coefficient" OR "wear rate") AND (nitrid* OR carburiz* OR borid* OR phosphat* OR "post-oxidation" OR thermochem* OR "surface treatment"))*

4.1.2. Buscar información académica relacionada con los tratamientos termoquímicos aplicados al acero DIN-16MnCr5, utilizando bases de datos académicas tales como, Scopus, ScienceDirect y Google académico. con el fin de recopilar información relevante para el análisis bibliométrico y la caracterización de propiedades del material.

La estrategia metodológica implementada permitió obtener una recopilación exhaustiva de artículos científicos relevantes sobre el comportamiento tribológico del acero DIN-16MnCr5 sometido a diferentes tratamientos termoquímicos, incorporando estudios experimentales, comparativos y de caracterización con enfoques estadísticos robustos; para garantizar la reproducibilidad y el rigor científico, se documentó detalladamente el proceso de búsqueda, incluyendo la sintaxis específica y los criterios de selección aplicados; partir de esta metodología, se obtuvieron 104,469 resultados distribuidos según la base de datos, como se detalla en la siguiente tabla:

Tabla 2. Recopilación de Información para el Análisis Bibliométrico

Base de Datos	Resultados Obtenidos
ScienceDirect	103,947
Scopus	352
Google Académico	170

El análisis de los resultados obtenidos revela una notable disparidad en el número de registros entre las bases de datos consultadas. la gran cantidad de resultados arrojados por ScienceDirect en comparación con Scopus y Google Académico se atribuye a la naturaleza y el alcance de cada plataforma; ScienceDirect, al ser una base de datos editorial que alberga una

vasta colección de revistas y libros, tiende a arrojar un mayor volumen de resultados, mientras que Scopus se enfoca en la indexación de citas y resúmenes de literatura revisada por pares; por su parte, Google Académico, aunque es una herramienta poderosa, puede tener una indexación menos específica para esta área de estudio; es importante señalar que, a pesar de la magnitud de los resultados iniciales, una parte considerable de estos puede no ser directamente relevante para el objetivo principal de este estudio, lo cual es una característica inherente a los procesos de búsqueda bibliográfica, la refinación posterior de los resultados será crucial para filtrar la información pertinente; así mismo, se reconoce como limitación el uso exclusivo de estas bases de datos, lo que pudo haber restringido la identificación de literatura relevante disponible en otras fuentes especializadas, afectando así la exhaustividad y representatividad del análisis documental.

4.1.3. Clasificar la información consultada sobre las propiedades físicas y mecánicas del acero DIN-16MnCr5, elaborando un resumen comparativo mediante la elaboración de tablas y matrices técnicas que permitan evidenciar los cambios en las propiedades del material en función del tratamiento aplicado.

El análisis bibliométrico se llevó a cabo empleando la biblioteca Bibliometrix y la plataforma BiblioShiny del software RStudio (V. 3.7.2.6), ampliamente reconocidos como herramientas de código abierto para el estudio, filtrado y organización de la literatura científica en áreas específicas; la información se recopiló directamente de la base de datos Scopus el 12 de agosto de 2025, tomando como referencia publicaciones sobre los procesos de estudio que serán aplicados, teniendo en cuenta la ecuación de búsqueda establecida.

Este permitió obtener métricas cuantitativas relacionadas con la productividad académica, distribución geográfica, redes de colaboración entre autores, instituciones de mayor impacto y

revistas especializadas; dichos resultados facilitaron la identificación y clasificación de las tendencias más actuales en torno al tema, a través del uso de la ecuación de búsqueda presentada; asimismo, la base de datos Scopus aportó información detallada de cada publicación, incluyendo título, resumen, autores, palabras clave, número total de citas, afiliaciones institucionales, entre otros elementos de relevancia para la caracterización del campo de estudio.

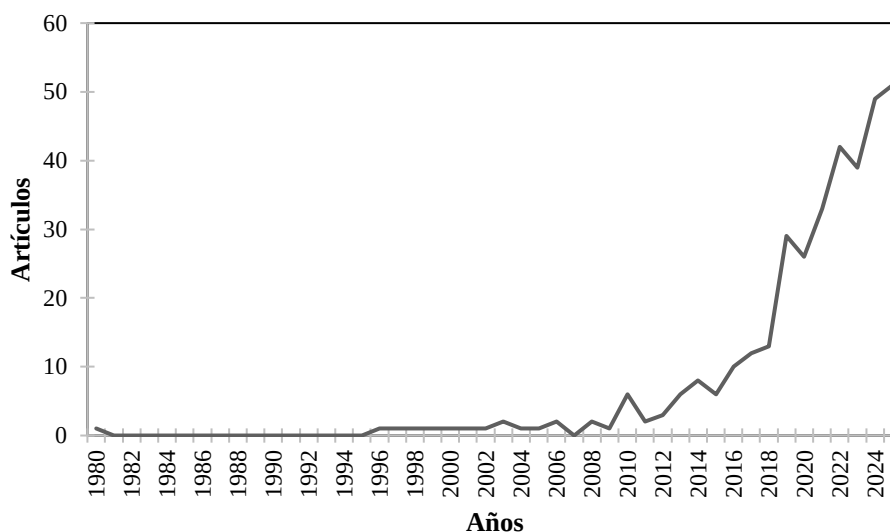
Figura 4. Nube de palabras generada en el análisis.



El análisis bibliométrico se realizó a partir de los 352 documentos obtenidos en Scopus, los cuales han sido publicados en el período comprendido entre 1980 y 2025, distribuidos en 171 fuentes; de esta manera se evidencia que la tasa de crecimiento anual de la producción fue de 9.13 %, lo cual indica que la investigación sobre tratamientos termoquímicos aplicados al acero DIN-16MnCr5 ha mostrado una evolución sostenida en las últimas cuatro décadas; como se muestra en la Figura 5, se evidencia un aumento significativo en el número de publicaciones a partir del año 2010, este crecimiento refleja un incremento progresivo del interés en la

comunidad científica por las aplicaciones de este acero en sectores como la industria, la ingeniería mecánica y la tribología.

Figura 5. Producción científica anual



En cuanto a la tipología de documentos, se observa un claro predominio de los artículos de revista los cuales representan el 76.14% de los documentos presentados, seguidos de los documentos de conferencia con un total de 12.78%, y por su parte las revisiones, los libros y los capítulos de libros están presentes en menor medida, tal como se especifica en la tabla 3.

Tabla 3. Tipología de documentos.

Tipos de Documentos	Cantidad
Artículo	268
Libro	2
Capítulo de libro	8
Documentos de conferencia	45
Revisiones	29

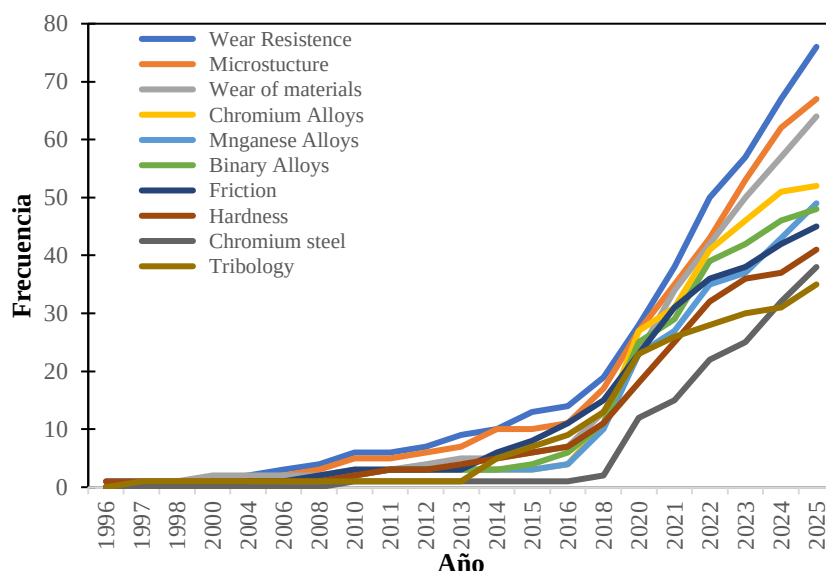
Este resultado refleja que la difusión del conocimiento en este campo se realiza principalmente a través de artículos indexados, lo que asegura una mayor visibilidad y citación de los estudios; los documentos de conferencia, por su parte, representan una fracción

importante, lo que evidencia el interés de la comunidad académica en presentar avances preliminares en congresos especializados antes de su consolidación en publicaciones de mayor impacto; el conjunto de documentos presenta un promedio de 10.64 citas por artículo, lo que sugiere que, aunque no se trata de un campo con un impacto extremadamente alto, sí existe un nivel de reconocimiento y citación significativo dentro de la literatura científica, el promedio de edad de los artículos es de 4.95 años, lo que demuestra que la mayor parte de la investigación se concentra en la última década, confirmando que se trata de un tema en consolidación y con alta vigencia académica; en total, se identificaron 1,348 autores, de los cuales únicamente 14 corresponden a artículos individuales, esto evidencia que la producción científica en este campo se caracteriza por un marcado enfoque colaborativo, con un promedio de 4.72 coautores por documento, asimismo, el porcentaje de colaboración internacional asciende al 16.48 %, lo cual refleja un grado moderado de interacción entre investigadores de diferentes países, este nivel de cooperación internacional, aunque no elevado, es relevante para un campo de aplicación tecnológica con fuerte vínculo con industrias regionales.

En este estudio, las palabras clave se extrajeron y analizaron de acuerdo con su frecuencia de aparición en los documentos; estos constituyen un recurso fundamental para representar los temas centrales de la investigación, ya que permiten visualizar tendencias y facilitar la búsqueda de temas específicos en las bases de datos, se seleccionan las palabras clave de autor, debido a que ofrecen una descripción más completa que las denominadas palabras clave plus; al comparar los periodos 1996 – 2010 y 2011 – 2025, se identifican diferencias notables en el enfoque de la investigación, durante la primera etapa, la frecuencia de palabras clave fue baja y dispersa, lo que evidencia un campo en consolidación, con interés limitado en aspectos generales como el desgaste y la fricción; n contraste, en el periodo 2011 – 2025 se observa un

crecimiento sostenido y acelerado, especialmente a partir de 2017, con un aumento significativo en las publicaciones relacionadas.

Figura 6. Crecimiento de las diez palabras principales a lo largo del tiempo.

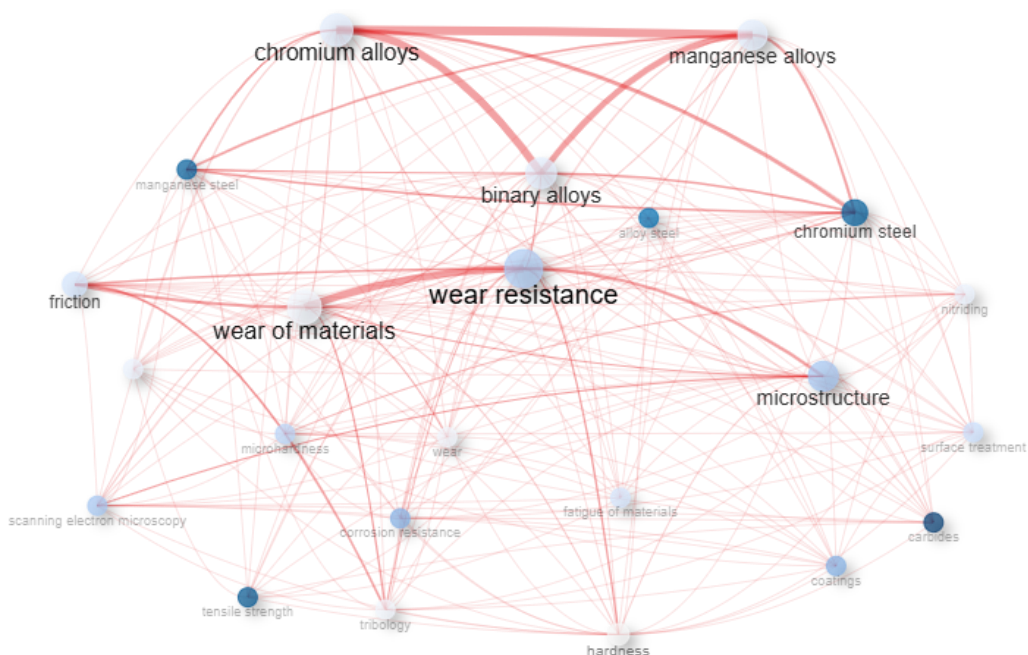


Asimismo, como se presenta en la Figura 6, el segundo periodo muestra la aparición y fortalecimiento de términos vinculados a aleaciones específicas *chromium alloys*, *manganese alloys*, *chromium steel*, lo que indica una orientación más aplicada hacia la optimización de propiedades mecánicas y tribológicas en materiales específicos, este cambio de enfoque refleja la maduración del área, pasando de estudios exploratorios iniciales a investigaciones más especializadas y orientadas al diseño de materiales con mayor resistencia y durabilidad; para el análisis, se consideraron en mayor parte las publicaciones a partir del año 2010, dado el incremento característico en su número, el aumento significativo en la frecuencia y densidad de interrelaciones observadas, tal como se ilustra en la Figura 7, refleja la creciente relevancia conceptual y práctica de los términos analizados en el marco de la investigación sobre materiales y sus propiedades tribológicas, la aparición

y

científica reciente, sino que también enfatiza la resistente relación entre estos conceptos en el estudio integrado del comportamiento bajo condiciones de desgaste, este patrón de correlación sugiere que los enfoques multidisciplinarios, que combinan análisis microestructurales con evaluaciones tribológicas, se han consolidado como esenciales para la comprensión y mejora del desempeño funcional de aleaciones metálicas, como es el caso de cromo y manganeso, en el acero DIN-16MnCr5; en consecuencia, esta interconectividad sustenta la necesidad de profundizar en tratamientos superficiales y modificaciones microestructurales orientadas a elevar la resistencia al desgaste, situando estos aspectos como ejes centrales en la dirección de futuras investigaciones.

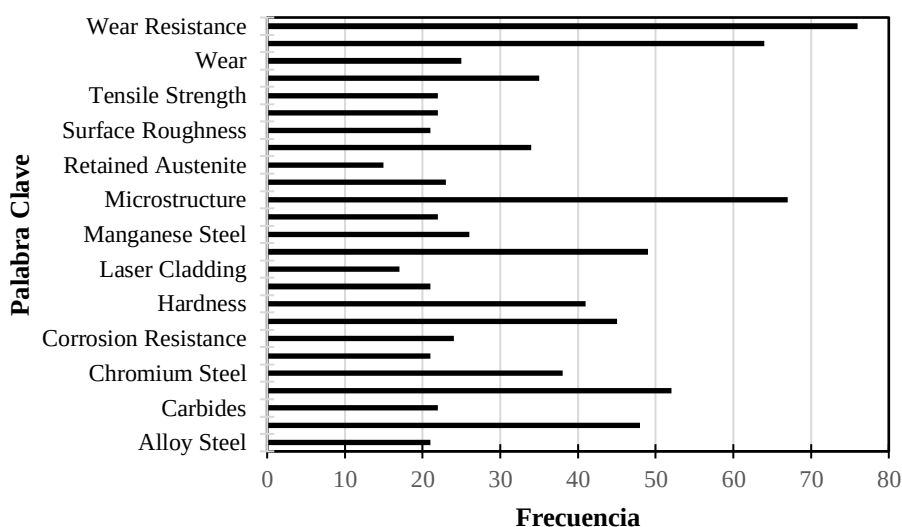
Figura 7. Red de coocurrencia entre palabras clave.



Como se observa en la Figura 8, los resultados evidencian las 13 palabras claves más comunes y sus vínculos, siendo resistencia al desgaste la de mayor recurrencia en las publicaciones evaluadas, asimismo, se destaca la relevancia tanto de la composición del material como del análisis de sus propiedades, estos resultados confirman que la investigación en el

campo de los aceros y tratamientos superficiales se ha orientado principalmente hacia el mejoramiento de la resistencia al desgaste, así como al estudio de la microestructura y de aleaciones específicas, lo que refleja una tendencia general que ha guiado el desarrollo de estas investigaciones; cabe resaltar que todas las palabras clave analizadas aparecen en al menos 15 documentos.

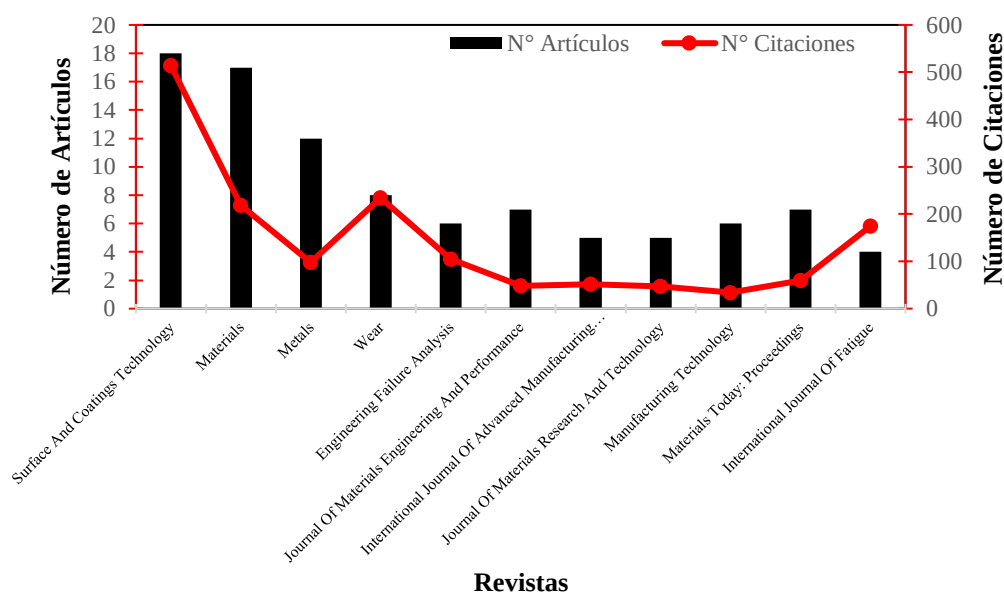
Figura 8. Palabras claves más comunes en publicaciones.



Las revistas más influyentes en el estudio bibliométrico se presentan en la Figura 9, donde se evidencia la distribución de artículos y citas en las principales revistas que abordan investigaciones sobre tratamientos termoquímicos aplicados al acero DIN-16MnCr5; se identificaron diversas revistas y fuentes que agrupan la producción científica, entre ellas, las 10 principales concentran la mayor parte de los artículos publicados y citas recibidas, la revista más relevante es *Surface and Coatings Technology*, que presenta tanto el mayor número de artículos como el mayor volumen de citas consolidándose como la principal fuente de difusión en el área; en segundo lugar, *Materials* y *Metals* destacan por su elevada producción y citas, mientras que *Wear* se posiciona como una revista de referencia con un impacto relevante a pesar de un menor número de publicaciones, otras fuentes como *Engineering Failure*

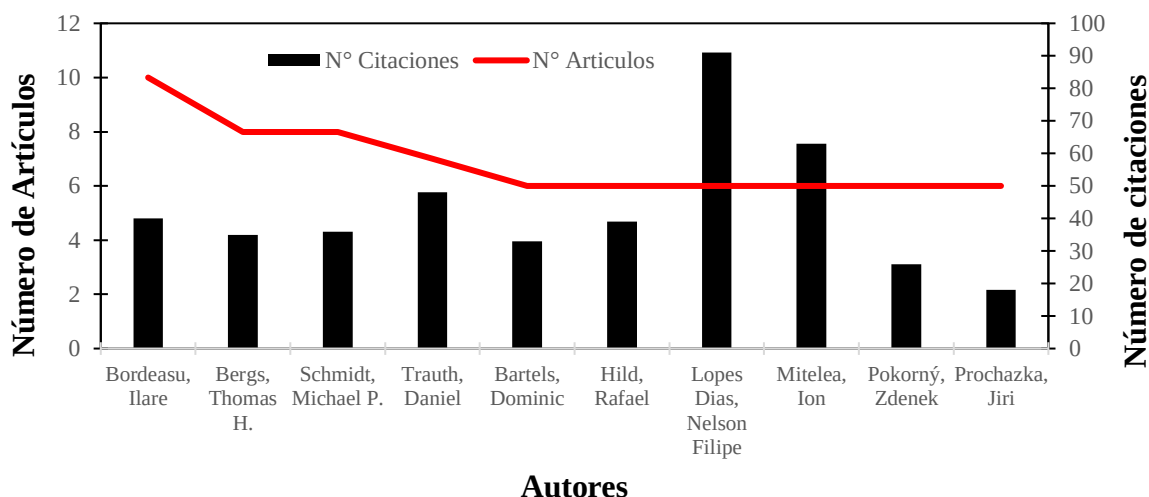
Analysis y Journal of Materials Engineering and Performance aportan contribuciones significativas, aunque con menor alcance, estos resultados permiten concluir que la investigación en este campo se concentra en un núcleo específico de revistas de materiales y tribología, lo que refleja la especialización y consolidación del tema en la literatura científica.

Figura 9. Distribución de artículos y citas por revistas mas influyenes.



La Figura 10, presenta una comparación entre el número de artículos publicados y el número de citas recibidas por los principales autores en el área de tribología, además se observa que, aunque algunos investigadores poseen un mayor número de publicaciones, el impacto medido en función del número de citas varía significativamente entre autores, este análisis permite identificar tanto la productividad científica como la influencia de los investigadores en la disciplina, aportando una visión integral sobre la relevancia y reconocimiento de sus contribuciones en la comunidad académica

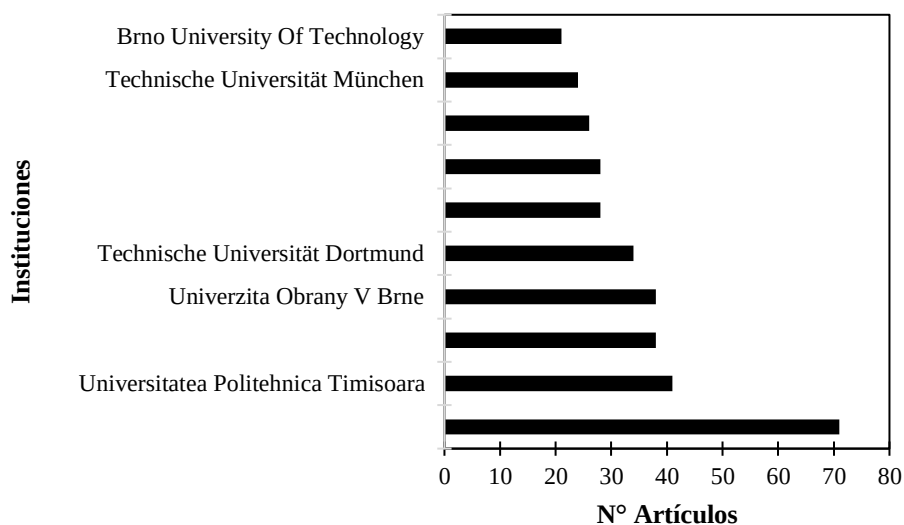
Figura 10. Principales autores, su impacto en número de artículos y número de citas.



El análisis del número de artículos publicados por diferentes instituciones revela una marcada disparidad en la producción científica dentro del área de estudio; la Figura 11, presenta las diez instituciones más influyentes encontradas en el análisis; la universidad alemana *Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule* es sobresaliente con un total de 71 artículos divulgados, casi duplicando la producción de la universidad rumana *Universitatea Politehnica Timisoara* la cual presenta un total de 41 publicaciones, en contraste, instituciones como la Brno University of Technology y la Technische Universität München presentan niveles de publicación notablemente menores, situándose alrededor de los 20 artículos; este contraste pone de manifiesto que, aunque varias universidades contribuyen al avance del conocimiento, algunas instituciones actúan como líderes indiscutibles en términos de volumen de publicaciones, mientras que otras mantienen una presencia más modesta pero igualmente significativa en la red científica, esta distribución puede estar influenciada por factores como el enfoque de

investigación, recursos disponibles y colaboración internacional, aspectos que resultan relevantes para entender la dinámica académica y la generación de conocimiento en el campo específico,

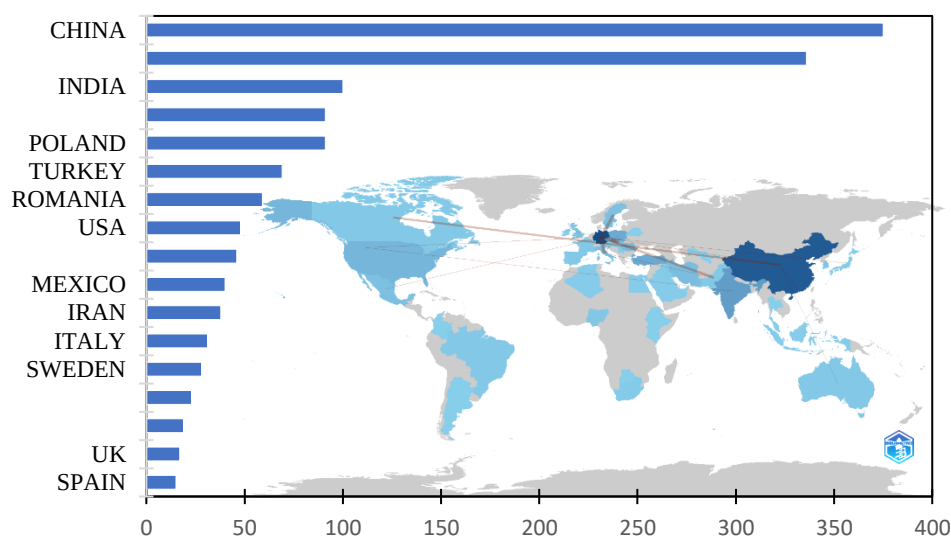
Figura 11. Distribución del número de artículos publicados por instituciones.



La Figura 12, presenta un mapa de colaboración internacional por países, donde se representan, mediante conexiones geográficas y gradientes de color, las relaciones de cooperación en investigación o producción académica; en el gráfico se observa que el nodo central de colaboración se concentra en Alemania, país desde el cual parten la mayoría de las conexiones hacia diferentes regiones del mundo, esto sugiere que Alemania constituye el principal eje articulador de las redes de cooperación internacional analizadas; asimismo, se evidencia que los países con mayor intensidad de colaboración se encuentran sombreados en tonalidades más oscuras, destacando principalmente China, junto con otros países europeos como Italia, Francia y Reino Unido, que aparecen como actores relevantes dentro de la red; la presencia de vínculos con naciones de América del Norte como Estados Unidos y Canadá, así como con países de América Latina como México, Colombia, Brasil y Chile, indica que la colaboración trasciende fronteras continentales y refleja una red científica de alcance global; en

el continente asiático, además de China, se identifican colaboraciones notorias con India y Japón, lo que pone de manifiesto el peso estratégico de estas naciones en el intercambio académico y científico, de igual manera, Australia también se perfila como un socio relevante dentro de la red; el mapa utiliza un sistema cromático en el que las tonalidades claras representan países con menor grado de colaboración, mientras que las tonalidades más oscuras reflejan una mayor densidad de relaciones, este patrón visual facilita la identificación de polos de cooperación y permite reconocer la distribución desigual de la producción científica a nivel mundial, esto pone en evidencia tanto la concentración de capacidades científicas en estas regiones como la necesidad de seguir fortaleciendo la inclusión de otras áreas geográficas para lograr un panorama más equilibrado de colaboración global; complementariamente, el gráfico de barras horizontales muestra la distribución cuantitativa de este indicador de colaboración, evidenciando que China y Alemania lideran con las cifras más altas, superiores a 300 unidades, seguidos por países como Republica Checa e India, que presentan valores intermedios cercanos a las 100 unidades; posteriormente se ubican naciones como Turquía, Rumania y Polonia, con registros entre 40 y 60 unidades, mientras que los valores más bajos corresponden a España y Australia, con menos de 20 unidades, este contraste entre el mapa y el gráfico permite apreciar tanto la dimensión relacional de la cooperación científica a través de nodos y conexiones, como su dimensión cuantitativa.

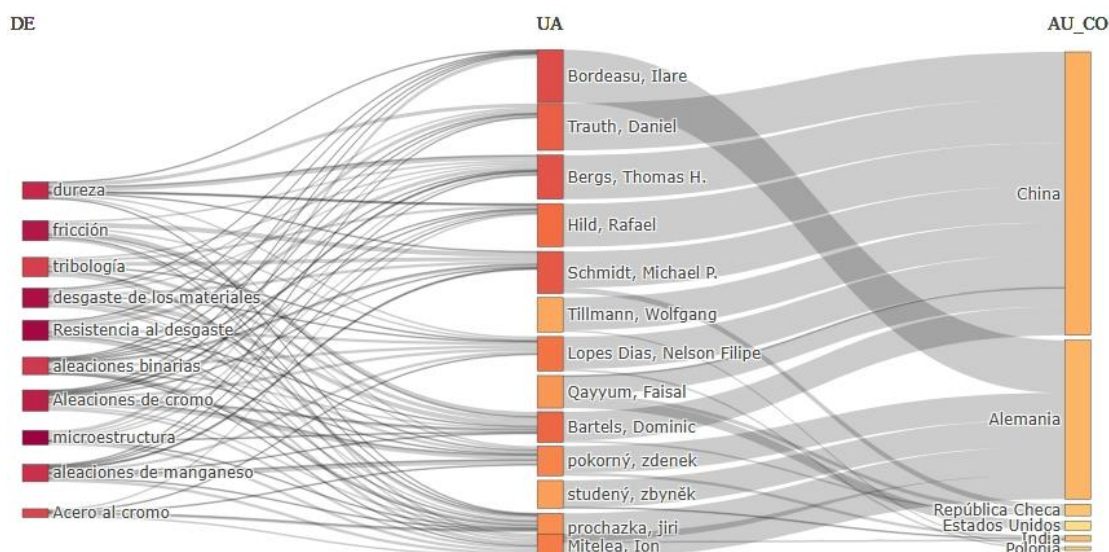
Figura 12. Mapa mundial de colaboración entre países.



Nota. Gráfica obtenida en el software Bibliometrix.

Finalmente, la Figura 13, es una visualización de flujo tripartita que utiliza un diagrama de Sankey para mapear la estructura de la producción científica y las interconexiones bibliométricas dentro del dominio de la ciencia e ingeniería de materiales, específicamente en tribología y siderurgia; la configuración segmenta el análisis en tres conjuntos de nodos: los Nodos Temáticos (DE), que establecen el dominio conceptual con descriptores como dureza, tribología y aleaciones de acero; los Nodos de Agente (UA), que identifican a los autores individuales que median la producción; y los Nodos Geográficos (AU_CO), que indican la afiliación institucional/geográfica de los investigadores; las aristas ponderadas del diagrama cuantifican la magnitud de la vinculación, poniendo de manifiesto que una parte considerable del flujo temático converge hacia autores cuya producción se consolida en nodos de alta capacidad investigadora, específicamente, el análisis revela una alta concentración de conectividad y producción en naciones como China y Alemania, sugiriendo su papel central en la especialización y la distribución del conocimiento técnico-científico asociado a las palabras clave representadas, permitiendo inferir patrones de dominancia temática global en la disciplina.

Figura 13. Visualización de la Conexión entre Descriptores de Investigación, Autores Contribuyentes y Ubicación Geográfica



4.2. Obtener las propiedades mecánicas y tribológicas del acero DIN-16MnCr5 sometido a distintos tratamientos termoquímicos, considerando variables como dureza superficial, coeficiente de fricción, tasa de desgaste y resistencia al desgaste.

4.2.1. Preparar las muestras del acero DIN-16MnCr5 para ser sometido a 6 tratamientos termoquímicos diferentes (sin tratar, nitrurado, carburado, nitrurado con postoxidación, recubrimiento de fosfato de manganeso y el proceso de borurado por paquete de polvo).

Las probetas utilizadas en esta investigación son procedentes de un lote de acero DIN-16MnCr5, las cuales fueron recibidas en su estado original garantizando que no hayan sido sometidas a tratamientos termoquímicos previos; las muestras, presentaban una geometría de disco plano-paralelo con 20 mm de diámetro y 4 mm de espesor, para identificar su microestructura inicial se utilizó una solución de Nital al 2 % (98 mL de alcohol etílico con 2 mL de ácido nítrico) durante 10s, en donde se identificó la presencia de una microestructura ferrítico-perlítica típica del estado de laminación o normalizado, con una dureza superficial promedio de

2.1 $\pm$ 0.2 GPa, que concuerda con los valores reportados por Brodyanski et al. (2020) en la literatura para este tipo de acero; la composición química de material fue verificada mediante espectrofotometría de absorción atómica, confirmando que cumpla con las especificaciones establecidas por y Usta, (2010); quienes reportan una composición química nominal (% en peso máx.) de 0.14-0. 0.40 Si, 1.0-1. . .015 S, 0.8-1. .30 Cu y Fe como base, esta composición es característica de un acero de cementación de baja aleación diseñado para tratamientos termoquímicos que buscan un núcleo tenaz y una superficie dura.

La preparación de las probetas se llevó a cabo minuciosamente para garantizar la uniformidad y la trazabilidad de los resultados, su preparación previa al tratamiento se adhirió al protocolo estandarizado ASTM E3-11, el cual incluyó operaciones de corte, pulido mecánico con abrasivos de granulometría decreciente y limpieza ultrasónica para eliminar cualquier residuo superficial, este procedimiento es crucial para evitar distorsiones en los resultados de los análisis posteriores; las probetas acondicionadas fueron sometidas a seis condiciones superficiales diferenciadas, diseñadas para evaluar el impacto de cada tratamiento en las propiedades tribomecánicas del material, cada proceso se llevó a cabo bajo un estricto control paramétrico para asegurar la consistencia y la reproducibilidad de las modificaciones superficiales; en el marco de este estudio, el proceso de temple consistió en una austenitización a 860 °C durante 30 minutos seguida de enfriamiento en aceite, el cual se aplicó exclusivamente después del tratamiento de carburización, y fue utilizado específicamente en las muestras correspondientes a los tratamientos nitrurado con postoxidación y carburización seguida de fosfatado con manganeso, por otro lado, las probetas sometidas a nitrurado y borurado no fueron templadas, ya que en estos procesos la formación de capas de compuestos duros se realiza mediante difusión de

elementos en estado sólido, permitiendo el desarrollo de microestructuras endurecidas sin necesidad de un ciclo térmico adicional de temple.

A continuación se detallan las seis condiciones superficiales aplicadas en el estudio y se especifica su proceso de ejecución:

Estado de Referencia (RM): Muestras en condición original, sin aplicación de tratamiento termoquímico ni recubrimiento superficial, empleadas como referencia para establecer las propiedades iniciales del material base.

Nitrurado en baño de sal (N): Como lo menciona Wong-Ángel et al. (2021) este método se basa en sumergir una pieza en un baño de sal fundida para difundir nitrógeno hacia la superficie del material, lo que resulta en la formación de una capa compuesta y una zona de difusión endurecida; en este caso se utilizó un proceso de baño de sales fundidas (TF1/REG1), proporcionado por el fabricante Hef Durferrit; la composición de la mezcla de sales utilizada consistió en una formulación industrial comercial de Hef Durferrit, que contenía entre un 60% y 70% en peso de cianuro de sodio (NaCN) y entre un 30% y 40% en peso de cianuro de potasio (KCN), aunque esta formulación presenta un rango de composición, representa una práctica industrial habitual para garantizar la estabilidad y la reactividad del baño de sales, permitiendo ajustes menores para mantener el potencial de nitrógeno y la eficiencia del proceso a lo largo del tiempo; para este estudio, se aseguró que la composición del baño se mantuviera constante en todas las muestras para garantizar la uniformidad de los resultados, el control riguroso de los parámetros de proceso (temperatura y tiempo de inmersión) fue fundamental para lograr una difusión uniforme de los elementos y la reproducibilidad de las propiedades de la capa nitrurada; el protocolo termoquímico se implementó en dos etapas principales, siguiendo los parámetros estipulados por Funatani, (2004), la primera consistió en precalentar las probetas en un horno

auxiliar a una temperatura de 420 °C durante un período de 15 a 20 minutos para minimizar el choque térmico en las muestras antes de ser introducidas en el baño de sales a una temperatura mayor, transcurrido este tiempo se procede a realizar la segunda etapa, en donde son sumergidas directamente en un baño de sales fundidas a una temperatura de 580 °C manteniendo esta condición durante 6 horas; durante este tiempo, los átomos de nitrógeno, liberados por la descomposición de los cianuros en el baño de sales, se difunden en la capa superficial del acero; allí, reaccionan con elementos de aleación como el cromo y el manganeso, formando nitruros estables, la capa de difusión resultante se compone principalmente de fases de nitruro de hierro; - - , estas fases de nitruro son extremadamente duras y, cuando están finamente dispersas, confieren a la superficie del material una alta dureza, una resistencia superior al desgaste y una mejora significativa en la resistencia a la fatiga y a la corrosión, la efectividad del tratamiento de nitrurado depende de varios factores clave, incluyendo la composición del acero, la temperatura de tratamiento, el tiempo de exposición y la formulación específica del baño de sales, todos los cuales fueron controlados rigurosamente en este estudio para optimizar el rendimiento tribológico del acero DIN-16MnCr5.

Carburado Gaseosa (C): Este proceso se efectuó en un baño de sales fundidas a base de cianuro de sodio (GS 540/C3, HEF Durferrit), manteniendo una temperatura de 860 °C durante un tiempo de exposición de 1 h; dicho tratamiento termoquímico se fundamenta en la transferencia y difusión intersticial de átomos de carbono hacia la capa superficial del acero DIN-16MnCr5, generando un gradiente composicional entre la superficie enriquecida en carbono y el núcleo con bajo contenido de este elemento; como lo indica Bepari (2017) esta condición microestructural permite incrementar de manera significativa la dureza superficial y la resistencia al desgaste, manteniendo simultáneamente la tenacidad del núcleo, lo cual es

fundamental para garantizar un adecuado comportamiento mecánico en aplicaciones donde coexisten esfuerzos de contacto y solicitaciones dinámicas.

El medio de carburado empleado consistió principalmente en cianuro de sodio (NaCN), que actuó como donador de carbono, acompañado de aditivos activadores y estabilizadores patentados por HEF Durferrit; estos aditivos, generalmente constituidos por carbonatos alcalinos de carbono y en la conservación de la reactividad química del baño durante todo el proceso, si bien la formulación específica se encuentra protegida por patente, se enmarca dentro de composiciones industriales ampliamente documentadas en la literatura, las cuales presentan alta confiabilidad y desempeño comprobado en la carburado de aceros de baja aleación; tras el tratamiento de difusión, las probetas fueron sometidas a un temple en un aceite mineral de enfriamiento rápido (Durixol W72, Quaker Houghton), con el propósito de inducir la transformación martensítica en la capa superficial carburizada., este enfriamiento controlado permitió alcanzar una microestructura caracterizada por la presencia de martensita de alta dureza en la superficie y un núcleo con microestructura ferrítico-perlítica o bainítica, garantizando así un equilibrio entre resistencia al desgaste y ductilidad interna; la caracterización metalográfica posterior se realizó mediante microscopía óptica en muestras atacadas con una solución de Nital al 2%, en donde se reveló una profundidad efectiva de capa carburizada del orden de $\sim 50 \mu\text{m}$, evidenciando la formación de una zona superficial endurecida y resistente al desgaste, dicha capa confiere propiedades tribológicas mejoradas, posicionando al material como una alternativa idónea para componentes mecánicos expuestos a condiciones severas de fricción y contacto repetitivo, tales como engranajes, ejes y elementos de transmisión de potencia.

Nitrurado con Postoxidación (QPQ): Este tratamiento fue aplicado a probetas de acero DIN-16MnCr5 previamente sometidas a un proceso de nitrurado por sales fundidas, esta etapa complementaria tiene como finalidad optimizar las propiedades tribológicas y de resistencia a la corrosión del material, generando una capa superficial de óxido compacta y adherente.

Inicialmente, las probetas fueron sometidas a un precalentamiento a 380 °C durante un intervalo de 15 a 20 minutos, con el objetivo de garantizar la homogeneización térmica y evitar gradientes internos de temperatura que pudiesen afectar la uniformidad del tratamiento; posteriormente, se procedió a la inmersión en un baño de sales oxidantes (AB1), formulación mantenida a 420 °C durante 20 minutos, dicho medio oxidante favorece la formación de una película superficial de óxidos de hierro, cuya morfología y adherencia resultan determinantes para la protección contra la corrosión y el desgaste; una vez concluida la etapa de oxidación primaria, las probetas fueron sometidas a un pulido mecánico controlado, con el propósito de mejorar el acabado superficial y reducir los niveles de rugosidad originados durante las etapas previas de nitrurado, tras este pulido, se efectuó una segunda inmersión en el mismo baño oxidante a 420 °C durante un lapso de 10 minutos, consolidando así el desarrollo de una capa superficial de óxidos finos, continuos y adherentes, tal como lo indica Jacquet et al. (2011).

El procedimiento posterior a la oxidación, se enmarca en la metodología conocida como QPQ (Quench Polish Quench), la cual integra de manera secuencial seis etapas para su realización, tales como; *desengrase, precalentamiento, nitrurado, oxidación, lavado y enfriamiento en aceite*, garantizando una mejora sustancial de las propiedades tribológicas y de resistencia a la corrosión de los aceros de baja aleación Campagnolo et al., (2019).

En el presente estudio, la etapa de nitrurado se llevó a cabo en un baño de sales TF1 a 580 °C durante 60 minutos, seguida de la oxidación en sales AB1 a 420 °C por 20 minutos; aunque la literatura especializada reporta rangos operativos más amplios, con valores de 30 a 120 minutos para la nitrurado y 20 a 30 minutos para la oxidación, en este caso se seleccionaron condiciones fijas con el propósito de asegurar la reproducibilidad y el control experimental del tratamiento; asimismo, dependiendo del estado superficial posterior a la nitrurado, se implementó el pulido mecánico como estrategia adicional para disminuir la rugosidad antes de la etapa de oxidación, en concordancia con metodologías reportadas por diversos autores como es el caso de Díaz Guillén et al., (2012); finalmente, las probetas tratadas fueron sometidas a un enfriamiento rápido en agua a temperatura ambiente, seguido opcionalmente de una inmersión en aceite, con el fin de incrementar la protección contra la corrosión, este protocolo se ajustó a lo establecido en la metodología descrita en la literatura, permitiendo obtener una capa de óxido superficial densa, adherente y estable, la cual contribuye de manera decisiva al incremento de la resistencia al desgaste adhesivo y abrasivo, así como a la mitigación de los procesos corrosivos en ambientes agresivo.

Recubrimiento de Fosfato de Manganeso (CMnP): Las probetas previamente carburizadas fueron sometidas a un tratamiento de conversión superficial mediante recubrimiento de fosfato de manganeso, utilizando la solución comercial Enfos M400 (Enthone OMI), con el fin de garantizar la formación homogénea del recubrimiento y favorecer la adherencia del mismo sobre la superficie metálica, antes de la carburización las muestras fueron sumergidas en un baño de fosfato a 90 °C durante 15 minutos, durante este proceso químico se genera una reacción de conversión entre la superficie metálica y los iones presentes en la solución, lo que conduce a la nucleación y crecimiento de una capa cristalina de fosfato de manganeso; la capa obtenida

cumple una doble función, según Weng et al., (1997), en primer lugar, actúa como una barrera protectora frente a la acción de agentes corrosivos, y en segundo lugar, proporciona una superficie microporosa capaz de retener lubricantes, lo cual resulta esencial para aplicaciones tribológicas en condiciones de fricción y carga elevadas; el espesor y la densidad del recubrimiento dependen de variables como la rugosidad inicial de la superficie, la composición química del sustrato y las condiciones de operación del baño; en el presente estudio, el peso de la capa depositada se encontró en el rango de 0.2 a 3.0 g/m², valores consistentes con los reportados en la literatura técnica para procesos de fosfatado manganesico; como lo menciona Wong Ángel et al., (2021) este tipo de recubrimiento se emplea ampliamente en la industria para incrementar la resistencia al desgaste, mejorar la lubricidad y reducir el coeficiente de fricción en componentes mecánicos sometidos a tensiones de contacto severas, tales como engranajes, elementos de transmisión y componentes de maquinaria pesada.

Borurado por Paquete de Polvo (PPBP): Este proceso, Powder Pack Boriding Process (PPBP) constituye un tratamiento termoquímico de estado sólido destinado a incrementar la dureza superficial, la resistencia al desgaste y la vida útil de componentes mecánicos sometidos a condiciones de fricción severa ; en este procedimiento, las probetas se dispusieron dentro de un contenedor hermético, completamente cubiertas por una mezcla reactiva en polvo compuesta por

o de boro actúa como donador primario de boro,

como diluyente inerte que contribuye al control de la reactividad del medio; el conjunto se introdujo en un horno de atmósfera abierta y se mantuvo a una temperatura de 950 °C durante un período de 4 h, sin empleo de gases protectores adicionales, una vez finalizado el ciclo de

tratamiento, el contenedor fue extraído del horno y se dejó enfriar de manera natural hasta alcanzar la temperatura ambiente (25 °C), lo cual permitió la estabilización microestructural de las fases formadas; durante el proceso, los átomos de boro difunden intersticialmente en la red cristalina del acero, reaccionando con el hierro para dar lugar a la formación de capas de boruros, , la distribución y predominancia relativa de estas fases dependen tanto de la composición química del material base como de las condiciones de procesamiento, la capa resultante se caracteriz fuerte adherencia al sustrato, lo que minimiza el riesgo de delaminación bajo sollicitaciones mecánicas extremas; el espesor de la capa de boruro desarrollada en este estudio alcanzó valores garantiza un desempeño tribológico sobresaliente, esta capa confiere al acero propiedades superiores de resistencia al desgaste abrasivo y adhesivo, haciéndolo especialmente apto para aplicaciones industriales de alto contacto y alta temperatura, donde los mecanismos convencionales de endurecimiento resultan insuficientes.

Estos tratamientos fueron elegidos estratégicamente para cubrir un amplio espectro de modificaciones microestructurales y tribológicas en la superficie del acero, permitiendo un análisis comparativo íntegro de sus efectos en la dureza superficial y el comportamiento frente al desgaste.

4.2.2. Someter cada muestra a ensayos tribológicos bajo tres niveles de carga diferentes (5 N, 10 N y 20 N) usando un tribómetro, para medir dureza superficial, coeficiente de fricción, tasa de desgaste y resistencia al desgaste.

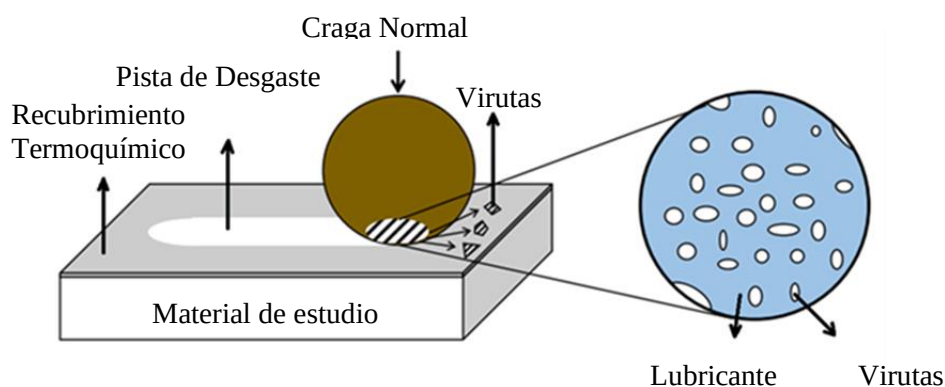
En la superficie de materiales expuestos a fricción o estrés mecánico se desarrollan capas protectoras que, de acuerdo con la literatura, suelen ser interrumpidas o eliminadas en las zonas de contacto durante el deslizamiento Kerl et al., (2025).

La Figura 14, muestra los productos de desgaste característicos generados bajo condiciones de movimiento alternativo lineal, destacando la aparición de pistas de desgaste y la correspondiente pérdida de material; dichos fenómenos, observados en la interfaz de contacto

esgaste particulares,

los cuales están determinados por la interacción de los factores mecánicos presentes durante el ensayo.

Figura 14. Representación esquemática ensayo de desgaste por deslizamiento en seco.



Nota. Imagen tomada de García León et al (2023)

El ensayo de desgaste por deslizamiento en seco del acero DIN-16MnCr5 se llevó a cabo en una cámara de ensayo controlada, con temperatura ambiente en el rango de 22 a 26 °C y una humedad relativa comprendida entre 40 y 50 %. Para la caracterización tribológica se empleó un tribómetro modelo UMT-2/CETR, configurado en modo de desgaste lineal alternativo bajo

condiciones secas, tal como se ilustró en la Figura 1, Las condiciones experimentales del ensayo fueron establecidas de la siguiente manera: recorrido lineal de 10 mm, distancia total de desgaste de 100 m, velocidad de desplazamiento de 30 mm/s y aplicación de cargas normales de 5, 10 y 20 N, las cuales fueron codificadas como -1, 0 y 1, respectivamente para facilitar su posterior análisis estadístico; previo a los ensayos, las superficies de las probetas fueron preparadas mediante un proceso de lijado con papeles abrasivos de carburo de silicio (SiC) de granulometría

partículas en el rango de 0.03 a 0. ; este procedimiento permitió obtener un acabado

.

norma ASTM G133-05; considerando las configuraciones descritas, como material contraparte

características de elevada dureza ($H = 22 \text{ GPa}$), módulo de elasticidad ($E = 350 \text{ GPa}$) y

.3); esta es elegida contracuerpo debido a su carácter químicamente inerte, su elevada dureza y su uso frecuente en ensayos tribológicos estandarizados que reproducen condiciones de desgaste abrasivo y adhesivo; no obstante, la fuerza normal y la velocidad de corte seleccionadas corresponden a los parámetros combinados empleados en pruebas de laboratorio destinadas a generar desgaste acelerado en seco, bajo estas condiciones, es posible diferenciar con mayor claridad el comportamiento frente al desgaste de las distintas variaciones microestructurales analizadas; el estudio de la respuesta del material en escenarios de desgaste severo resulta fundamental para establecer sus límites de desempeño y plantear mejoras en los procesos de tratamiento o en la composición, orientadas a aplicaciones que demandan elevada resistencia al desgaste.

La cuantificación de la pérdida de material se realizó mediante la determinación de la tasa de desgaste específica (k), calculada a partir de la **Ecuación 1**, descrita a continuación:

$$k = \frac{V}{L \times d} \quad \text{Ec. 1}$$

En donde V corresponde al volumen de material removido en la pista de desgaste, L representa la carga normal aplicada durante la prueba, y d es la distancia total de deslizamiento recorrida por el contrapunto.

Tras realizar las pruebas de desgaste, repetidas al menos tres veces por cada condición evaluada, el volumen de material removido (V) se determinó a partir de perfiles transversales de la huella de desgaste obtenidos mediante perfilometría óptica de alta resolución Bruker Contour (Bruker/GT-K 3D); este procedimiento permitió minimizar errores asociados a irregularidades locales y asegurar mayor confiabilidad en la determinación de V .

La caracterización microestructural de las muestras se realizó mediante microscopía óptica Olympus GX51, mientras que el análisis morfológico de las huellas de desgaste se efectuó por microscopía electrónica de barrido (SEM) en un equipo JEOL JSM-7800F operando a 25 kV; la identificación de fases se llevó a cabo mediante difracción de rayos X (XRD) con un difractómetro Bruker D8 ADVANCE, empleando radiación Cu- α_1 normal y un filtro Ni ; de manera complementaria, la dureza superficial de las sondas se evaluó antes y después de los ensayos utilizando un nanoindentador Berkovich, con el fin de cuantificar la resistencia mecánica de la capa superficial generada por los diferentes tratamientos termoquímicos; finalmente, durante las pruebas tribológicas, el tribómetro UMT-2/CETR registró en tiempo real el coeficiente de fricción, lo que permitió correlacionar su variación bajo las tres condiciones de carga aplicadas con la tasa de desgaste obtenida. Esta metodología integró de forma cuantitativa las condiciones de carga, la microestructura superficial inducida y el

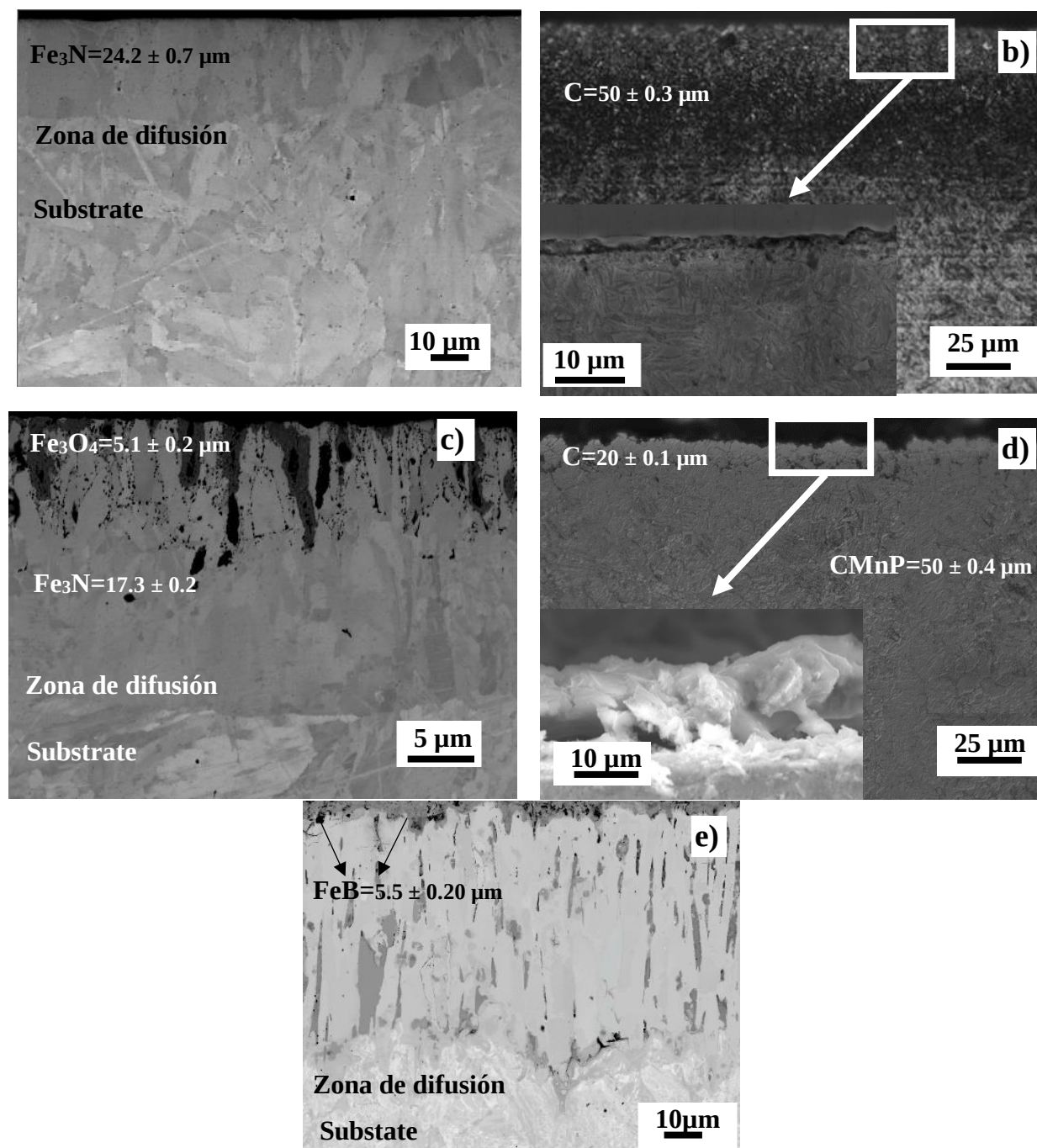
comportamiento tribológico del acero DIN-16MnCr5, aportando un análisis comparativo sólido y de alto valor científico.

4.2.3. Registrar y estructurar los datos obtenidos en una matriz de datos según el tipo de tratamiento, la condición de carga y las variables de respuesta.

Con el fin de garantizar un análisis comparativo ordenado y sistemático, los resultados experimentales obtenidos se registraron y organizaron en una matriz de datos; esta se estructuró considerando el tipo de tratamiento aplicado a las muestras, las condiciones de carga establecidas en los ensayos y las variables de respuesta seleccionadas como indicadores de desempeño tribológico; de esta manera, se facilita la correlación entre los factores de estudio y se establecen las bases para el análisis estadístico e interpretación de tendencias.

La Figura 15, presenta las micrografías transversales del acero DIN-16MnCr5 sometido los diferentes tratamientos superficiales, asimismo, en la Tabla 4 se resumen la dureza superficial y el espesor del recubrimiento para cada condición.

Figura 15. Vista en sección transversal mediante SEM de muestras de acero DIN-16MnCr5 expuestas mediante: a) Nitrurado, b) Cementación, c) Nitrurado + Post-oxidación, d) Cementación + Fosfato de Manganese, y e) Borurado



En la muestra nitrurada (N, Figura 15a) se observa una capa compuesta compacta y
 - .7 μm . Por debajo, una zona de difusión bien
 desarrollada evidencia una significativa penetración de nitrógeno, la microestructura se aprecia

densa y libre de defectos, lo que concuerda con la alta dureza superficial registrada (11.9 ± 0.1 GPa), responsable de proporcionar una excelente resistencia al desgaste por la formación de nitruros duros.

En cambio, la muestra carburizada (C, Figura 15b) presenta una capa de difusión de aproximadamente $50 \mu\text{m}$ de espesor, en concordancia con los parámetros de procesamiento establecidos para este estudio comparativo, aunque el contraste del microscopio óptico de barrido sugiere una posible interfaz entre la capa endurecida y el sustrato, no se realizó un perfil composicional detallado para confirmar la naturaleza de dicha transición, este tratamiento generó una dureza superficial moderada de 7.26 ± 0.1 GPa, suficiente para mitigar el desgaste adhesivo bajo condiciones de contacto, cabe destacar que si bien la carburización convencional suele alcanzar profundidades de capa entre 0.5 y 1.0 mm, en este trabajo la capa carburizada se limitó intencionalmente a $50 \mu\text{m}$, con el fin de mantener la comparabilidad con las profundidades de difusión de los demás tratamientos y centrar la evaluación en el comportamiento de desgaste superficial, más que en el desempeño frente a fatiga volumétrica.

Asimismo la muestra sometida a un tratamiento de nitrurado seguido de postoxidación, (QPQ, Figura 15

$.3 \pm 0.2$

$.1 \pm 0.2 \mu\text{m}$), la presencia de la capa de óxido

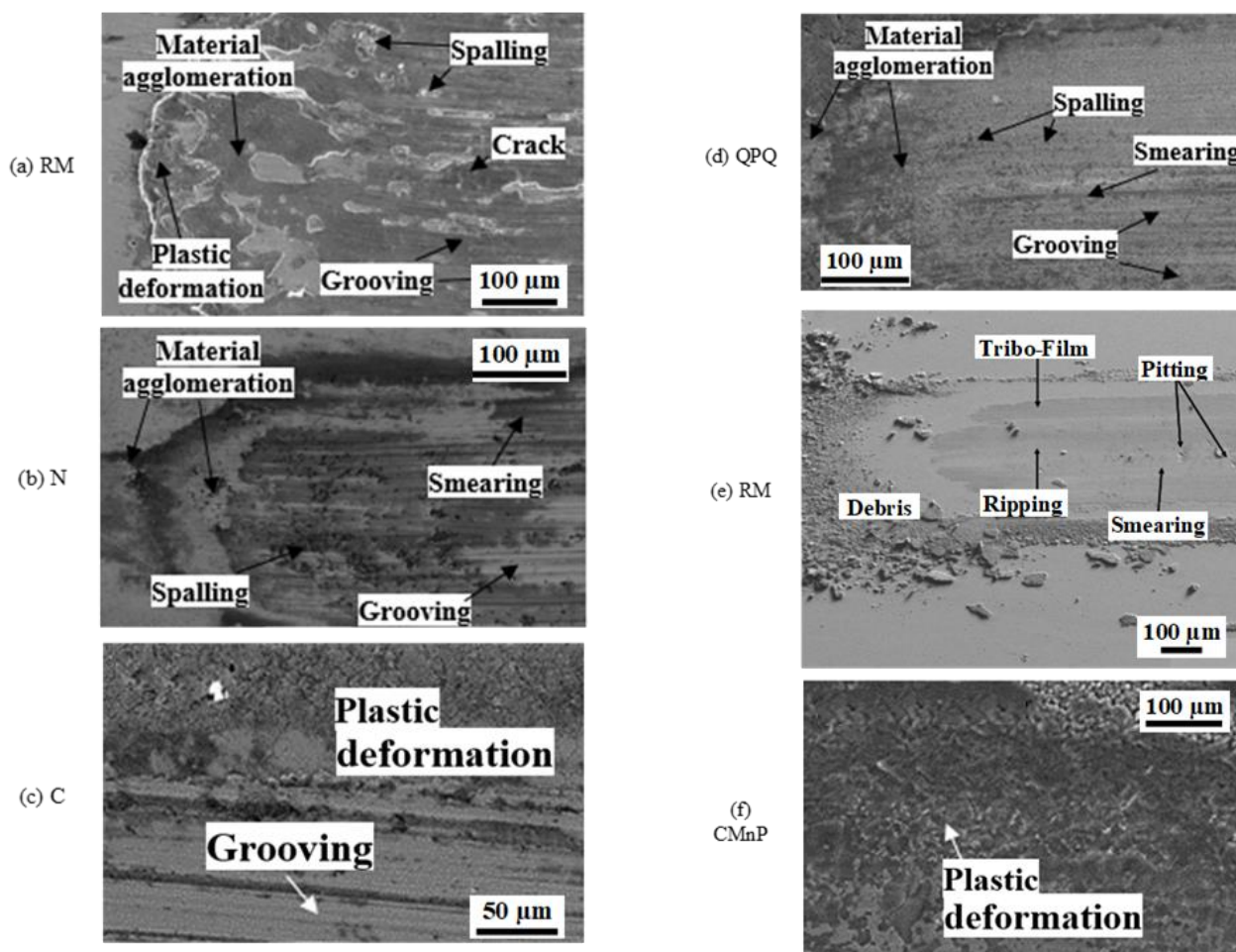
contribuye a mejorar la resistencia a la corrosión, mientras que la capa nitrurada subyacente conserva la integridad mecánica del material; la dureza global de esta estructura de doble capa resulta comparable a la de la muestra nitrurada, con un valor aproximado de 11,9 GPa. no obstante, se evidencia una reducción en el espesor de la zona nitrurada atribuible al proceso de postoxidación, asimismo, la ligera falta de uniformidad en la capa de óxido podría afectar la estabilidad tribológica en determinadas áreas Jiménez Salas et al. (2010).

Por su parte, la muestra CMnP (Figura 15d) incorpora un recubrimiento de fosfato de manganeso sobre la capa carburizada, alcanzando un espesor total cercano a 70 μm (50 μm correspondientes a la carburización y 20 μm a la capa de fosfato), aunque la dureza registrada es similar a la de la muestra carburizada (7.26 ± 0.1 GPa), se prevé que sea ligeramente inferior o equivalente, dado que las capas de fosfato presentan menor dureza relativa; sin embargo, estas contribuyen a mejorar la resistencia al rayado.

En la Figura 15e se observa que la muestra sometida al tratamiento de borurado por empaque de polvo (PPBP) desarrolla la estructura más gruesa y compleja, conformada por una doble capa de FeB ($5.5 \pm 0.7 \pm 1.1$ μm), en concordancia con lo reportado en la literatura por Carrera Espinoza (2024) y Cortes Herrera (2016), la morfología en forma de dientes de sierra, junto con la profunda difusión en la dirección cristalográfica preferencial del sustrato, origina la mayor dureza superficial entre todos los tratamientos evaluados, alcanzando un valor de 22.8 ± 0.8 GPa este notable endurecimiento confiere al PPBP una elevada resistencia al desgaste abrasivo; sin embargo, la presencia de la fase FeB, reconocida por su fragilidad, podría representar un riesgo bajo condiciones de carga cíclica o de impacto si no se encuentra adecuadamente soportada por un sustrato dúctil.

Cabe destacar que el material de referencia sin tratar (RM) exhibe una dureza superficial mucho menor a las demás, aproximadamente 2.1 ± 0.2 GPa, lo que confirma la eficacia de todos los tratamientos termoquímicos para mejorar significativamente el rendimiento de la superficie, como se observó **RM < C < N $\approx$ QPQ < PPB**.

Figura 16. Pistas de desgaste para todo el conjunto experimental; a) Sin tratar
b) Nitrurado, c) Cementación, d) Nitrurado + Post-oxidación, e) Borurado y f)
Cementación + Fosfato de Manganeso.



En la Figura 16a se observa que la superficie está dominada por una intensa deformación plástica, acompañada de aglomeraciones de material, surcos profundos y zonas de desconchado, la aparición de una grieta indica el inicio de procesos de delaminación en el subsuelo, esta morfología de daño es característica de regímenes sometidos a altos niveles de estrés de contacto, donde la energía de fricción se disipa mediante el flujo plástico, la fractura interfacial y el desplazamiento de escombros, de acuerdo con lo reportado por Fischer et al., 2018, este tipo de condiciones tribológicas puede favorecer la formación de tribocapas nanocristalinas y

estructuras celulares de dislocaciones en los primeros micrones de la superficie de desgaste, un fenómeno que, aunque no se caracteriza directamente en este estudio, se ve respaldado por la apariencia refinada y fragmentada de la superficie observada; por su parte la Figura 16b exhibe una superficie de desgaste con una topografía más uniforme, donde predominan las manchas y las ranuras, se identifican zonas de desconchado y acumulación de escombros, lo que indica la presencia de material oxidado dentro de la pista de desgaste, esta evidencia respalda la hipótesis de delaminación asistida por oxidación, en la que las capas tribo-oxidadas se fracturan y se desprenden de manera intermitente debido al cizallamiento repetido, la distribución de manchas y escombros finos es consistente con la compactación de residuos de desgaste en condiciones de gradual, lo que favorece la formación de tribopelículas transitorias; asimismo, la Figura 16c revela, a mayor aumento, la presencia de ranurado y deformación plástica, donde los surcos sugieren procesos de microabrasión provocados por partículas duras del tercer cuerpo, mientras que las regiones lisas deformadas plásticamente evidencian acomodación y flujo de escombros, las capas de óxido compactadas observadas pueden actuar temporalmente como películas lubricantes, reduciendo la fricción local; sin embargo, la limpieza posterior a la prueba puede eliminar estas capas y afectar la estimación precisa del volumen de desgaste; la Figura 16d evidencia una superficie afectada por desconchado, ranurado, manchado y una marcada aglomeración de material, lo que resalta la coexistencia de mecanismos de desgaste oxidativo y degradación mecánica interfacial, la topografía observada sugiere una dinámica compleja de generación, compactación y remoción de escombros, donde capas transitorias de tercer cuerpo se fracturan y redistribuyen a lo largo de la pista de desgaste; por su parte, la Figura 16e ofrece una visión panorámica de la pista, identificando claramente una región de tribopelícula, así como zonas de picaduras, manchado y desgarró, las picaduras y áreas desgarradas indican fractura

interfacial localizada y remoción de incrustaciones de óxido, mientras que el material manchado refleja la acomodación plástica de los escombros de desgaste; finalmente, la Figura 16f muestra una región con nanopartículas de material compactado (CMnP) y una intensa deformación plástica de los escombros, lo que sugiere la presencia de estructuras de grano refinado y deformación localizada por cizallamiento, características asociadas a la formación de tribocapas nanocrystalinas bajo condiciones de contacto deslizante; la morfología observada en la trayectoria de desgaste de la Figura 16 revela un comportamiento tribológico gobernado por la interacción de microabrasión, delaminación oxidativa y deformación plástica, estos mecanismos actúan dentro de un marco de tercer cuerpo, donde los detritos compactados cumplen una doble función, pueden contribuir tanto al daño superficial como a la protección temporal de la superficie, dependiendo de su naturaleza y distribución, la disipación de energía por fricción se produce principalmente a través del flujo plástico, la fractura de incrustaciones de óxido y la reorganización de los detritos, lo que genera una superficie con zonas de aglomeración, surcos y capas transitorias de óxido.

Tabla 4. Dureza superficial y espesor del recubrimiento para cada tratamiento.

Tratamiento	Composición del recubrimiento	Espesor (μm)	Dureza superficial (GPa)
RM (sin tratamiento)			2.1 ± 0.2
N (Nitrurado)		24.2 ± 0.7	11.9 ± 0.1
C (Carburado)		50 ± 0.3	7.26 ± 0.1
QPQ (Nitrurado + Postoxidación)		$22.4 (17.3 + 5.1)$	11.9 ± 0.1
CMnP (Carburado + Fosfato de Mn)	Fosfato de Mn + Martensita	$\sim 70 (50 + 20)$	~ 7.2
PPBP (borurado)		$64.2 \pm 1.3 (58.7 + 5.5)$	22.8 ± 0.8

Nota. Datos tomados a partir de los datos experimentales presentados.

Las principales variables de respuesta y los factores de influencia derivados de las pruebas de desgaste se resumen en la Tabla 5.

Las muestras de referencia sin tratamiento (RM) evidenciaron un incremento progresivo tanto en el volumen de desgaste como en la tasa de desgaste específica con el aumento de la carga aplicada; con una carga de 20 N, el volumen de desgaste superó los 1,8 mm³, mientras que la tasa de desgaste específica (k) alcanzó un valor de 900.

comportamiento de desgaste severo asociado a una baja resistencia mecánica; así mismo, el coeficiente de fricción (CoF) mostró una variabilidad considerable, con valores comprendidos entre 0.32 y 0.53, generalmente elevados, lo que sugiere una interacción significativa entre las superficies en contacto durante el proceso de desgaste.

El tratamiento de nitrurado produjo una mejora moderada en la resistencia al desgaste, incluso bajo una carga de 20 N, el volumen de desgaste permaneció por debajo de 0.35 mm³ y la tasa de desgaste específica se redujo a 174.

este comportamiento se asocia a la

- 15a), que actúan como barrera frente a la degradación superficial; el coeficiente de fricción se mantuvo relativamente estable, con valores comprendidos entre 0.40 y 0.47, lo que evidencia una interacción más controlada entre las superficies en contacto.

La carburización presentó el desempeño más favorable en términos de resistencia al desgaste entre los tratamientos termoquímicos evaluados, los volúmenes de pérdida por desgaste se mantuvieron por debajo de 1.0 mm³, incluso bajo condiciones de carga elevada, mientras que las tasas de desgaste específicas se situaron en el rango de 5.5 a 9.

considerados entre los más competitivos dentro de los procesos estudiados; este comportamiento puede atribuirse a la formación de una microestructura martensítica endurecida, conjuntamente con la reducción de carburos finamente dispersos en la matriz, los cuales refuerzan la resistencia mecánica frente a la deformación plástica y la propagación de microgrietas, asimismo, los

coeficientes de fricción se mantuvieron relativamente bajos entre 0.30 a 0.38, lo que sugiere una reducción en la energía disipada durante el desplazamiento.

Las muestras sometidas al tratamiento termoquímico QPQ evidenciaron un comportamiento intermedio en comparación con las condiciones de nitrurado y cementación, bajo cargas reducidas de 5 y 10 N, el volumen de desgaste permaneció controlado, con valores inferiores a 0.25 mm³; sin embargo, al incrementar la carga a 20 N se observó un aumento significativo en la pérdida de material, lo que sugiere una reducción en la capacidad protectora de la capa tratada frente a condiciones de mayor sollicitación mecánica, en cuanto al coeficiente de fricción, se identificó una tendencia decreciente conforme aumentaba la carga aplicada, pasando de 0.67 a 0.44; este comportamiento se asocia a la fractura progresiva de la capa de óxidos superficiales y al consiguiente alisamiento de la superficie de contacto, lo que favorece una interacción tribológica más estable, estos resultados ponen de manifiesto que el tratamiento puede constituir una alternativa eficiente para aplicaciones sometidas a desgaste, siempre que las cargas operativas no excedan niveles críticos que comprometan la integridad de la capa protectora.

Los recubrimientos de fosfato de manganeso demostraron una elevada resistencia frente a los procesos de tribocorrosión bajo todas las condiciones de carga evaluadas, los volúmenes de desgaste registrados se mantuvieron en valores mínimos, comprendidos entre 0.18 y 0.34 mm³, mientras que las tasas de desgaste específicas alcanzaron los niveles más bajos del conjunto de tratamientos analizados, con un rango de 3.8 – 6. , este comportamiento sobresaliente se atribuye a la formación de una capa laminar de fosfato que actúa como lubricante sólido al reducir la fricción en la interfase de contacto, adicionalmente, el coeficiente de fricción se mantuvo relativamente estable y en valores moderados 0.34 a 0.41, lo que refleja

una interacción tribológica controlada y consistente a lo largo de los ensayos, estos resultados confirman que los recubrimientos CMnP representan una estrategia eficaz para mejorar el desempeño de aceros expuestos a aplicaciones donde se requiere estabilidad frente al desgaste.

El tratamiento de borurado por paquete de polvo evidenció el mejor desempeño global frente al desgaste entre los procesos evaluados, bajo la condición de carga más elevada (20 N), el volumen de desgaste se redujo de manera sobresaliente hasta 0.041 mm^3 , valor que refleja una capacidad protectora significativamente superior respecto a los demás tratamientos, asimismo, la tasa de desgaste específica alcanzó 20.

se la Fig. 5e), la presencia de estos boruros proporciona una elevada dureza superficial y mejora la resistencia al corte adhesivo y abrasivo, reduciendo de manera notable la pérdida de material, no obstante, se registraron coeficientes de fricción relativamente altos entre 0.39 y 0.61, atribuibles a la naturaleza frágil y a la elevada rugosidad de las fases boruradas, lo que genera un incremento en la resistencia al deslizamiento; en conjunto, estos resultados indican que el tratamiento PPBP constituye una estrategia altamente efectiva para aplicaciones sometidas a sollicitaciones mecánicas severas, donde la prioridad es minimizar el desgaste volumétrico aun a expensas de un coeficiente de fricción moderadamente elevado.

Tabla 5. Matriz de datos según el tipo de tratamiento, la condición de carga y las variables de respuesta

Tratamientos térmicos	Carga (N)	Volumen (mm ³ ×10 ⁻³)	Tasa específica de desgaste (k) (mm ³ /Nm ×10 ⁻⁶)	CoF	Ancho (μm)	Profundidad (μm)	Referencias
RM (-1.0)	5 (-1)	178.1 ± 1.7	356.1 ± 3.5	0.43 ± 0.02	450 ± 10	18 ± 1	(Nguyen et al., 2021) [Este trabajo]
	10 (0)	573.4 ± 7.6	576.8 ± 7.6	0.53 ± 0.05	620 ± 15	25 ± 1.5	
	20 (1)	1801.2 ± 4.9	900.5 ± 2.5	0.32 ± 0.01	850 ± 20	40 ± 2.0	
N (-0.6)	5 (-1)	141.0 ± 2.6	282.0 ± 5.3	0.42 ± 0.01	300 ± 8	14 ± 1.0	(Staia et al., 2009)[Este trabajo] (Wong-Ángel et al., 2021)[Este trabajo] (Wong-Ángel et al., 2022)
	10 (0)	264.5 ± 3.5	264.5 ± 3.5	0.47 ± 0.06	420 ± 10	18 ± 1.2	
	20 (1)	349.0 ± 4.1	174.6 ± 2.1	0.40 ± 0.03	550 ± 12	24 ± 1.5	
C (-0.2)	5 (-1)	0.33 ± 0.004	5.5 ± 0.2	0.38 ± 0.02	140 ± 4	16 ± 1.1	(Bateni et al., 2006) (Wong-Ángel et al., 2020)
	10 (0)	0.73 ± 0.001	9.3 ± 0.3	0.35 ± 0.02	180 ± 5	12 ± 1.0	
	20 (1)	0.49 ± 0.012	7.8 ± 0.3	0.30 ± 0.01	220 ± 6	10 ± 0.8	
QPQ (0.2)	5 (-1)	59.1 ± 0.90	118.1 ± 1.8	0.67 ± 0.10	250 ± 6	10 ± 1.1	(Sola et al., 2014)[Este trabajo] (Li et al., 2018)[Este trabajo] (Wong-Ángel et al., 2021)[Este trabajo]
	10 (0)	203.7 ± 6.2	203.5 ± 6.1	0.50 ± 0.03	350 ± 9	15 ± 1.2	
	20 (1)	570.4 ± 10.8	285.2 ± 5.4	0.44 ± 0.08	450 ± 12	22 ± 1.8	
PPBP (0.6)	5 (-1)	7.1 ± 0.10	14.1 ± 0.21	0.61 ± 0.12	150 ± 5	4 ± 0.5	(García-Léon et al., 2020)[Este trabajo] (García-León et al., 2021b)[Este trabajo] [Este trabajo]
	10 (0)	18.6 ± 0.4	18.0 ± 0.47	0.45 ± 0.02	200 ± 6	6 ± 0.7	
	20 (1)	40.9 ± 0.85	20.4 ± 0.42	0.39 ± 0.04	280 ± 8	9 ± 0.9	
CMnP (1.0)	5 (-1)	0.18 ± 0.002	3.8 ± 0.2	0.41 ± 0.02	120 ± 3	7 ± 0.5	(Kumar et al., 2012) [Este trabajo] (Azhaarudeen et al., 2018) [Est trabajo]
	10 (0)	0.26 ± 0.001	4.2 ± 0.2	0.38 ± 0.02	150 ± 4	6 ± 0.6	
	20 (1)	0.34 ± 0.002	6.1 ± 0.3	0.34 ± 0.01	190 ± 5	5 ± 0.5	

Nota. Datos tomados a partir de las pruebas experimentales realizadas y fuentes

tomadas de la literatura.

4.3.1. Identificar mediante análisis de varianza (ANOVA) y otras herramientas estadísticas, los tratamientos que generan mejoras significativas en el desempeño del acero, proponiendo condiciones óptimas para aplicaciones industriales.

Para evaluar la influencia del tratamiento superficial y la carga aplicada en las respuestas tribológicas, los datos experimentales fueron sometidos a un análisis riguroso mediante la Metodología de Superficies de Respuesta (MSR); se adoptó un diseño factorial completo, replicando cada condición experimental tres veces, los factores del estudio y sus respectivos niveles codificados , estos se resumen en la Tabla 6.

Tabla 6. Diseño Experimental.

Factor	Acrónimos	Detalle	Nivel
Material	RM	Sin tratar (material de referencia)	-1.00
	N	Nitrurado	-0.60
	C	Carburado	-0.20
	QPQ	Nitrurado con postoxidación	0,2
	PPBP	(Proceso de borurado por paquetes de polvo	0.60
	CMnP	Fosfato con manganeso	1.00
Carga	5	Newton	-1
	10	Newton	0
	20	Newton	1

Posteriormente, se describió un modelo de regresión cuadrática para representar la relación entre los factores y las respuestas según la Ecuación 2.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_{12} + \beta_4 X_{22} + \beta_5 X_1 X_2 + \varepsilon \quad \text{Ec. 2}$$

Donde Y representa la respuesta a la tribocorrosión, X_1 y X_2 son los niveles codificados

i

experimental; la significancia estadística de los efectos principales, cuadráticos y de interacción se verificó a través del análisis de varianza (ANOVA), considerando valores de $p < 0.05$; la validez del modelo se confirmó mediante la inspección de los valores de R^2 ajustados y los gráficos de diagnóstico de residuos, finalmente, se generaron los gráficos de superficie y contorno de respuesta para la visualización de las interacciones y la determinación de las condiciones experimentales óptimas para la minimización del desgaste.

El análisis estadístico realizado mediante el software Statgraphics se llevó a cabo siguiendo una secuencia metodológica rigurosa; inicialmente, se procedió a la creación de un nuevo diseño experimental, seleccionando la opción de diseño factorial multinivel, en la cual se especificó el número de variables de respuesta (tres) y el número de factores experimentales a considerar (dos), así como la definición precisa de los niveles de estudio para cada factor; posteriormente, se detallaron las tres variables de respuesta objeto de análisis y se realizó la importación de los datos experimentales consignados en la Tabla 6. Una vez completada la estructura del diseño y la carga de datos, se ejecutó el análisis estadístico correspondiente, obteniendo las estimaciones de efecto para cada factor y sus interacciones, lo que permitió la generación de las tablas y gráficos relevantes para la interpretación y presentación de los resultados en el contexto de la investigación.

La Tabla 7, presenta los efectos principales estimados y las interacciones de segundo orden para cada variable de respuesta analizada, junto con sus respectivos errores estándar; los efectos principales permiten identificar la influencia individual de cada tratamiento superficial sobre parámetros como las variables de respuesta en el estudio; a su vez, las interacciones de segundo orden evidencian cómo la combinación de dos factores, por ejemplo, la profundidad de cementación y la carga aplicada, modifica de manera conjunta el comportamiento del material frente al desgaste y la corrosión; los errores estándar ofrecen una medida de precisión y confiabilidad de los efectos estimados, de manera que valores reducidos refuerzan la validez de los resultados y disminuyen la probabilidad de que las variaciones observadas se atribuyan al azar; estas estimaciones se fundamentan en 46 grados de libertad y un diseño experimental balanceado, con un factor de inflación de la varianza (FIV) igual a 1.0, lo que confirma la ortogonalidad y ausencia de multicolinealidad entre los factores evaluados, asimismo se

identifica que ningún FIV superó el valor de 1.333, muy por debajo del umbral crítico de 10, lo que garantiza la confiabilidad en la interpretación de cada coeficiente; el factor material (A) muestra el efecto más dominante sobre la tasa de desgaste específico, con un valor estimado de 499.72 ± 53.22 , este coeficiente negativo indica que la aplicación de tratamientos superficiales reduce significativamente k; por ejemplo, los tratamientos CMnP y PPBP logran valores tan mm^3/Nm para el material de referencia bajo 20N; el término cuadrático AA (448.46 ± 91.09) también es relevante, lo que sugiere una respuesta no lineal del material; la carga (B) tiene un efecto menor pero positivo ($+ 101.69 \pm 44.52$), lo que implica que cargas más altas incrementan el desgaste, salvo que se apliquen tratamientos superficiales; en contraste, el coeficiente de 0.122 ± 0.027), lo que indica que el CoF tiende a disminuir ligeramente con el aumento de la carga, en línea con la estabilización de la tribocapa a mayores presiones, el efecto del material (A) es marginal ($+0.015 \pm 0.033$), y los términos de segundo orden (AA y AB) son mínimos, lo que sugiere que no existen interacciones no lineales significativas para esta variable, en general, el CoF varía menos que otras variables, oscilando entre 0.30 y 0.67 en todas las condiciones, por su parte el ancho de la pista de desgaste de reafirmando la eficacia de los tratamientos superficiales; la carga (B) y el término cuadrático AA aportan efectos positivos ($+ 6.83 \pm 1.39$ y $+ 6.68 \pm 2.85$, respectivamente), reflejando el aumento esperado de la ancho de desgaste con mayor tensión mecánica y una respuesta no lineal del material, estos resultados concuerdan con las mediciones experimentales, donde el ancho se redujo hasta en un 90%, de 40 μm del material sin tratar con una carga 20 N a 4 μm del PPBP, con una carga de 5 N.

Tabla 7. Efectos estimados de las variables de respuesta.

<i>Efecto</i>	Tasa específica de desgaste (K)		Coeficiente de Fricción		Ancho	
	<i>Estimado</i>	<i>Error Estd.</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error Estd.</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error Estd.</i>
promedio	73.4975	37.986	0.468368	0.0233529	12.1071	1.18818
A: Tratamiento	-499.715	53.2168	0.0147619	0.0327165	-20.3254	1.6646
B: Carga	101.688	44.5244	-0.121667	0.0273726	6.82778	1.3927
AA	448.458	91.0876	-0.093006	0.0559987	6.68403	2.84918
AB	-158.304	65.177	-0.0392857	0.0400694	-8.34524	2.03871
BB	3.76667	77.1185	-0.0416667	0.0474108	2.49444	2.41223
bloque	-1.80778	51.4123	-0.02	0.0316072	-0.362963	1.60815
bloque	1.76667	51.4123	0.02	0.0316072	0.359259	1.60815

Se llevó a cabo un análisis de varianza (ANOVA) con el objetivo de cuantificar la influencia de los factores experimentales seleccionados sobre las tres variables clave de respuesta, la Tabla 8 resume los valores de suma de cuadrados, relación F y valor P empleados para evaluar la bondad de ajuste y la relevancia estadística de los modelos de regresión.

Para la tasa de desgaste (k), los resultados del ANOVA indican que cuatro efectos: tratamiento (A), carga (B), el término cuadrático (AA) y la interacción (AB); resultan estadísticamente significativos al nivel de confianza del 95% ($p < 0.05$); el factor tratamiento presenta la mayor influencia con un relación F de 88.18, seguido por el término cuadrático AA con 24.24 y la carga con un valor de 5.22, lo que evidencia la presencia de relaciones tanto lineales como no lineales en la respuesta de k; el modelo explica el 72.87% de la varianza total en K, con un R^2 ajustado de 68.74% y un R^2 previsto de 62.73%, lo que refleja un desempeño predictivo robusto; el error estándar de estimación (SEE) es 133.59 y el error absoluto medio (MAE) es 96.21, lo que indica una precisión aceptable, además, el estadístico de Durbin-Watson (DWS = 2.66; $p = 0.9532$) sugiere ausencia de autocorrelación significativa en los residuos, confirmando la independencia de los errores.

En el caso del coeficiente de fricción (CoF), únicamente el factor carga (B) resulta estadísticamente significativo ($p = 0.0001$), con una relación F de 19.76, lo que indica que la carga normal aplicada es el principal determinante de la respuesta friccional, los demás factores, incluido el tipo de material y los términos de interacción, no muestran influencia significativa; el modelo presenta un R^2 de 35.20%, un R^2 ajustado de 25.34% y un R^2 previsto de 13.23%, lo que evidencia un poder explicativo limitado y sugiere que otras variables no modeladas o efectos aleatorios pueden contribuir a la variabilidad observada en el CoF, a pesar de la baja predictibilidad, el modelo mantiene un SEE bajo, con un valor de 0.0821 y un MAE de 0.0611, lo que indica una dispersión residual pequeña., el DWS evidenciado ese de 2.41 con ($p = 0.7644$) confirma la ausencia de autocorrelación, estos resultados sugieren que, si bien el modelo de captura parte de la varianza, sería recomendable incorporar factores adicionales para mejorar su capacidad predictiva.

El análisis de la profundidad de desgaste revela un desempeño sólido del modelo, con significancia estadística para los cuatro términos: (A; B; AA y la interacción AB ($p < 0.05$); de nuevo el tratamiento termoquímico ejerce la influencia dominante con valores de F de 149.09, seguido de la carga con 24.03 y la interacción AB con 16.76, lo que resalta un efecto de desgaste entre los factores de entrada, el modelo explica el 81.03% de la variabilidad en la profundidad de penetración, con un R^2 ajustado de 78.14% y un R^2 previsto de 74.71%; este alto nivel de predictibilidad se respalda en residuos bajos de SEE = 4.18 y un MAE = 2.76 y un DWS satisfactorio de 2.58 con ($p = 0.9186$); en conjunto, los resultados indican que el modelo es estadísticamente robusto y adecuado para la predicción y optimización confiable de la profundidad de desgaste bajo condiciones variables tribológicas.

Tabla 8. Resultados del ANOVA para las variables de respuesta analizadas.

Fuente	Grado de libertad	k			CoF			Ancho		
		Suma de cuadrados	Relación F	Valor P	Suma de cuadrados	Relación F	Valor P	Suma de cuadrados	Relación F	Valor P
A: Tratamiento	1	1.57×10 ⁶	88.18	0.0000	0.00137286	0.2	0.6540	2602.67	149.09	0.0000
B: Carga	1	93063.6	5.22	0.0270	0.133225	19.76	0.0001	419.567	24.03	0.0000
AA	1	432477.0	24.24	0.0000	0.0186012	2.76	0.1035	96.072	5.50	0.0233
AB	1	105253.0	5.90	0.0191	0.00648214	0.96	0.3320	292.50	16.76	0.0002
BB	1	425.633	0.00	0.9613	0.00520833	0.77	0.3841	18.667	1.07	0.3065
Error total	46	820721.0	--	--	0.310194	--	--	803.003	--	--
Total (corr.)	53	3.0247×10 ⁶	--	--	0.478683	--	--	4233.65	--	--
R2			72.87%			35.20%			81.03%	
R² ajustado			68.74%			25.34%			78.14%	
R² previsto			62.73%			13.23%			74.71%	
SEE			133.592			0.0821			4.178	
MAE			961.705			0.0611			2.76	
DWS			2.65531 (P=0.9531)			2.40628 (P=0.7644)			2.5834 (P=0.9186)	

4.3.2. Utilizar modelos de regresión lineal múltiple e interacción para predecir la respuesta tribológica según tratamiento y carga.

La Tabla 9. presenta los coeficientes de regresión obtenidos del ajuste de un modelo cuadrático de superficie de respuesta, el cual describe la relación entre los factores experimentales; los resultados muestran que el término constante tiene valores de 73.575 para k, 0.468 para CoF y 121.071 para el ancho, los cuales representan la media ajustada de cada variable en ausencia de efectos de los factores evaluados; en relación con el factor A, se observa un efecto negativo sobre k y el ancho de pista, indicando que la aplicación del tratamiento contribuye a reducir la tasa de desgaste y el tamaño de la huella, mientras que su influencia sobre el CoF es mínima; por otro lado, el factor B exhibe un efecto positivo significativo en k (508.44) y en el ancho (341.39), lo que refleja que el incremento en la carga aplicada aumenta la severidad del desgaste; los términos de interacción y cuadráticos permiten identificar efectos combinados de los factores; el término AA presenta contribuciones positivas tanto en k como en

el ancho, y negativas en el CoF con valores de 224.23, 334.20 y -0.0465 respectivamente, evidenciando una relación no lineal entre el tratamiento y las variables de respuesta; el término AB, asociado a la interacción entre tratamiento y carga, muestra un efecto marcadamente negativo sobre k y el ancho, acompañado de una disminución del CoF, lo que indica que la combinación de ambos factores atenúa el desgaste y la fricción, finalmente, el término BB exhibe valores positivos en k y el ancho, junto con una reducción en el CoF lo cual sugiere que la influencia cuadrática de la carga refuerza la tendencia de aumento en la severidad del desgaste.

Tabla 9. Coeficientes de regresión del (MSR) para las variables de respuesta.

<i>Coeficiente</i>	k <i>Estimado</i>	CoF <i>Estimado</i>	Ancho <i>Estimado</i>
Constante	73.575	0.468368	121.071
A: Tratamiento	-249.857	0.00738095	-101.627
B: Carga	508.439	-0.0608333	341.389
AA	224.229	-0.046503	334.201
AB	-791.521	-0.0196429	-417.262
BB	188.333	-0.0208333	124.722

Las ecuaciones de regresión se construyeron a partir de los datos experimentales empleando un modelo polinomial de segundo orden para cada variable de respuesta, estos modelos integran los efectos lineales, cuadráticos y de interacción de las variables independientes; las expresiones ajustadas describen el comportamiento del sistema y resultan esenciales para la predicción de las respuestas y la optimización de los parámetros de desempeño, los modelos obtenidos para la tasa de desgaste (k), el coeficiente de fricción (CoF) y el ancho de pista se presentan en las ecuaciones 3 a 5; es importante señalar que las ecuaciones polinomiales fueron ajustadas mediante el método de mínimos cuadrados y validadas estadísticamente a través de análisis de varianza (ANOVA), lo que garantiza la robustez y confiabilidad de los resultados.

$$k = 73.5674 - (249.857 \times M) + (50.8439 \times L) + (224.229 \times M^2) - (79.1521 \times M \times L) + (1.88333 \times L^2) \quad \text{Ec. 3}$$

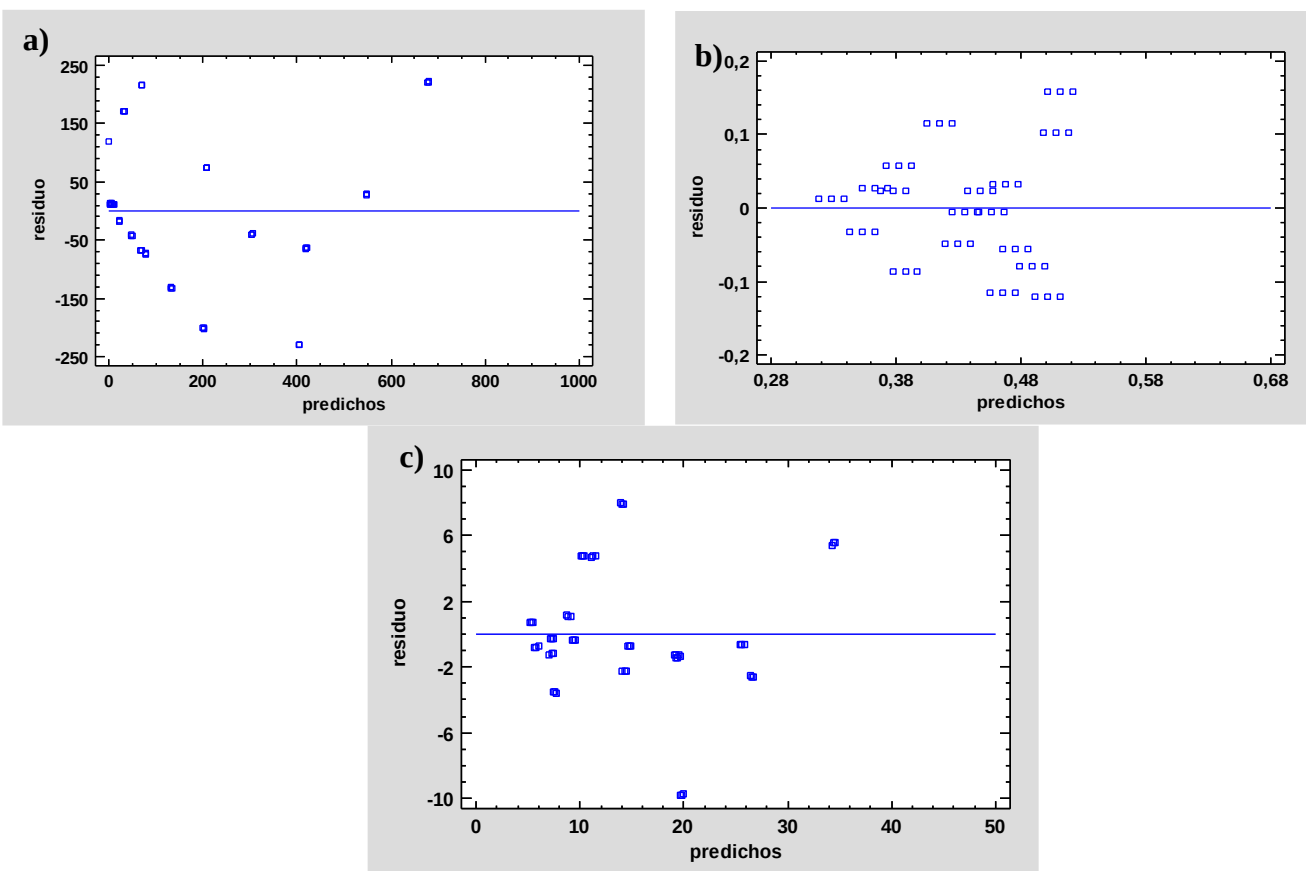
$$\text{CoF} = 0.468368 + (0.00738095 \times M) - (0.0608333 \times L) - (0.046503 \times M^2) - (0.0196429 \times M \times L) - (0.0208333 \times L^2) \quad \text{Ec. 4}$$

$$\text{Depth} = 12.1071 - (10.1627 \times M) + (3.41389 \times L) + (3.34201 \times M^2) - (4.17262 \times M \times L) + (1.24722 \times L^2) \quad \text{Ec. 5}$$

Se realizó un análisis de residuos para las tres variables de respuesta, con el objetivo de validar los supuestos de los modelos de regresión y evaluar su idoneidad; la Figura 17, presenta las gráficas de residuos predichos y reales para cada modelo, lo que permite examinar aspectos clave como la homocedasticidad, la independencia y la presencia de patrones no lineales o valores atípicos; en el gráfico de residuos para k , Figura 17a, se observa un patrón en forma de embudo, donde los residuos son más altos en valores predichos bajos y tienden a converger conforme aumentan las predicciones, esta distribución sugiere un nivel de heterocedasticidad, es decir, la variación de los errores varía a lo largo del rango de valores predichos, aunque no se detectan valores atípicos extremos y la dispersión general es aceptable, el patrón podría estar relacionado con no linealidades no capturadas por el modelo o con la variabilidad inherente a la respuesta tribológica en regímenes de desgaste bajos; la Figura 17b, los residuos se distribuyen aleatoriamente alrededor de la línea cero, sin tendencias ni desviaciones sistemáticas, esta aleatoriedad respalda el supuesto de homocedasticidad y confirma la independencia de los residuos, in embargo, la dispersión vertical indica una variabilidad residual relativamente alta en proporción al estrecho rango de valores predichos, lo que refleja las limitaciones del modelo para CoF, a pesar de ello, la ausencia de patrones sistemáticos sugiere que no existe un defecto significativo; por último, en la Figura 17c, los residuos de la profundidad de desgaste se distribuyen simétricamente alrededor de cero, sin curvatura ni efectos de embudo. Los valores residuales permanecen dentro de un rango estrecho y no se observan desviaciones extremas, lo que indica que el modelo se ajusta adecuadamente a los datos en todo el espectro de valores

predichos, este comportamiento confirma la solidez estadística del modelo de regresión para la profundidad, respaldada por un alto R^2 y métricas de error bajas.

Figura 17. Análisis residual para: a) k; b) CoF; c) Ancho de pista



4.3.3. Verificar los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas en los datos

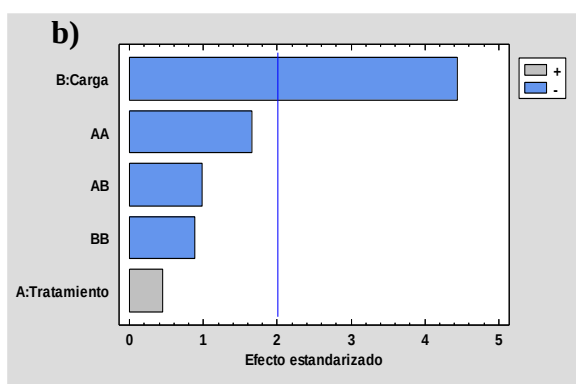
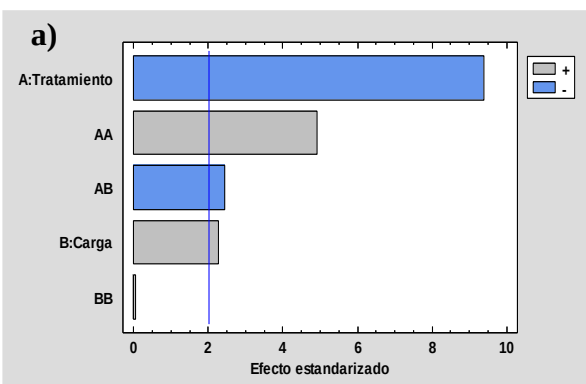
experimentales mediante pruebas como Shapiro-Wilk (normalidad) y Levene (homogeneidad de varianzas).

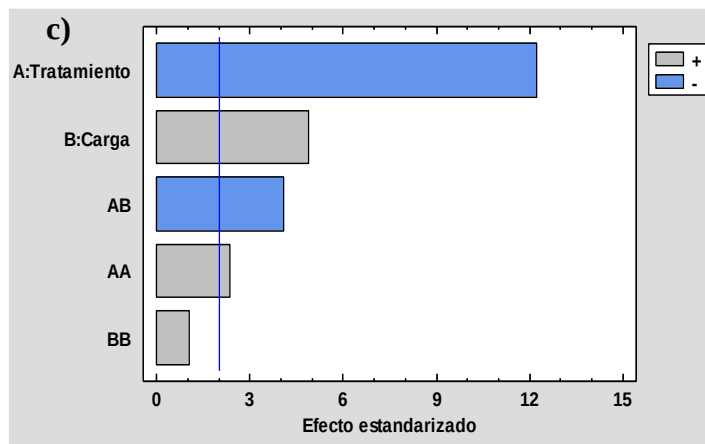
El diagrama de Pareto fue empleado como una herramienta estadística fundamental para la identificación y clasificación visual de los factores principales y las interacciones de segundo orden que ejercen una influencia estadísticamente significativa sobre cada respuesta tribológica analizada, la significancia se establece mediante una línea de referencia vertical que representa el

umbral de confianza del 95%, consecuentemente, solo las barras que superan esta línea indican los términos del modelo que demuestran una contribución no aleatoria a la variabilidad de la respuesta, permitiendo enfocar la interpretación y el análisis posterior exclusivamente en los factores dominantes del proceso, tal como se detalla en la Figura 18.

El análisis las Figuras 18a, 18b y 18c revelan las contribuciones dominantes de los factores sobre las respuestas tribológicas; para la Tasa de Desgaste Específico (k), el tratamiento demostró ser el factor de mayor influencia, con un efecto estandarizado de 9.8 lo que indica que las propiedades inherentes o superficiales del tratamiento alteran drásticamente el desgaste, las interacciones AA y AB también resultaron moderadamente significativas; este esquema se acentuó en el ancho de pista, donde la Carga ejerció el efecto más alto 13.5, explicando más del 60% de la variación y confirmando que el aumento de la presión normal incrementa directamente la deformación o daño dimensional, acorde con los principios de la mecánica de contacto; por el contrario, el Coeficiente de Fricción fue principalmente regido por la Carga Aplicada; en el CoF, la Carga se destacó con un efecto estandarizado de 4.7, sugiriendo que la fricción es más sensible a las condiciones de contacto que al tipo de tratamiento.

Figura 18. Análisis de Pareto estandarizado a) k, b) CoF, c) Ancho de pista.

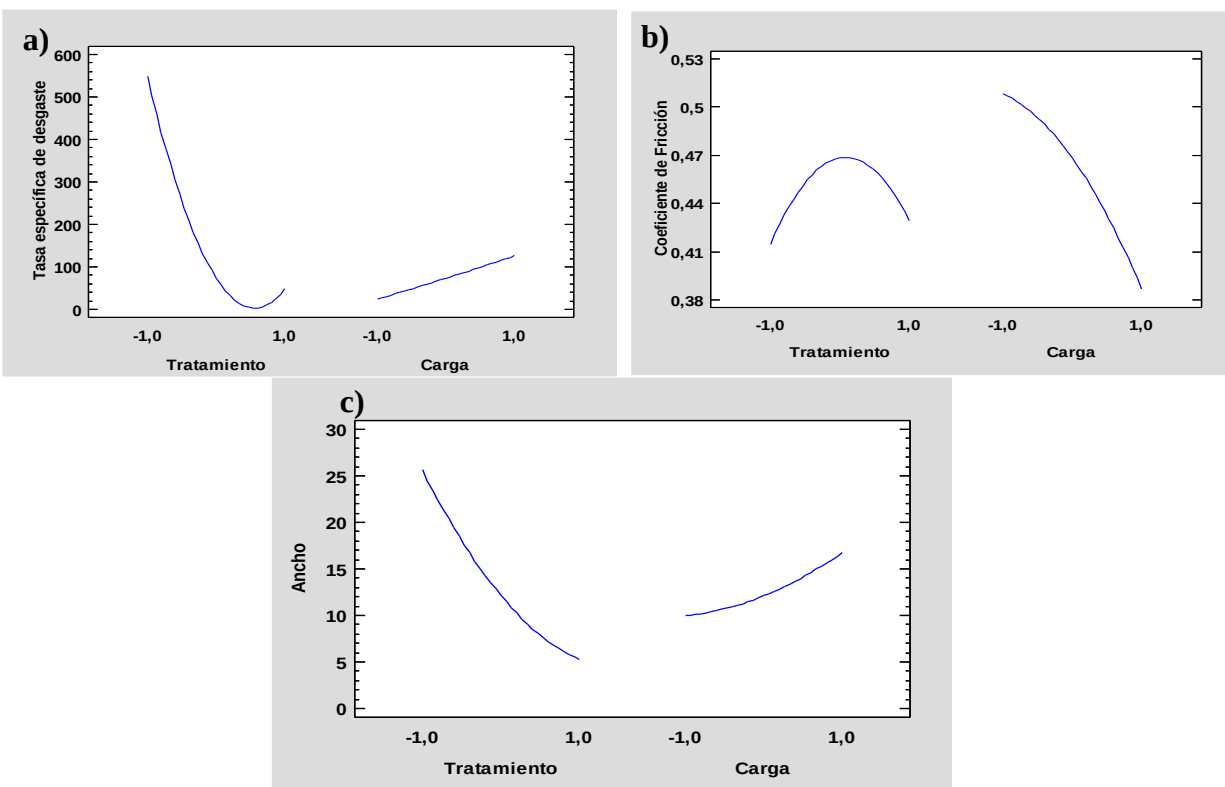




La Figura 19, ilustra los efectos de los factores Tratamiento y Carga sobre las variables de respuesta; la Figura 19a, refleja que la tasa específica de desgaste disminuye de manera marcada con la aplicación del tratamiento, lo que evidencia que la modificación superficial incrementa la resistencia frente a la acción tribológica, reduciendo la pérdida de material incluso en condiciones de elevada carga; no obstante, al aumentar la carga aplicada, la tasa de desgaste se eleva nuevamente, lo que confirma que la magnitud del esfuerzo es el factor más determinante en la severidad del contacto; en el caso de la Figura 19b, las curvas muestran una respuesta más compleja, el tratamiento induce un comportamiento no lineal, con un ligero aumento en niveles bajos que podría estar asociado a la formación inicial de capas inestables o irregularidades superficiales, seguido de una reducción en niveles altos, lo que sugiere una estabilización de la interacción tribológica y la posible formación de películas protectoras, por su parte, la carga presenta un efecto opuesto al esperado, ya que su incremento conduce a una disminución progresiva del coeficiente de fricción, fenómeno que puede atribuirse a la generación de las capas triboquímicas que facilitan la movilidad relativa entre superficies en contacto; finalmente, la Figura 19c, muestra que el ancho de la huella ratifica el rol protector del tratamiento, dado que a medida que este se aplica se observa una reducción significativa en la extensión del daño

superficial, mientras que el aumento de la carga promueve un ensanchamiento progresivo, coherente con una mayor deformación plástica y arranque de material; en conjunto, las gráficas permiten concluir que el tratamiento superficial constituye un factor crítico para mitigar los mecanismos de desgaste, mientras que la carga, aunque reduce la fricción, intensifica de manera significativa el deterioro volumétrico de la superficie.

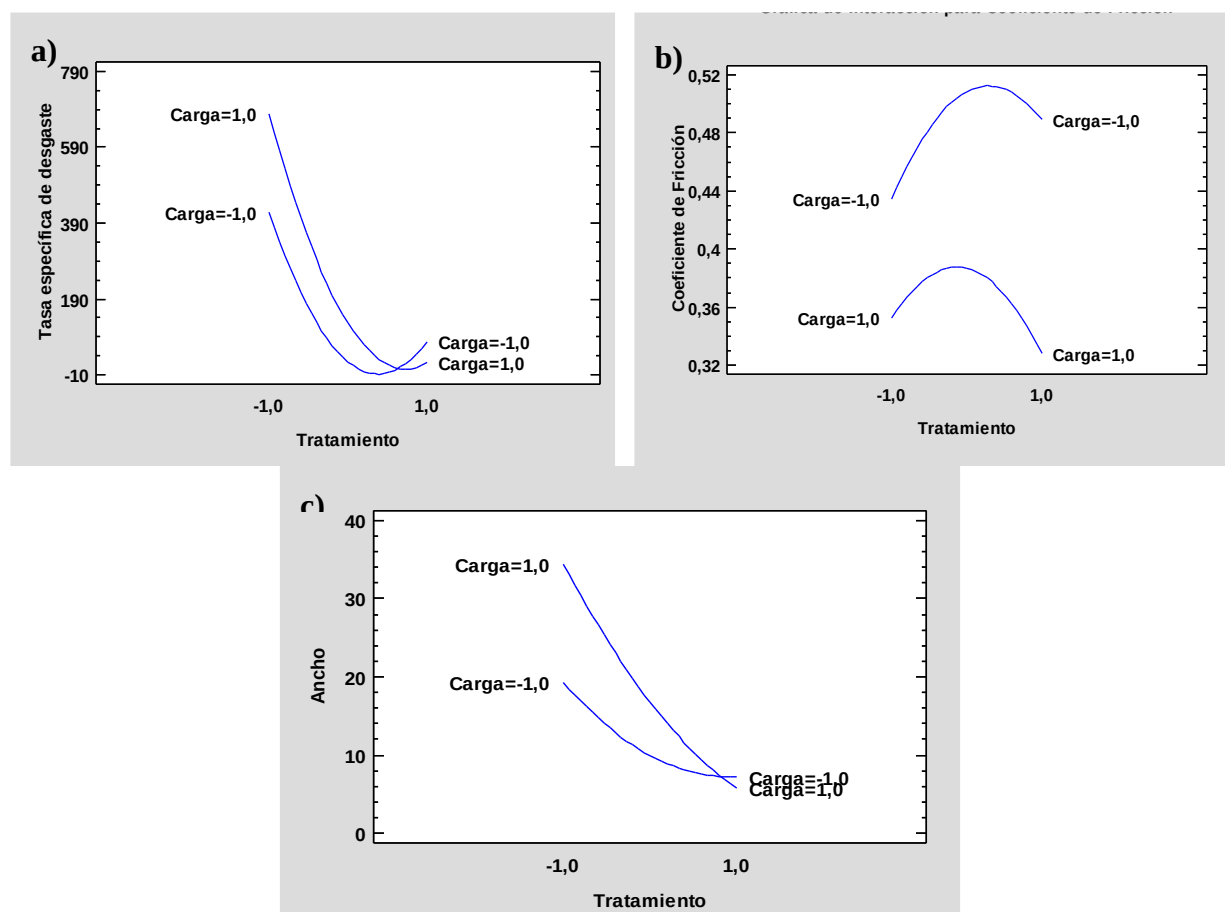
Figura 19. Grafica efectos principales para a) k , b) CoF, c) Ancho de pista



El análisis de las gráficas de interacción Figura 20, permiten observar que la tasa específica de desgaste presenta una disminución notable a medida que se incrementa el nivel de tratamiento, independientemente de la carga aplicada; no obstante, en condiciones de alta carga el desgaste es siempre más severo en comparación con niveles bajos de carga, lo que refleja que el tratamiento actúa como un factor protector, pero la magnitud del esfuerzo tribológico sigue siendo determinante en el volumen de material removido; en el caso del coeficiente de fricción,

la interacción entre tratamiento y carga no muestra una tendencia lineal definida, lo que sugiere un comportamiento más complejo donde la respuesta depende de fenómenos asociados a la formación y estabilidad de capas triboquímicas, así como de la modificación de la topografía superficial; en cuanto al ancho de la huella de desgaste, se observa que la aplicación del tratamiento reduce progresivamente la magnitud del daño en ambos niveles de carga, aunque el efecto es más acentuado bajo condiciones de baja carga, mientras que en altas cargas el ancho tiende a mantenerse elevado incluso con la presencia del tratamiento. En conjunto, los resultados evidencian que la interacción entre tratamiento y carga modula de manera diferenciada las variables de respuesta, destacándose que el tratamiento siempre contribuye a mitigar el desgaste, aunque su eficacia se ve parcialmente limitada cuando la carga alcanza niveles elevados.

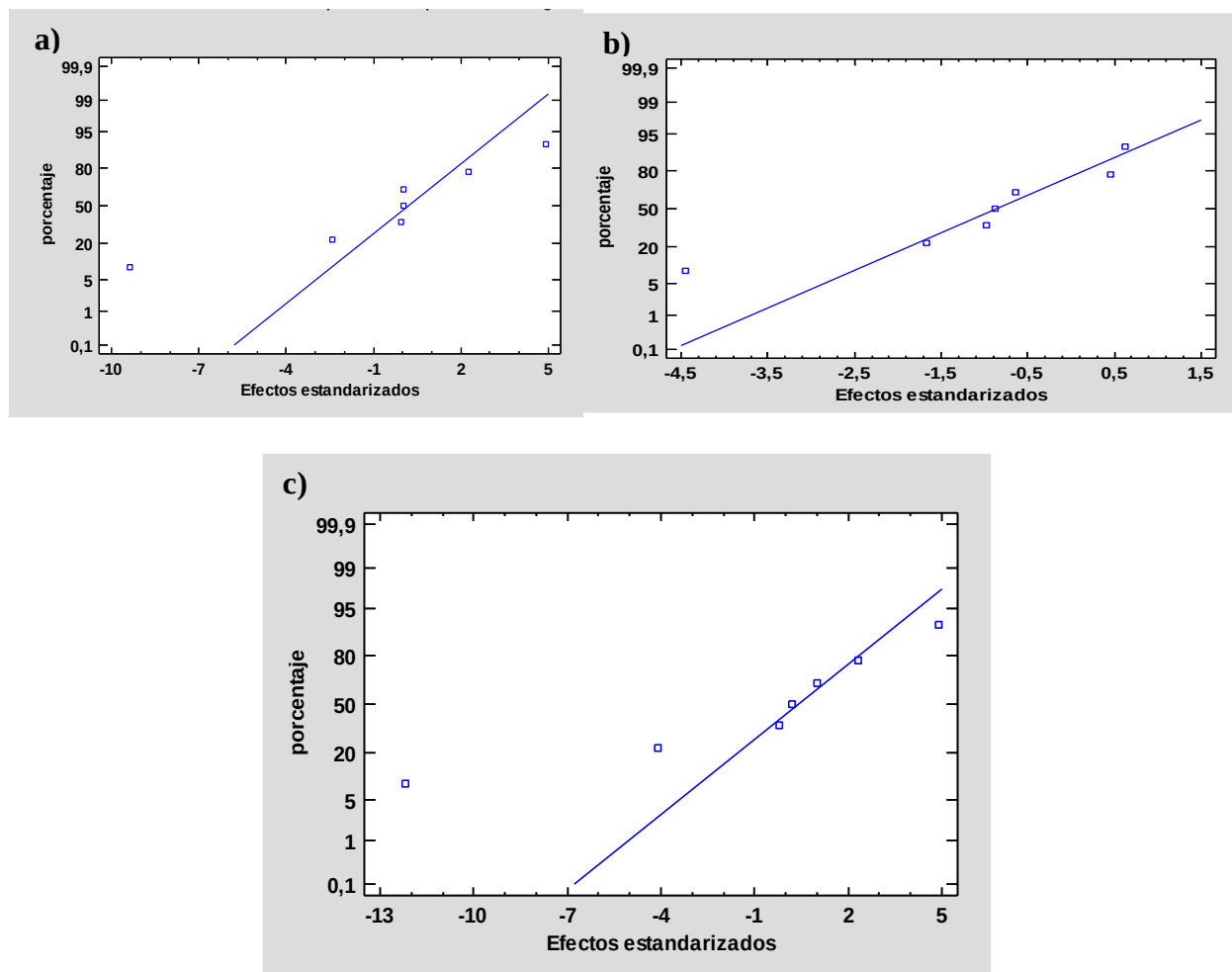
Figura 20. Graficas de iteración para a) k ; b) CoF ; c) Ancho de pista.



Los gráficos de probabilidad normal evidencian la significancia estadística de los factores experimentales sobre cada variable de respuesta; en el caso de la tasa específica de desgaste Figura 21a, se observa una desviación considerable respecto a la línea de referencia, con efectos estandarizados cercanos a -9.5 en la cola inferior, lo que refleja la influencia de factores negativos altamente determinantes, tales como los tratamientos CMnP y PPBP, capaces de reducir drásticamente el desgaste; de hecho, bajo condiciones de 5 N , el tratamiento CMnP alcanzó un valor de k de 3 .

material de referencia sin tratamiento a 20 N , lo que representa una disminución del 99.6% y confirma la efectividad de los tratamientos termoquímicos en la mitigación del deterioro superficial; para el coeficiente de fricción Figura 21b, la distribución es más próxima a la linealidad, con efectos que fluctúan entre -4.2 y $+1.2$, lo que sugiere que los tratamientos ejercen una influencia menos marcada sobre esta variable; sin embargo, se identificó una reducción del 55% entre los valores máximos de QPQ a una carga de 5 N y mínimos de C y CMnP bajo altas cargas, lo que demuestra que, aunque el CoF es menos sensible que el desgaste, sigue siendo un indicador relevante de la interacción tribológica, especialmente en condiciones de desgaste, finalmente, el ancho de pista, Figura 21c revela desviaciones significativas de la normalidad, con efectos estandarizados que alcanzan valores extremos de -12.5 y $+5.3$, lo que confirma la disparidad sustancial entre las condiciones experimentales; en consecuencia, estos resultados ponen de manifiesto que tanto el tipo de tratamiento como la carga aplicada son factores estadísticamente significativos en la respuesta del material, siendo los primeros los que aportan mayor eficacia en la reducción del desgaste, mientras que la carga regula en mayor medida la severidad del daño superficial.

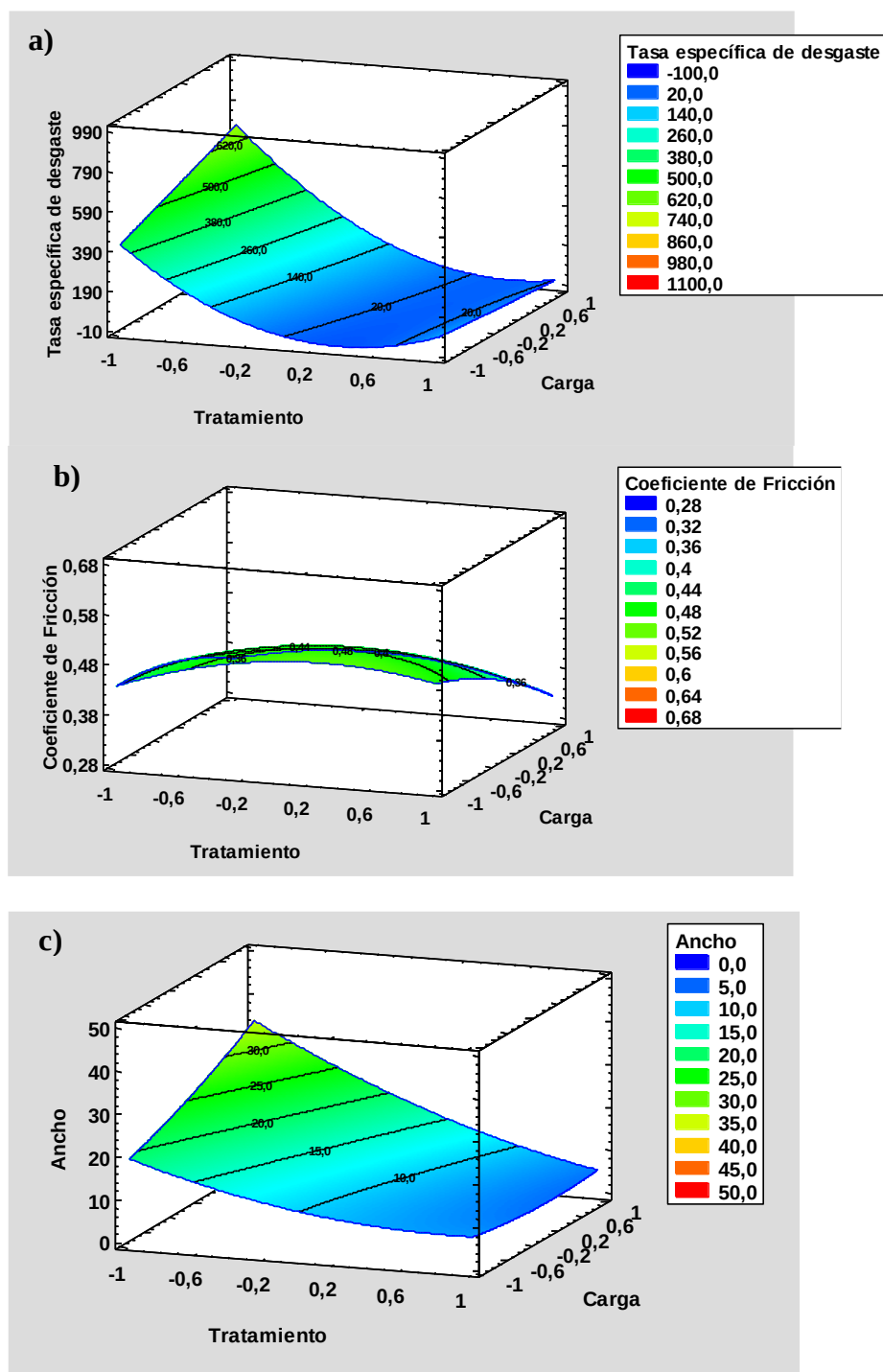
Figura 21. Graficas de probabilidad normal para a) k ; b) CoF; c) Ancho de pista.



La Figura 22, presenta las superficies de respuesta estimadas de las variables de respuesta, estas permiten visualizar de manera conjunta los efectos del tratamiento y la carga sobre las variables tribológicas, confirmando las tendencias previamente observadas en los gráficos de efectos principales e interacciones; el caso del coeficiente de fricción, Figura 22b, la superficie presenta valores moderados y relativamente estables, con una ligera disminución al aumentar la carga, lo que sugiere que esta variable es menos sensible a la condición superficial, aunque sí refleja cierta estabilización del deslizamiento bajo mayores esfuerzos, por el contrario, la tasa específica de desgaste, Figura 22a, muestra una respuesta fuertemente dependiente de

ambos factores, mientras que el incremento en la carga produce un aumento pronunciado de k , la aplicación del tratamiento reduce significativamente los valores, incluso en condiciones de carga elevada, lo que evidencia su rol protector frente a la pérdida de material; asimismo de forma similar, la superficie correspondiente al ancho de la huella de desgaste Figura 22c, revela un comportamiento análogo, donde el tratamiento contribuye a limitar la extensión del daño, en tanto que la carga amplifica su magnitud; gracias a la representación de las superficies tridimensionales, se puede intuir que la carga aplicada es el factor que más intensifica la severidad del desgaste, mientras que el tratamiento se consolida como un mecanismo eficaz de mitigación, modulando las tres variables de respuesta y demostrando un impacto especialmente relevante en la reducción del volumen y extensión del daño superficial.

Figura 22. Superficies de respuesta estimada para a) k ; b) CoF ; c) Ancho de pista



En los gráficos de contorno de la superficie de respuesta estimada se evidencian con claridad los efectos combinados del tratamiento y la carga sobre las variables tribológicas

analizadas, en la Figura 22a, se aprecia un gradiente marcado que transita desde valores

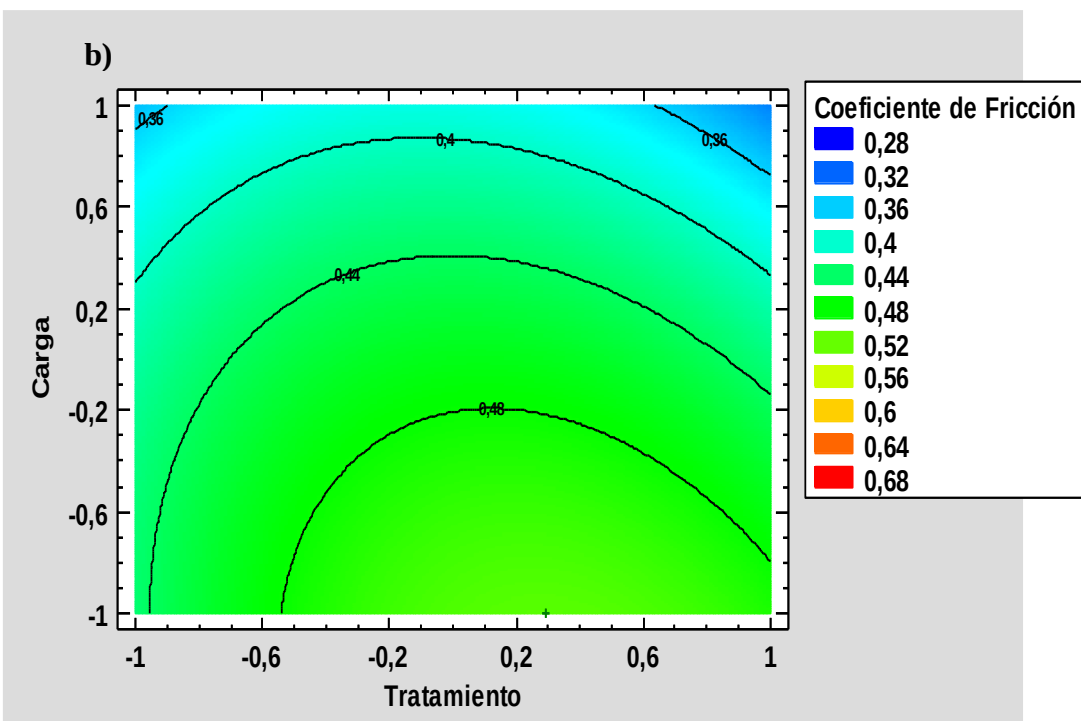
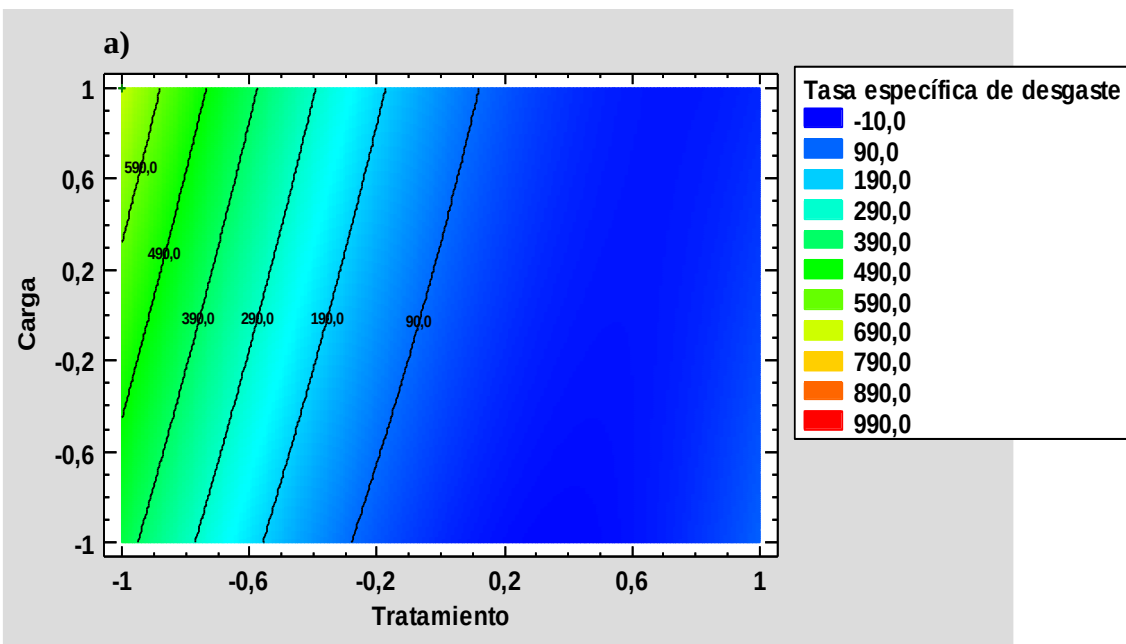
incrementos en la carga, este comportamiento confirma la efectividad del tratamiento superficial en la reducción del desgaste volumétrico; la Figura 22b, muestra una distribución más homogénea, con variaciones que oscilan entre 0.28 y 0.68; si bien la carga tiende a incrementar ligeramente los valores del CoF, los tratamientos actúan como estabilizadores del sistema, limitando las oscilaciones y evidenciando que la fricción es menos sensible a las condiciones de superficie que la pérdida de material; finalmente, en la Figura 22c, se observa un patrón semejante al de la tasa específica, donde la aplicación del tratamiento reduce de manera considerable los valores, situándolos por debajo de $100\text{ }\mu\text{m}$, mientras que en ausencia de modificación superficial y con cargas elevadas se alcanzan valores próximos a $50\text{ }\mu\text{m}$, lo que demuestra que la carga intensifica el deterioro en términos geométricos de la huella; se puede deducir que estos resultados corroboran que el tratamiento superficial constituye un factor determinante en la mitigación de la degradación tribológica, mientras que la carga aplicada opera como variable amplificadora del daño, siendo su efecto más notorio en parámetros asociados directamente con la pérdida y la deformación del material.

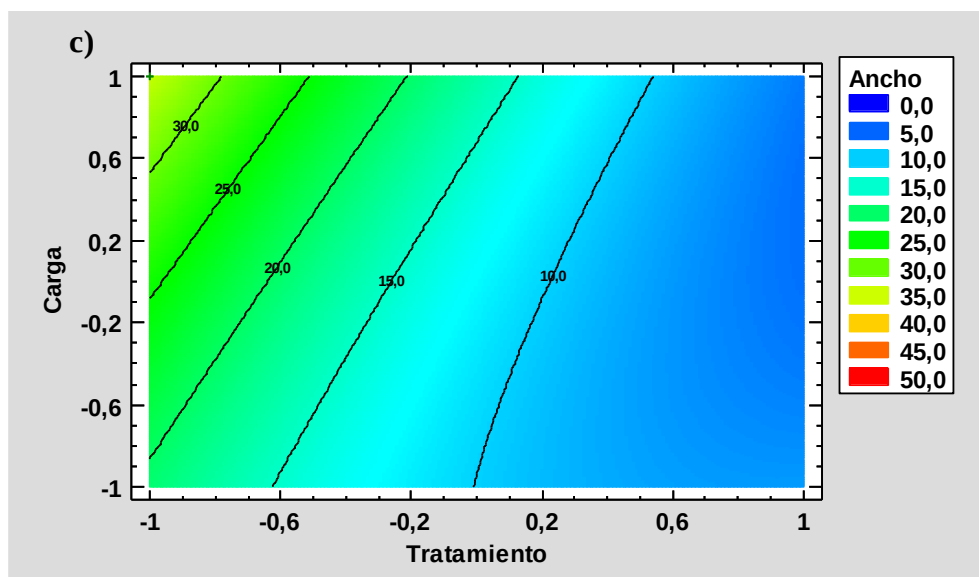
Los gráficos de contorno bidimensionales presentados en la Figura 23, ilustran los efectos combinados del tratamiento superficial (M), la carga aplicada (L) y las respuestas tribológicas analizadas: la tasa específica de desgaste (k), el coeficiente de fricción (CoF) y el ancho de pista; estos modelos fueron generados mediante la Metodología de Superficie de Respuesta (RSM) y se corresponden con las ecuaciones de regresión de segundo orden discutidas previamente; en la Figura 23a, se observa que la tasa de desgaste (k) presenta una marcada disminución, pasando de

valores cercanos a $990 \text{ mm}^3/\text{Nm}$ en el material no tratado ($M = -1$) a niveles inferiores a $100 \text{ mm}^3/\text{Nm}$ en el material tratado ($M = +1$), este comportamiento evidencia el efecto protector del tratamiento superficial frente al deterioro tribológico, asimismo, cargas elevadas ($L = +1$) intensifican el desgaste, especialmente en superficies no tratadas, mientras que los materiales tratados mantienen valores de k bajos incluso bajo esfuerzos mecánicos significativos, la curvatura de la superficie confirma la existencia de efectos de interacción relevantes entre M y L , en concordancia con lo expresado en el término de interacción de la Ecuación 3; por su parte, la la Figura 23c representa el comportamiento del coeficiente de fricción, cuyos valores fluctúan entre 0.28 y 0.68, mostrando una interacción sutil pero significativa entre M y L , se identifican valores mínimos del CoF, cercanos a 0.43, en condiciones de carga moderada-alta sobre superficies tratadas, lo que concuerda con reportes previos de la literatura, que atribuyen esta reducción a la formación de capas pasivas o productos de corrosión con propiedades lubricantes en medios tribocorrosivos; finalmente la Figura 23b muestra una tendencia análoga en relación con la profundidad de desgaste, la cual varía de aproximadamente $50 \mu\text{m}$ en condiciones de alta carga y ausencia de tratamiento, hasta valores inferiores a $5 \mu\text{m}$ en materiales tratados bajo cargas bajas, este resultado valida la efectividad del tratamiento para resistir la penetración y el daño superficial, observándose además una disminución casi lineal de la profundidad al incrementarse M , con una sensibilidad moderada respecto a la carga aplicada.

Figura 23. Contornos de superficies de respuestas estimadas para a) k ; b) CoF ; c)

Ancho de pista.





Capítulo 5. Conclusiones

El estudio bibliométrico reveló un incremento sostenido en la producción científica durante las últimas décadas, centrado en las áreas de tratamientos termoquímicos, recubrimientos avanzados y tribocorrosión, con una notable concentración de publicaciones en revistas de alto prestigio, destacando consistentemente títulos como *Surface & Coatings Technology* y *Wear*, mediante el análisis de coocurrencia de palabras clave, se identificaron las líneas de investigación dominantes a nivel internacional, entre las que sobresalen, la aplicación de recubrimientos PVD (Physical Vapor Deposition), los fenómenos de tribocorrosión y el uso de metodologías de Superficie de Respuesta (RSM), este perfil temático confirma la pertinencia y la alineación estratégica de la presente investigación con las tendencias globales del campo, adicionalmente, el examen de las redes de colaboración académica evidenció un ecosistema científico consolidado y dinámico, con un notable tejido de cooperación centrado principalmente en instituciones de Europa y Asia, lo cual no solo subraya la madurez del campo, sino que también establece un marco de oportunidades de cooperación que potencialmente fortalecerían la proyección y el alcance de futuras investigaciones en esta materia.

Los resultados tribológicos demostraron que los tratamientos superficiales evaluados ofrecieron una protección sobresaliente contra la tribocorrosión, con el tratamiento CMnP registrando la tasa de desgaste más baja ($k = 3.8 \text{ mm}^3/\text{Nm}$), y el PPBP evidenciando una pérdida mínima de material incluso bajo condiciones de alta carga, este desempeño contrasta marcadamente con el del material sin tratar (RM), que alcanzó valores críticos de desgaste ($k=900.5 \times \text{mm}^3/\text{Nm}$ a 20 N), el análisis estadístico validó que el tratamiento superficial es el factor de mayor peso en la Tasa de Desgaste, el CoF y el ancho de pista, como lo confirman los altos valores de la Razón-F (88.20, 149.09 y 0.20, respectivamente; $p<0.0001$), de manera

significativa, se encontró que el Coeficiente de Fricción se ve principalmente afectado por la carga aplicada, lo que subraya la necesidad de evaluar los efectos combinados en el diseño tribológico; finalmente, la implementación de la Metodología de Superficie de Respuesta (RSM) resultó fundamental, pues permitió el desarrollo de modelos polinomiales con un ajuste sobresaliente ($R^2 > 80\%$ en tasa de desgaste y ancho), logrando describir adecuadamente las interacciones no lineales entre los factores y, lo más importante, identificar las condiciones óptimas que minimizan la degradación superficial, confirmando la eficacia de esta herramienta para la optimización experimental.

Capítulo 6. Recomendaciones

Ampliar futuras revisiones bibliométricas incorporando bases de datos internacionales como Web of Science y Dimensions, lo que permitirá obtener una visión más global, exhaustiva y actualizada sobre la investigación en tratamientos superficiales y tribología; para enriquecer el análisis de tendencias, evolución temporal y redes de colaboración, es aconsejable utilizar herramientas especializadas como VOSviewer y Bibliometrix. VOSviewer facilita la construcción y visualización de mapas de co-ocurrencia de términos, redes de coautoría y análisis temporal de palabras clave, mientras que Bibliometrix, mediante su integración con R, permite realizar análisis avanzados de producción científica, índices de impacto y comparación entre múltiples bases de datos, además, se recomienda establecer una rutina de actualización periódica de los indicadores bibliométricos, lo que permitirá ajustar la orientación de los proyectos de investigación en función de las líneas temáticas emergentes y de mayor impacto internacional, asegurando así la relevancia y competitividad de los estudios futuros.

A su vez se recomienda implementar tratamientos superficiales como CMnP, PPBP y QPQ en componentes de alto rendimiento que operan bajo condiciones de desgaste y corrosión simultáneas, especialmente en aplicaciones marinas, de defensa y sistemas mecánicos expuestos a ambientes agresivos, estos tratamientos son capaces de formar fases duras y recubrimientos protectores, lo cual incrementa la resistencia al desgaste y la protección frente a la corrosión.

Para fortalecer la evaluación entre los mecanismos de protección y el desempeño tribológico, se sugiere complementar futuros estudios con análisis microestructurales avanzados, empleando técnicas como microscopía electrónica de barrido (SEM), espectroscopía de dispersión de energía (EDS) y difracción de rayos X (XRD), además, la caracterización detallada de las tribocapas permitirá identificar la naturaleza y estabilidad de las capas protectoras

formadas durante el servicio; se recomienda también ajustar los parámetros de prueba para simular de manera más realista las condiciones de operación, asegurando que los resultados sean representativos de los entornos industriales reales; asimismo, se aconseja utilizar metodologías de optimización como la superficie de respuesta (RSM) y modelos estadísticos de segundo orden en el diseño de experimentos tribológicos, estas herramientas permiten identificar las combinaciones óptimas de tratamientos y condiciones de operación, y pueden extenderse a otros materiales y aplicaciones industriales, de este modo, se facilita la selección informada de tratamientos superficiales y se maximiza la resistencia a la tribocorrosión en entornos exigentes, contribuyendo a la durabilidad y confiabilidad de los componentes críticos.

Referencias

- Ahmed, Y. M. (2020). The Influence of Annealing and Normalizing Processes on the Mechanical Properties and Chemical Composition of Carbon Steel ASTM A285Gr.C. *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 8(5), 4928–4933. <https://doi.org/10.35940/IJRTE.E6020.018520>
- Arunkumar, S., Chandrasekaran, M., Muthuraman, V., & Kumar, T. V. (2020). Study properties and mechanical behavior of the shaft material 16MnCr5. *Materials Today: Proceedings*, 37(Part 2), 2458–2461. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2020.08.286>
- ASTM. (2016). *ASTM G133-05(2016) Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear*. <https://doi.org/10.1520/G0133-05R16>
- ASTM. (2017). *ASTM E3-11(2017) Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens - Designation: E3 – - Studocu*. <https://www.studocu.com/co/document/fundacion-de-estudios-tecnicos/informatica/astm-e3-112017-standard-guide-for-preparation-of-metallographic-specimens/39218120>
- ASTM. (2021). *ASTM G119-09(2021) Guide for Determining Synergism Between Wear and Corrosion*. <https://doi.org/10.1520/G0119-09R21>
- Azhaarudeen, S., Faruck, A. A. M., & Nevosad, A. (2018). Tribological behaviour and wear mechanisms of manganese phosphate coatings under dry reciprocating sliding contact conditions. *Tribology International*, 122, 189–199. <https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2018.02.043>
- Bateni, M. R., Szpunar, J. A., Wang, X., & Li, D. Y. (2006). Wear and corrosion wear of medium carbon steel and 304 stainless steel. *Wear*, 260(1–2), 116–122. <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2004.12.037>

- Baykara, C., & Atik, E. (2025). The effect of surface roughness and carburized depth on wear resistance in 16MnCr5 case hardening steel. *Industrial Lubrication and Tribology*, 77(1), 81–92. <https://doi.org/10.1108/ILT-05-2024-0152/>
- Beake, B. D. (2022). The influence of the H/E ratio on wear resistance of coating systems: Insights from small-scale testing. *Surface and Coatings Technology*, 442, 128272. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2022.128272>
- Bepari, M. M. A. (2017). 2.3 Carburizing: A Method of Case Hardening of Steel. *Comprehensive Materials Finishing*, 2–3, 71–106. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.09187-6>
- BILTRA. (2025). *NORMALIZADO*. <https://www.biltra.com/tratamientos-vizcaya-bizkaia/normalizado/>
- Brodyanski, A., Klein, M. W., Merz, R., Smaga, M., Beck, T., & Kopnarski, M. (2020). Microstructural changes caused by friction loading in high manganese TWIP steel and case-hardened 16MnCr5. *Materials Characterization*, 163, 110231. <https://doi.org/10.1016/J.MATCHAR.2020.110231>
- CALLISTER JR, W. D. . (2020). *MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING : an introduction*.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2011). *C I E N C I A E I N G E N I E R Í A D E MATERIALES Versión española traducida por PERE MOLERA SOLÀ Segunda edición*. Barcelona · Bogotá · Buenos Aires · Caracas · México. www.reverte.com
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2020). *MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING : an introduction*.

- Campagnolo, A., Dabalà, M., & Meneghetti, G. (2019). Effect of Salt Bath Nitrocarburizing and Post-Oxidation on Static and Fatigue Behaviours of a Construction Steel. *Metals* 2019, Vol. 9, Page 1306, 9(12), 1306. <https://doi.org/10.3390/MET9121306>
- Carrera Espinoza, R., Alvarez Vera, M., Wettlaufer, M., Kerl, M., Barth, S., Moreno Garibaldi, P., Díaz Guillen, J. C., Hernández García, H. M., Muñoz Arroyo, R., & Ortega, J. A. (2024a). Study on the Tribological Properties of DIN 16MnCr5 Steel after Duplex Gas-Nitriding and Pack Boriding. *Materials* 2024, Vol. 17, Page 3057, 17(13), 3057. <https://doi.org/10.3390/MA17133057>
- Carrera Espinoza, R., Alvarez Vera, M., Wettlaufer, M., Kerl, M., Barth, S., Moreno Garibaldi, P., Díaz Guillen, J. C., Hernández García, H. M., Muñoz Arroyo, R., & Ortega, J. A. (2024b). Study on the Tribological Properties of DIN 16MnCr5 Steel after Duplex Gas-Nitriding and Pack Boriding. *Materials* 2024, Vol. 17, Page 3057, 17(13), 3057. <https://doi.org/10.3390/MA17133057>
- Carrera Espinoza, R., Alvarez Vera, M., Wettlaufer, M., Kerl, M., Barth, S., Moreno Garibaldi, P., Díaz Guillen, J. C., Hernández García, H. M., Muñoz Arroyo, R., & Ortega, J. A. (2024c). Study on the Tribological Properties of DIN 16MnCr5 Steel after Duplex Gas-Nitriding and Pack Boriding. *Materials* 2024, Vol. 17, Page 3057, 17(13), 3057. <https://doi.org/10.3390/MA17133057>
- Carrera-Espinoza, R., Figueroa-López, U., Martínez-Trinidad, J., Campos-Silva, I., Hernández-Sánchez, E., & Motallebzadeh, A. (2016). Tribological behavior of borided AISI 1018 steel under linear reciprocating sliding conditions. *Wear*, 362–363, 1–7. <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2016.05.003>

Córdova Valencia, Sheila. (2003). *Proceso de nitruración gaseosa en los aceros SAE 4340, SAE 4140, SAE 0-1, SAE 1045*.

Cortes Herrera, O., & Pingarrón, A. B. (2016). *Obtención de capas boruradas en aceros al carbono y aleados empleando bórax como medio de aporte*.

Decreto 4741 de 2005 - Gestor Normativo - Función Pública. (n.d.). Retrieved September 4, 2025, from <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=18718>

Definiciones y métodos para los ensayos mecánicos de productos de acero. (n.d.). Retrieved September 4, 2025, from <https://tienda.icontec.org/gp-ntc-definiciones-y-metodos-para-los-ensayos-mecanicos-de-productos-de-acero-ntc3353-2021.html>

Derematerialia. (2025). *Tratamientos térmicos básicos – Prácticas Metalográficas*.

<https://grupo.us.es/derematerialia/practicas-metalograficas/tratamientos-termicos-basicos/>

Díaz Guillén, J. C., Granda Gutiérrez, E. E., Campa Castilla, A., Pérez Aguilar, S. I., Garza

Gómez, A., & Candelas Ramírez, J. (2012). Modificación superficial de un acero AISI 1045 mediante un proceso dúplex nitruración y post-oxidación en un plasma CD pulsado.

Superficies y Vacío, 25(3), 166 170.

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-35212012000300004&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Dizisaz, M., Parast, M. S. A., & Azadi, M. (2025). The method for impact analyzing of duplex plasma nitriding and DLC coatings on the cyclic performance of 16MnCr5 piston pin steel under plain and fretting fatigue testing. *MethodsX*, 14.

<https://doi.org/10.1016/j.mex.2025.103164>

- Fischer, A., Dudzinski, W., Gleising, B., & Stemmer, P. (2018). *Analyzing Mild- and Ultra-Mild Sliding Wear of Metallic Materials by Transmission Electron Microscopy*. 29–59.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-99897-8_2
- Funatani, K. (2004). Low-temperature salt bath nitriding of steels. *Metal Science and Heat Treatment*, 46(7–8), 277–281.
<https://doi.org/10.1023/B:MSAT.0000048834.48163.2E/METRICS>
- García-León, R. A., Afanador-García, N., & Guerrero-Gómez, G. (2023). A Scientometric Review on Tribocorrosion in Hard Coatings. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*, 9(2), 1–22. <https://doi.org/10.1007/S40735-023-00759-4/METRICS>
- García-León, R. A., Martínez-Trinidad, J., Campos-Silva, I., & Wong-Angel, W. (2020). Mechanical characterization of the AISI 316L alloy exposed to boriding process. *DYNA*, 87(213), 34–41. <https://doi.org/10.15446/dyna.v87n213.82924>
- García-León, R. A., Martínez-Trinidad, J., Zepeda-Bautista, R., Campos-Silva, I., Guevara-Morales, A., Martínez-Londoño, J., & Barbosa-Saldaña, J. (2021a). Dry sliding wear test on borided AISI 316L stainless steel under ball-on-flat configuration: A statistical analysis. *Tribology International*, 157, 106885. <https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2021.106885>
- García-León, R. A., Martínez-Trinidad, J., Zepeda-Bautista, R., Campos-Silva, I., Guevara-Morales, A., Martínez-Londoño, J., & Barbosa-Saldaña, J. (2021b). Dry sliding wear test on borided AISI 316L stainless steel under ball-on-flat configuration: A statistical analysis. *Tribology International*, 157, 106885. <https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2021.106885>
- GTC. (n.d.). *GTC 45 Guía Técnica Colombiana | Resúmenes de Seguridad en el Lugar de Trabajo* | Docsity. Retrieved September 4, 2025, from <https://www.docsity.com/es/docs/gtc-45-guia-tecnica-colombiana/7784985/>

Guide for Measuring and Reporting Friction Coefficients. (2010).

<https://doi.org/10.1520/G0115-10>

Guillermina González Mancera Ma Eugenia Noguez Amaya, M. M. (2006). *Principios de Microscopía Electrónica de Barrido y Microanálisis por Rayos X Característicos*.

Guzmán Y Valle, E., Máter, A., Magisterio, D., Facultad, N., & Tecnología, D. E. (2018).

Tratamientos termo - químicos del acero. Universidad Nacional de Educación Enrique

Guzmán y Valle. <https://repositorio.une.edu.pe/handle/20.500.14039/3533>

Hasçelik. (2025, January). *Acero 16MnCr5 (SAE/ASTM/AISI 5115) – DIN 1.7131 – Hasçelik*.

<https://hascelik.com/es/16mncr5-din-1-7131-aisi-5115-acero>

Herrera Villafranca, M., Guerra Bustillos, C. W., Sarduy García, L., García Hernández, Y., &

Martínez, C. E. (2012). Diferentes métodos estadísticos para el análisis de variables

discretas. Una aplicación en las ciencias agrícolas y técnicas. *Revista Ciencias Técnicas*

Agropecuarias, 21(1), 58 62. [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542012000100011&lng=es&nrm=iso&tlng=es)

[00542012000100011&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-00542012000100011&lng=es&nrm=iso&tlng=es)

Hutchings, I. M. ., & Shipway, Philip. (2017). *Tribology : friction and wear of engineering materials*. 388.

Ilaiyavel, S., & Venkatesan, A. (2012). Experimental Investigation of Wear Characteristics on

Manganese Phosphate Coated AISI D2 Steel. *International Journal of Precision*

Engineering and Manufacturing, 13(4), 581 586. [https://doi.org/10.1007/S12541-012-](https://doi.org/10.1007/S12541-012-0074-7/METRICS)

[0074-7/METRICS](https://doi.org/10.1007/S12541-012-0074-7/METRICS)

Ipaz, L., Aperador, W., & Esguerra-Arce, A. (2013). Influencia de un tratamiento térmico en el

comportamiento tribológico de aceros Fe-Mn-Al. *Revista Mexicana de Física*, 59(4), 322

327. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0035-001X2013000400007&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- ISO. (n.d.). *ISO 14001:2015(es), Sistemas de gestión ambiental — Requisitos con orientación para su uso*. Retrieved September 4, 2025, from <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso:14001:ed-3:v1:es>
- ISO. (2006). *ISO 3534-1:2006 - Statistics — Vocabulary and symbols — Part 1: General statistical terms and terms used in probability*. <https://www.iso.org/standard/40145.html>
- ISO. (2016). *ISO 18203:2016 - Acero — Determinación del espesor de las capas superficiales endurecidas*. https://www.iso.org/standard/61748.html?utm_source=chatgpt.com
- Jacquet, P., Coudert, J. B., & Lourdin, P. (2011). How different steel grades react to a salt bath nitrocarburizing and post-oxidation process: Influence of alloying elements. *Surface and Coatings Technology*, 205(16), 4064–4067. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2011.02.049>
- Jiménez Salas, R., & Salas, J. (2010). El tratamiento de QPQ en el mejoramiento mecánico y químico de los aceros para moldes de plástico: caso de AISI P20. *Revista Tecnología En Marcha*, 23(5), ág. 51-ág. 51. https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/58
- J.R. Davis. (2004). *Tensile Testing Second Edition*. www.asminternational.org
- modified AISI D2 steel. *Surface and Coatings Technology*, 394, 125884. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2020.125884>
- Kerl, M., Wettlaufer, M., Barth, S., Vera, M. A., & Espinoza, R. C. (2025). Prueba de desgaste para 16MnCr5 con una punta montada esférica recubierta de diamante. *Materialpruefung Ensayo de Materiales*, 67(8), Article 1343-1356. <https://doi.org/10.1515/mt-2025-0082>

- Kumar, A., Bhola, S. K., & Majumdar, J. D. (2012). Microstructural characterization and surface properties of zinc phosphated medium carbon low alloy steel. *Surface and Coatings Technology*, 206(17), 3693–3699. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2012.02.052>
- Li, B., Li, C., Wang, Y., & Jin, X. (2018). Effect of Cryogenic Treatment on Microstructure and Wear Resistance of Carburized 20CrNi2MoV Steel. *Metals* 2018, Vol. 8, Page 808, 8(10), 808. <https://doi.org/10.3390/MET8100808>
- Li, X., Olofsson, U., & Bergseth, E. (2017). *Pin-on-Disc Study of Tribological Performance of Standard and Sintered Gear Materials Treated with Triboconditioning Process: Pretreatment by Pressure-Induced Tribofilm Formation*. *Transactions*, 60(1), 47–57.
- Macías Delgado Julio. (2019a). *Microestructura y propiedades mecánicas de aceros de activación reducida endurecidos mediante dispersión de óxidos - Dialnet*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=254951>
- Macías Delgado Julio. (2019b). *Microestructura y propiedades mecánicas de aceros de activación reducida endurecidos mediante dispersión de óxidos - Dialnet*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=254951>
- Manuel, J., Carlos, J., & Carlos, U. (2020). Revista de Ingeniería Innovativa Efecto del tipo de acero y su acabado superficial sobre la cinética de fosfatizado con manganeso Effect of the type of steel and its surface finish on the kinetics of phosphatized with manganese. *Diciembre*, 4, 15–16. <https://doi.org/10.35429/JOIE.2020.15.4.1.17>
- Martín-Alfonso, J. E., & Valencia, C. (2015). Tribological, rheological, and microstructural characterization of oleogels based on EVA copolymer and vegetables oils for lubricant applications. *Tribology International*, 90, 426–434. <https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2015.05.004>

Mendoza Figueroa, B. A., & Sánchez Almeida, V. G. (2020). *Parametrización predictiva del acabado superficial en el fresado convexo mediante la aplicación de los métodos estadísticos Taguchi - ANOVA en el acero M201*.

<http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19206>

Mendoza Ramírez, M.-C., Avalos Borja, M., Mendoza Ramírez, M.-C., & Avalos Borja, M. (2020). Nanoestructuras y su caracterización por medio de microscopía electrónica de transmisión; ciencia y arte. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria En Nanociencias y Nanotecnología*, 13(25), 61 78.

<https://doi.org/10.22201/CEIICH.24485691E.2020.25.69630>

METINVEST. (2025). *Acero 16MnCr5: características, propiedades, análogos - Metinvest*.

<https://metinvestholding.com/es/products/steel-grades/16mncr5>

Métodos de ensayo y prácticas para análisis químico de productos de acero. (n.d.). Retrieved September 4, 2025, from https://tienda.icontec.org/gp-ntc-metodos-de-ensayo-y-practicas-para-analisis-quimico-de-productos-de-acero-ntc5192-2021.html?utm_source=chatgpt.com

Mohan, N., & Arul, S. (2018). Effect of Cryogenic Treatment on the Mechanical Properties of Alloy Steel 16MnCr5. *Materials Today: Proceedings*, 5(11), 25265 25275.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.329>

Msc García-León, Ricardo Andrés, Jhon Herrera-Perea, I., & Cerón-Guerrero, J. (2020).

Mejoramiento de las propiedades mecánicas de la fundición gris nodular con la aplicación de tratamientos térmicos. *Revista Ingenio*, 17(1), 21 27.

<https://doi.org/10.22463/2011642X.2653>

Nguyen, H. C., Svoboda, E., Prochazka

DETERMINATION OF CONDITIONS FOR EVALUATING FRICTION-WEAR

PROPERTIES OF COATINGS. *METAL 2021 - 30th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings*, 697-704.

<https://doi.org/10.37904/METAL.2021.4168>

Ortiz, M., Cruz, A., Morgado, I., Farfán, J. M., Hernández, J., & Cruz, J. D. (2020). Tratamientos termoquímicos. *Ingenio y Conciencia Boletín Científico de La Escuela Superior Ciudad Sahagún*, 7(14), 17-31. <https://doi.org/10.29057/ESCS.V7I14.5686>

Otai Special Steel. (2020). *Acero para engranajes 16MnCr5, acero cementado - Proveedor chino de acero especial - OTAI Special Steel*. <https://www.otasteel.com/products/bearing-steel-and-gear-steel/16mncr5-steel-1-7131-carburizing-steelgearing-steel-round-bar-din-17210/>

Ríos-Díez, O., Serna Giraldo, C. P., Aristizábal-Sierra, R., Ríos-Díez, O., Serna Giraldo, C. P., & Aristizábal-Sierra, R. (2020). Desarrollo de aceros fundidos para ser tratados térmicamente mediante carbo-austemperado. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 28(4), 718-730. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052020000400718>

Roland Torres Soria Timoteo Segundo Alonso Ortega Asesor, C., Danny Stephan Zelada Mosquera, M., & -Perú, L. (2023). Control estadístico de procesos y análisis de problemas en el tratamiento térmico de piezas de acero en la empresa Aceros Chilca SAC, Lima 2021. *Universidad Privada Del Norte*.

Romero, J. E. (2016). Influence of the test parameters of sliding friction of a austenitic-ferritic stainless steel using methodologies Taguchi and Anova. *Revista Ingeniería UC*, 23(1), 41-48.

Sola, R., Poli, G., Veronesi, P., & Giovanardi, R. (2014). Effects of surface morphology on the wear and corrosion resistance of post-treated Nitrided and nitrocarburized 42CrMo4 steel.

- Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 45(6), 2827–2833. <https://doi.org/10.1007/S11661-014-2219-Z>
- Staia, M. H., Pérez-Delgado, Y., Sanchez, C., Castro, A., Le Bourhis, E., & Puchi-Cabrera, E. S. (2009). Hardness properties and high-temperature wear behavior of nitrided AISI D2 tool steel, prior and after PAPVD coating. *Wear*, 267(9–10), 1452–1461. <https://doi.org/10.1016/J.WEAR.2009.03.045>
- Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*. (2023). <https://doi.org/10.1520/G0099-23>
- Tylecote, R. F. . (2002a). *A history of metallurgy*. 205.
- Tylecote, R. F. . (2002b). *A history of metallurgy*. 205.
- Weng, D., Jokiel, P., Uebleis, A., & Boehni, H. (1997). Corrosion and protection characteristics of zinc and manganese phosphate coatings. *Surface and Coatings Technology*, 88(1–3), 147–156. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(96\)02860-5](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(96)02860-5)
- William F. Smith, J. H. (2014). Propiedades Magnéticas. *Fundamentos de La Ciencia e Ingeniería de Materiales*, 633–638.
- Wong-Ángel, W. D., Martínez-Trinidad, J., Campos-Silva, I., Hernandez-Hernandez, V., Silva-Rivera, U. S., & García-León, R. A. (2021). Wear-Corrosion Synergy on Din-16MnCr5 Steel Under Nitriding and Post-Oxidizing Treatments. *Journal of Bio- and Tribo-Corrosion*, 7(3). <https://doi.org/10.1007/S40735-021-00511-W>
- Wong-Ángel, W. D., Martínez-Trinidad, J., Campos-Silva, I., Romero-Romo, M., Hernández-Hernández, V., Silva-Rivera, U. S., & García-León, R. A. (2020a). Tribocorrosion of DIN 16MnCr5 Steel Modified by Carburization and Manganese Phosphate Coating. *Journal of*

Materials Engineering and Performance, 29(5), 2879–2889.

<https://doi.org/10.1007/S11665-020-04828-4/METRICS>

Wong-Ángel, W. D., Martínez-Trinidad, J., Campos-Silva, I., Romero-Romo, M., Hernández-Hernández, V., Silva-Rivera, U. S., & García-León, R. A. (2020b). Tribocorrosion of DIN 16MnCr5 Steel Modified by Carburization and Manganese Phosphate Coating. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 29(5), 2879–2889.

<https://doi.org/10.1007/S11665-020-04828-4/METRICS>

Wong-Ángel, W. D., Martínez-Trinidad, J., Campos-Silva, I., Romero-Romo, M., Hernández-Hernández, V., Silva-Rivera, U. S., & García-León, R. A. (2022). Tribocorrosion of DIN 16MnCr5 Steel Modified by Carburization and Manganese Phosphate Coating. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 29(5), 2879–2889.

<https://doi.org/10.1007/S11665-020-04828-4>

rolled and cold-drawn SAE 8620 and 16MnCr5 steels. *Vacuum*, 85(3), 390–396.

<https://doi.org/10.1016/J.VACUUM.2010.07.013>

Zhang, Y., Yang, J., Xiao, D., Luo, D., Tuo, C., & Wu, H. (2022). Effect of Quenching and Tempering on Mechanical Properties and Impact Fracture Behavior of Low-Carbon Low-Alloy Steel. *Metals*, 12(7), 1087. <https://doi.org/10.3390/met12071087>

Apéndice.

Tabla de resultados estimados para: k, CoF y ancho de pista.

Tabla de tasa de desgaste específico.

Fila	Observados Valores	Ajustados Valores	Inferior 95,0% para Media	Superior 95,0% para Media
1	356,1	419,492	291,994	546,99
2	282,0	207,703	110,899	304,507
3	0,33	67,6677	-24,5841	159,92
4	118,1	-0,614397	-92,8663	91,6375
5	14,1	2,85681	-93,9472	99,6608
6	4,2	78,0813	-49,417	205,58
7	576,8	547,605	438,276	656,934
8	264,5	304,155	215,713	392,597
9	0,73	132,459	41,1445	223,773
10	203,5	32,5157	-58,7985	123,83
11	18,0	4,32608	-84,1156	92,7677
12	6,1	47,8898	-61,4392	157,219
13	900,5	679,484	551,986	806,982
14	174,6	404,374	307,57	501,178
15	0,49	201,016	108,764	293,268
16	285,2	69,4125	-22,8393	161,664
17	20,4	9,56202	-87,242	106,366
18	3,8	21,4648	-106,034	148,963
19	354,3	418,568	291,069	546,066
20	280,5	206,779	109,975	303,583
21	0,32	66,7433	-25,5086	158,995
22	117,4	-1,53884	-93,7907	90,713
23	13,9	1,93237	-94,8716	98,7363
24	4,1	77,1569	-50,3415	204,655
25	572,9	546,68	437,351	656,009
26	262,9	303,231	214,789	391,672
27	0,71	131,534	40,22	222,848
28	202,0	31,5913	-59,7229	122,906
29	17,8	3,40163	-85,04	91,8433
30	6,0	46,9653	-62,3636	156,294
31	898,1	678,56	551,061	806,058
32	173,5	403,449	306,645	500,253
33	0,48	200,092	107,84	292,344
34	284,0	68,4881	-23,7638	160,74
35	20,2	8,63757	-88,1664	105,442
36	3,7	20,5404	-106,958	148,039
37	358,0	420,355	292,856	547,853
38	283,7	208,566	111,762	305,37
39	0,34	68,5305	-23,7214	160,782
40	119,2	0,248381	-92,0035	92,5003
41	14,3	3,71959	-93,0844	100,524
42	4,3	78,9441	-48,5542	206,443
43	578,6	548,467	439,139	657,796
44	265,8	305,018	216,576	393,459
45	0,74	133,321	42,0073	224,636
46	205,0	33,3785	-57,9357	124,693
47	18,2	5,18886	-83,2528	93,6305
48	6,2	48,7525	-60,5764	158,081
49	903,2	680,347	552,848	807,845
50	175,9	405,236	308,432	502,04
51	0,5	201,879	109,627	294,131
52	286,4	70,2753	-21,9766	162,527
53	20,6	10,4248	-86,3792	107,229
54	4,0	22,3276	-105,171	149,826

Tabla de Coeficiente de Fricción.

Fila	Observados Valores	Ajustados Valores	Inferior 95,0% para Media	Superior 95,0% para Media
1	0,43	0,434841	0,356458	0,513225
2	0,42	0,475413	0,4159	0,534926
3	0,38	0,501103	0,444389	0,557818
4	0,67	0,511913	0,455198	0,568627
5	0,61	0,507841	0,448328	0,567354
6	0,41	0,488889	0,410506	0,567272
7	0,53	0,414484	0,347271	0,481697
8	0,47	0,447198	0,392826	0,50157
9	0,35	0,465032	0,408894	0,52117
10	0,5	0,467984	0,411846	0,524122
11	0,45	0,456056	0,401684	0,510428
12	0,38	0,429246	0,362033	0,496459
13	0,32	0,35246	0,274077	0,430844
14	0,4	0,377317	0,317804	0,43683
15	0,3	0,387294	0,330579	0,444008
16	0,44	0,382389	0,325674	0,439103
17	0,39	0,362603	0,30309	0,422116
18	0,34	0,327937	0,249553	0,40632
19	0,42	0,424841	0,346458	0,503225
20	0,41	0,465413	0,4059	0,524926
21	0,37	0,491103	0,434389	0,547818
22	0,66	0,501913	0,445198	0,558627
23	0,6	0,497841	0,438328	0,557354
24	0,4	0,478889	0,400506	0,557272
25	0,52	0,404484	0,337271	0,471697
26	0,46	0,437198	0,382826	0,49157
27	0,34	0,455032	0,398894	0,51117
28	0,49	0,457984	0,401846	0,514122
29	0,44	0,446056	0,391684	0,500428
30	0,37	0,419246	0,352033	0,486459
31	0,31	0,34246	0,264077	0,420844
32	0,39	0,367317	0,307804	0,42683
33	0,29	0,377294	0,320579	0,434008
34	0,43	0,372389	0,315674	0,429103
35	0,38	0,352603	0,29309	0,412116
36	0,33	0,317937	0,239553	0,39632
37	0,44	0,444841	0,366458	0,523225
38	0,43	0,485413	0,4259	0,544926
39	0,39	0,511103	0,454389	0,567818
40	0,68	0,521913	0,465198	0,578627
41	0,62	0,517841	0,458328	0,577354
42	0,42	0,498889	0,420506	0,577272
43	0,54	0,424484	0,357271	0,491697
44	0,48	0,457198	0,402826	0,51157
45	0,36	0,475032	0,418894	0,53117
46	0,51	0,477984	0,421846	0,534122
47	0,46	0,466056	0,411684	0,520428
48	0,39	0,439246	0,372033	0,506459
49	0,33	0,36246	0,284077	0,440844
50	0,41	0,387317	0,327804	0,44683
51	0,31	0,397294	0,340579	0,454008
52	0,45	0,392389	0,335674	0,449103
53	0,4	0,372603	0,31309	0,432116
54	0,35	0,337937	0,259553	0,41632

Tabla de ancho de pista.

Fila	Observados Valores	Ajustados Valores	Inferior 95,0% para Media	Superior 95,0% para Media
1	18,0	19,2743	15,2862	23,2624
2	14,0	14,7394	11,7114	17,7674
3	16,0	11,2739	8,38834	14,1595
4	10,0	8,87791	5,99231	11,7635
5	4,0	7,55132	4,52334	10,5793
6	7,0	7,29418	3,30609	11,2823
7	25,0	25,6136	22,1939	29,0334
8	18,0	19,4097	16,6432	22,1761
9	12,0	14,2751	11,4189	17,1314
10	15,0	10,2101	7,35378	13,0663
11	6,0	7,21442	4,448	9,98083
12	6,0	5,28823	1,86847	8,70799
13	40,0	34,4474	30,4593	38,4354
14	24,0	26,5743	23,5464	29,6023
15	10,0	19,7708	16,8852	22,6564
16	22,0	14,0366	11,151	16,9222
17	9,0	9,37196	6,34397	12,3999
18	5,0	5,77672	1,78863	9,76481
19	17,8	19,091	15,1029	23,0791
20	13,8	14,5561	11,5281	17,5841
21	15,8	11,0906	8,20501	13,9762
22	9,9	8,69458	5,80898	11,5802
23	3,9	7,36799	4,34	10,396
24	6,8	7,11085	3,12275	11,0989
25	24,8	25,4303	22,0105	28,8501
26	17,8	19,2263	16,4599	21,9927
27	11,8	14,0918	11,2355	16,9481
28	14,8	10,0267	7,17045	12,883
29	5,8	7,03108	4,26467	9,7975
30	5,8	5,10489	1,68513	8,52466
31	39,7	34,264	30,2759	38,2521
32	23,9	26,391	23,363	29,419
33	9,8	19,5874	16,7018	22,473
34	21,9	13,8533	10,9677	16,7389
35	8,8	9,18862	6,16064	12,2166
36	4,8	5,59339	1,60529	9,58148
37	18,2	19,4521	15,464	23,4402
38	14,2	14,9172	11,8892	17,9452
39	16,2	11,4517	8,56612	14,3373
40	10,1	9,05569	6,17009	11,9413
41	4,1	7,7291	4,70111	10,7571
42	7,2	7,47196	3,48386	11,4601
43	25,2	25,7914	22,3716	29,2112
44	18,2	19,5874	16,821	22,3539
45	12,2	14,4529	11,5966	17,3092
46	15,2	10,3878	7,53156	13,2441
47	6,2	7,3922	4,62578	10,1586
48	6,2	5,46601	2,04624	8,88577
49	40,2	34,6251	30,637	38,6132
50	24,1	26,7521	23,7241	29,7801
51	10,2	19,9485	17,0629	22,8341
52	22,1	14,2144	11,3288	17,1
53	9,2	9,54974	6,52175	12,5777
54	5,2	5,9545	1,9664	9,94259

