



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE CONTACTO ENTRE SUPERFICIES CON MOVIMIENTO RELATIVO PARA PREDICCIÓN DE DESGASTE EN COJINETES DE FRICCIÓN DE ALEACIÓN DE ALUMINIO

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO MECÁNICO

MOLINA BAÑO IVÁN RENÉ
ivan.molina@epn.edu.ec

VILAÑA PEÑA DAVID ALEJANDRO
david.vilaña@epn.edu.ec

DIRECTOR: RAMÍREZ PAREDES FERNANDO RENATO
frramirez@utn.edu.ec

CODIRECTOR: DÍAZ CAMPOVERDE CARLOS WIME
carlos.diaz@epn.edu.ec

Quito, Febrero de 2018

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **IVÁN RENÉ MOLINA BAÑO** y **DAVID ALEJANDRO VILAÑA PEÑA**, bajo mi supervisión.

Ing. Fernando Ramírez, PhD
DIRECTOR DE PROYECTO

Ing. Carlos Díaz, M.Sc.
CODIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Yo, **IVÁN RENÉ MOLINA BAÑO**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Molina Baño Iván René

DECLARACIÓN

Yo, **DAVID ALEJANDRO VILAÑA PEÑA**, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

Vilaña Peña David Alejandro

AGRADECIMIENTO

Agradecimiento eterno a Dios por amarme, ser paciente y brindarme la paz de su
presencia.

A mi familia por darme su amor y apoyo en cada etapa de mi vida, por ser siempre
modelos a seguir en mi vida.

A la Escuela Politécnica Nacional por ser una gran bendición en mi vida
Iván.

AGRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a Dios, por ser mi guía e inspiración en todos estos años.

A mis padres Gustavo y Elcy, quienes a lo largo de mi vida han velado por mi bienestar siendo mi apoyo en todo momento.

A mis hermanas Elcy y Sarys, por su cariño y sobre todo estar junto a mí en todo momento.

A mis abuelitos César y Hortensia, por ser mi ejemplo a seguir y quienes en toda mi vida han sido mi apoyo incondicional.

Finalmente un agradecimiento a la Escuela Politécnica Nacional y a la Facultad de Ingeniería Mecánica por permitirme ser parte de esta gran institución y ayudarme en mi formación académica.

David

ÍNDICE

Certificación	i
Declaración	ii
Agradecimiento	iv
Indice de figuras	ix
Indice de tablas	xii
Resumen	xiv
Abstract.....	xv
Glosario	xvi
INTRODUCCIÓN.....	1
Pregunta de Investigación	3
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos	3
1. MARCO TEÓRICO	4
1.1. Cojinete de fricción	4
1.1.1. Materiales.....	5
1.1.2. Movimiento relativo	6
1.1.3. Criterios de desempeño	6
1.2. Geometría.....	8
1.2.1. Pin on disc.....	8
1.3. Análisis estructural.....	9
1.3.1. Cargas.....	9
1.3.2. Esfuerzos.....	9
1.3.2.1. Esfuerzo normal	10
1.3.2.2. Esfuerzo cortante	10
1.3.3. Deformaciones	11
1.3.5. Teoría de Von Misses o Von Misses - Hencky	11
1.4. Análisis térmico	12
1.4.1. Distribución de temperaturas en sólidos	12
1.4.2. Generación de calor por fricción	13
1.4.3. Ecuación de Conducción	13

1.4.4.	Ecuación de Convección	14
1.4.5.	Sólido Semi-infinito	14
1.4.6.	Aceleración para alcanzar la estabilidad térmica	15
1.5.	Tribología	15
1.5.1.	Fricción	15
1.5.2.	Desgaste	16
1.5.2.1.	Desgaste lineal deslizante	17
1.6.	Contacto	18
1.6.1.	Contacto de Hertz	18
1.6.2.	Modelo de fricción de Coulomb	19
1.7.	Método de elementos finitos	20
1.7.1.	Módulo Transitorio Estructural (Transient Structural)	20
1.7.2.	Mallado	21
1.7.2.1.	Elemento de Malla	21
1.7.2.2.	Calidad de Malla	21
1.7.2.3.	Tipos de lementos de Malla	23
1.8.	Consideración No-lineal	24
1.8.1.	Iteración de Equilibrio	25
1.9.	Evaluación de Error	25
1.9.1.	Error de selección del modelo matemático	26
1.9.2.	Errores computacionales	26
1.9.3.	Error por discretización	26
2.	METODOLOGÍA	27
2.1.	Modelo de contacto	28
2.1.1.	Cojinete de fricción-muñon	28
2.1.2.	Pin on disc	29
2.2.	Condiciones experimentales	29
2.2.1.	Propiedades de materiales	30
2.2.2.	Cargas de experimentación	31
2.2.3.	Velocidad de deslizamiento	31
2.2.4.	Parámetros de contacto	32
2.2.5.	Condiciones térmicas	32
2.3.	Condiciones de simulación	32

2.3.1.	Diseño geométrico	33
2.3.1.1.	Pin on disc 2-D	33
2.3.1.2.	Pin on block	34
2.3.2.	Mallado y discretización	35
2.3.2.1.	Pin on disc 2-D	35
2.3.2.2.	Pin on block	38
2.3.3.	Parámetros de entrada	41
2.3.3.1.	Propiedades de materiales	41
2.3.3.2.	Condiciones de contacto	42
2.3.3.3.	Condiciones de entorno	44
2.3.4.	Configuraciones de análisis	58
2.3.5.	Análisis de sensibilidad	60
2.4.	Desempeño de simulación	62
2.4.1.	Solución	62
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	65
3.1.	Resultados.....	65
3.1.1.	Resultados distribución de presiones	65
3.1.2.	Resultados distribución de temperaturas	69
3.1.2.1.	Estado Transitorio	70
3.1.2.2.	Estado Estable	74
3.1.3.	Desgaste lineal.....	77
3.2.	Discusión.....	80
3.2.1.	Validación del modelo Pin on block.....	80
3.2.1.1.	Validación presión de contacto	80
3.2.1.2.	Validación perfil de temperaturas estado transitorio.....	82
3.2.1.3.	Validación perfil de temperaturas estado estable	82
3.2.1.4.	Validación desgaste lineal	82
3.2.2.	Análisis de resultados	84
3.2.2.1	Análisis de presiones	84
3.2.2.2	Análisis térmico	84
3.2.2.3	Análisis desgaste lineal	85
4.	CONCLUSIONES	87
	Referencias Bibliográficas	89
	Anexos.....	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Cojinete de fricción de aluminio	4
Figura 1.2. Composición de un cojinete tri-metálico.....	6
Figura 1.3. Diagrama P vs V en cojinetes de fricción secos.	7
Figura 1.4. Configuración de contacto Pin on disc	8
Figura 1.5. Esfuerzo Normal	10
Figura 1.6. Esfuerzo Cortante	10
Figura 1.7. Distribución de temperatura transitoria de un sólido semi-infinito para tres condiciones superficiales	14
Figura 1.8. Fuerza aplicada vs fuerza de rozamiento	16
Figura 1.9. Secuencia de etapas del desgaste adhesivo dentro de una interfaz de contacto	17
Figura 1.10. Fatiga superficial	17
Figura 1.11. Contacto de Hertz entre dos superficies cilíndricas	18
Figura 1.12. Tipos de contacto de Hertz	18
Figura 1.13. Oblicuidad en elementos hexaédricos y tetraédricos	22
Figura 1.14. Vectores de ortogonalidad	23
Figura 1.15. Relación de Jacobianos para cuadriláteros	23
Figura 1.16. Tipos de elementos de malla	24
Figura 2.1. Diagrama de Metodología.....	27
Figura 2.2. Configuración de contacto muñón cojinete de fricción.....	28
Figura 2.3. Dimensiones de la configuración de contacto Pin on disc.....	29
Figura 2.4. Diagrama de flujo para la simulación de contacto	33
Figura 2.5. Configuración de contacto Pin on disc 2-D.....	34
Figura 2.6. Configuración de contacto Pin on block	34
Figura 2.7. Edge Sizing aplicado a los cuerpos en contacto	35
Figura 2.8. Face meshing aplicado a los cuerpos en contacto	36
Figura 2.9. Mallado Pin on disc 2-D	36
Figura 2.10. Método de ajuste de malla (Patch conforming method) aplicado a los cuerpos ...	38
Figura 2.11. Refinement aplicado en la superficie de contacto	39
Figura 2.12. Mallado utilizado en la configuración bloque	39
Figura 2.13. Mallado utilizado en la configuración pin	40

Figura 2.14. Propiedades del material Al-6061.....	42
Figura 2.15. Propiedades del material acero estructural.....	42
Figura 2.16. Materiales utilizados en el presente trabajo dentro de ANSYS	42
Figura 2.17. Método Aumentado de Lagrange en Ansys Workbench	43
Figura 2.18. Comando APDL utilizado para definir los grados de libertad tanto térmicos como estructural para ambos elementos	46
Figura 2.19. Comando APDL utilizado para definir la generación de calor y transferencia a los cuerpos en contacto.....	46
Figura 2.20. Comando APDL utilizado para definir las condiciones de borde tipo térmica.....	46
Figura 2.21. Condiciones de Borde para el sólido semi-infinito	47
Figura 2.22. (a) Modelo térmico de pin. (b) Modelo matemático representativo del pin.....	49
Figura 2.23. Ciclo For para evaluar la temperatura en el pin en el tiempo y posición dentro del pin	52
Figura 2.24. Perfil de temperaturas en estado estable a una carga de 50 N en Ansys Workbench	53
Figura 2.25. Perfil de temperaturas en estado estable a una carga de 40 N en Ansys Workbench	54
Figura 2.26. Perfil de temperaturas en estado estable a una carga de 30 N en Ansys Workbench	54
Figura 2.27. Perfil de temperaturas en estado estable a una carga de 20 N en Ansys Workbench	55
Figura 2.28. Perfil de temperaturas en estado estable a una carga de 10 N en Ansys Workbench	55
Figura 2.29. Configuración de análisis	58
Figura 2.30. (a) Configuración de malla con refinamiento bajo (b) Calidad de malla.....	60
Figura 2.31. Mallado con refinamiento bajo para el modelo Pin on block	60
Figura 2.32. (a) Configuración de malla con refinamiento bajo (b) Calidad de malla.....	61
Figura 2.33. Mallado con refinamiento medio para el modelo Pin on block	62
Figura 2.34. Solución del modelo Pin on block.....	64
Figura 2.35. Soluciones utilizadas en la configuración Pin on block	64
Figura 3.1. Presiones de contacto obtenidos en Suresh (2017).....	66
Figura 3.2. Presiones de contacto vs carga aplicada publicado en Suresh y simulaciones realizadas en el trabajo	66
Figura 3.3. Distribución de presión de contacto en MPa en la cara de contacto del pin de Al bajo una carga de 50N	67

Figura 3.4. Distribución de presión de contacto en MPa en la cara de contacto del pin de Al bajo una carga de 40N	68
Figura 3.5. Distribución de presión de contacto en MPa en la cara de contacto del pin de Al bajo una carga de 30N o	68
Figura 3.6. Distribución de presión de contacto en MPa en la cara de contacto del pin de Al bajo una carga de 20N	69
Figura 3.7. Distribución de presión de contacto en MPa en la cara de contacto del pin de Al bajo una carga de 10N	69
Figura 3.8. . Temperatura superficial en el pin vs tiempo mediante el método del sólido semi-infinito	70
Figura 3.9. Temperatura superficial en el pin vs tiempo simulación Pin on block	71
Figura 3.10. Perfiles de temperaturas superficiales en el pin en estado transitorio tanto del método analítico cómo de la simulación pin on block en Ansys	72
Figura 3.11. Perfiles de temperaturas superficiales en el pin vs tiempo a una carga de 10 N....	73
Figura 3.12. Perfiles de temperaturas superficiales en el pin vs tiempo a una carga de 20 N ...	73
Figura 3.13. Perfiles de temperaturas superficiales en el pin vs tiempo a una carga de 30 N ...	73
Figura 3.14. Perfiles de temperaturas superficiales en el pin vs tiempo a una carga de 40 N ..	74
Figura 3.15. Perfiles de temperaturas superficiales en el pin vs tiempo a una carga de 50 N ..	74
Figura 3.16. Perfiles de temperaturas superficiales en el pin vs tiempo, obtenido mediante análisis numérico en Matlab	75
Figura 3.17. Estabilidad de temperatura superficial en el pin en tiempo bajo una carga de 50N.....	75
Figura 3.18. Perfil de temperatura superficial en el pin en tiempo hasta alcanzar la estabilidad a una carga de 30 N bajo el análisis numérico en Matlab	76
Figura 3.19. Perfil de temperatura superficial en el pin en tiempo hasta alcanzar la estabilidad a una carga de 30 N en la simulación en Ansys	76
Figura 3.20. Desgaste lineal en modelos analizados	78
Figura 3.21. Coeficiente de desgaste adhesivo en función de la temperatura.....	79
Figura 3.22. Distribuciones de presiones en la superficie de contacto sin consideraciones térmicas. (a)Simulación Pin on block. (b)Simulación Suresh.....	81
Figura 3.23. Desgaste lineal en los modelos de simulación considerando un Ka variable.....	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Valores de calidad de malla según el criterio del Skewness	22
Tabla 2.1. Propiedades de materiales utilizados en configuraciones de contacto.....	30
Tabla 2.2. Propiedades térmicas del Aluminio 6061.....	30
Tabla 2.3. Propiedades térmicas del acero estructural	31
Tabla 2.4. Configuración de cargas Pin on disc	31
Tabla 2.5. Velocidad de deslizamiento y rotación para Pin on ring	32
Tabla 2.6. Parámetros de contacto en la configuración Block on ring.....	32
Tabla 2.7. Calidad de mallado en la simulación Pin on disc 2-D.....	36
Tabla 2.8. Elementos simulación Pin on disc 2-D	37
Tabla 2.9. Características de malla Pin on disc 2-D	37
Tabla 2.10. Calidad de mallado en la simulación Pin on block.....	40
Tabla 2.11. Elementos simulación Pin on block	40
Tabla 2.12. Características de malla Pin on block	41
Tabla 2.13. Parámetros y variables del estudio de temperaturas	48
Tabla 2.14. Temperaturas en la superficie de contacto del pin a diferentes tiempos para una carga aplicada de 50 [N]	49
Tabla 2.15. Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección.....	52
Tabla 2.16. Constante f1 en función del tipo de movimiento, carga y velocidad.....	56
Tabla 2.17. Constante f2 en función de la temperatura ambiental y limpieza de la superficial	56
Tabla 2.18. Constante f1 seleccionada en base a las condiciones de operación.....	57
Tabla 2.19. Resultados obtenidos en las distintas configuraciones.....	62
Tabla 3.1. Presión de contacto obtenido de manera experimental y mediante elementos finitos. Suresh, 2017.....	65
Tabla 3.2. Presión de contacto a distintas cargas en Ansys Workbench.....	66
Tabla 3.3. Errores calculados para las presiones de contacto a distintas cargas.....	67
Tabla 3.4. Temperatura superficial en el pin bajo distintas cargas en estado transitorio	70
Tabla 3.5. Temperatura superficial en el pin bajo distintas cargas en el modelo Pin on block.	71
Tabla 3.6. Error absoluto entre la temperatura superficial en estado transitorio entre el modelo Pin on block y el modelo sólido semi-infinito.....	72
Tabla 3.7. Error absoluto entre la temperatura de estabilidad entre el modelo Pin on block y el modelo de análisis numérico	77

Tabla 3.8. Coeficiente de desgaste adhesivo a distintas cargas	77
Tabla 3.9. Desgaste lineal en los distintos modelos desarrollados en el trabajo.....	78
Tabla 3.10. Error absoluto del desgaste lineal calculado para los distintos modelos desarrollados en el trabajo.....	78
Tabla 3.11. Desgaste lineal presente en cojinetes de fricción bajo las condiciones de simulación	79
Tabla 3.12. Desgaste lineal presente en cojinetes de fricción considerando un coeficiente de desgaste adhesivo variable	79
Tabla 3.13. Desgaste lineal en configuración de contacto plano considerando un coeficiente de desgaste adhesivo variable	83

RESUMEN

En el presente estudio técnico se realizó una simulación numérica de contacto de superficies con movimiento relativo para la predicción del desgaste en cojinetes de fricción de aluminio. Primeramente, se realizó una revisión bibliográfica del desgaste de éste tipo de cojinetes y un estudio del método de elementos finitos en ANSYS Workbench. Con el fin de reducir el costo computacional se plantearon las configuraciones Pin on disc 2D y Pin on block. La simulación numérica de contacto se la realizó en el módulo Transitorio Estructural (Transient Structural) donde se puede realizar un análisis termo mecánico acoplado. Para la determinación del desgaste en el aluminio se obtuvieron las distribuciones de presiones y temperaturas tanto en estado estable como en transitorio a distintas cargas. Los resultados obtenidos fueron comparados con los resultados encontrados en documentación especializada y mediante una comparación se determinó el error correspondiente a cada tipo de análisis. Finalmente, con las temperaturas y presiones obtenidas se estableció el desgaste lineal que presentan cojinetes de fricciones de Al-6061. Se plantea al finalizar, que el presente documento presente practicidad tanto en la industria cómo en el campo de la investigación.

Palabras clave: Aluminio, Cojinetes de fricción, Desgaste, Pin on disc, Pin on block, Simulación.

ABSTRACT

In the present technical study, a numerical simulation of contact of surfaces with relative motion for the prediction of wear in journal bearings was carried out. Firstly, a literature review of the wear of this type of bearings and a study of the finite element method in ANSYS Workbench was carried out. In order to reduce the computational cost, 2D Pin on disc and Pin on block configurations were considered. The numerical simulation of contact was made in the Transient Structural module where a coupled thermo-mechanical analysis can be carried out. For the determination of the wear in the aluminum, pressure and temperatures distributions were obtained in stable state and transient state at different loads. The results were compared with the results found in specialized documentation and through a comparison the error corresponding to each type of analysis was determined. Finally, with the temperatures and pressures, the linear wear of the Al-6061 journal bearings was established. In the end, it is stated that this document presents practicality both in the industry and in the field of research.

Keywords: Aluminum, Journal bearings, Pin on disc, Pin on block, Simulation, Wear.

GLOSARIO

P = Presión

P_C = Presión de contacto

T_a = Temperatura media

T_f = Temperatura flash

σ = Esfuerzo normal

A = Área de contacto

C = Calor específico

τ = Esfuerzo cortante

ε = Deformación

ΔL = Variación de longitud

L = Longitud inicial

u = energía de deformación principal

σ_i = esfuerzo direccional

ν = Coeficiente de Poisson

E = Módulo de Young

x, y, z = Coordenadas rectangulares de un punto

k = Coeficiente de conductividad térmica

T = temperatura

\dot{q} = generación de calor por unidad de volumen

ρ = densidad

S = distancia de deslizamiento

t = tiempo

E_{en} = Energía de entrada

E_{sal} = Energía de salida

E_{atm} = Energía de almacenamiento

E_{cond} = Energía por conducción de calor

E_{conv} = Energía por convección

q_C = Flujo de calor al cuerpo de menor dureza

q = calor generado en la interfaz de contacto

μ = coeficiente de fricción

W = carga normal

h = Coeficiente de convección

v = Velocidad de deslizamiento

q_C = Flujo de calor al cuerpo de menor dureza
 q_H = Flujo de calor al cuerpo de mayor dureza
 K = Factor de desgaste del material
 K_a = Coeficiente de desgaste adhesivo
 H = dureza del material
 f_1 = factor relacionado al tipo de movimiento u operación
 f_2 = factor relacionado a factores ambientales o de limpieza
 ∇T = Campo de Temperaturas.
 F_o = Número de Fourier
 α = Difusividad térmica
 T_i = Temperatura instantánea
 T_∞ = Temperatura ambiente
 μ_s = coeficiente de fricción
 μ_d = coeficiente dinámico de fricción
 β = coeficiente exponencial de decaimiento
 K_O = Matriz de rigidez
 D_O = Matriz de deformación
 F_O = Matriz de fuerza
 Δ = Variación
 F_R = Factor Residual
 e = Error
 w = Desgaste lineal

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE CONTACTO ENTRE SUPERFICIES CON MOVIMIENTO RELATIVO PARA PREDICCIÓN DE DESGASTE EN COJINETES DE FRICCIÓN DE ALUMINIO

INTRODUCCIÓN

El comportamiento de superficies en contacto bajo movimiento relativo se encuentra presente en cualquier actividad humana. Debido a ello, a lo largo de la historia ha impulsado al ser humano a buscar conocer más sobre el contacto de superficies. La compleja naturaleza del contacto, impide una predicción exacta y generalizada del fenómeno, generando un alto grado de incertidumbre. Al estar el fenómeno de contacto superficial presente en toda aplicación mecánica, su comprensión implica un mejor control del desgaste, reducción de costes de mantenimiento, desarrollo de nuevos materiales [1]. Lo expuesto previamente muestra las razones por las cuales la investigación en Tribología es una línea de intensa actividad en Universidades y Centros de Investigación a nivel mundial.

El estudio del fenómeno de contacto superficial es responsabilidad de la rama de la ciencia, conocida desde finales del siglo XX como tribología. Previo a la tribología, la ingeniería únicamente dirigía su estudio a lubricación. La misma no se enfocaba directamente en disminuir el fenómeno de fricción y desgaste. En lugar de esto se buscaba encontrar barreras que evitaran el contacto entre superficies con el fin de alargar el ciclo de elementos mecánicos [2].

La naturaleza del contacto superficial bajo movimiento relativo involucra variables mecánicas, térmicas y cinéticas. Cuya influencia varía dependiendo de la configuración del contacto. Esta variabilidad representa para la ciencia y la ingeniería, la complejidad de plantear un modelo matemático, que abarque de manera general este fenómeno [3]. Se realiza entonces un modelo analítico o numérico que permita describir un comportamiento particular. La validación de los modelos se efectúa mediante la comparación con resultados experimentales, que confirmen su exactitud en el mundo real [3].

Dentro de estas variables, se ha planteado varias estimaciones analíticas y numéricas para modelar la presión y temperatura en la interfaz de contacto. Los métodos numéricos tienen buenas aproximaciones con los resultados teóricos validados por transferencia de calor. Las discrepancias existentes a este método se deben a que se asume que la fricción se

disipa en su totalidad en forma de calor. Los resultados obtenidos tienen una amplia aplicabilidad en materiales metálicos, cerámicos y poliméricos [4].

El planteamiento de modelos analíticos que describan el contacto superficial inicia con los parámetros de contacto de Hertz, en su teoría de contacto. La misma se enfoca en el estudio de contacto entre sólidos elásticos axi-simétricos bajo carga [5]. En los años treinta se presentan nuevos aportes al contacto de superficies, siendo el más relevante el trabajo de Bowden y Ridler "Propiedades físicas de las superficies" que planteaba la importancia de la rugosidad superficial [6].

De este planteamiento surgieron otros como el artículo de Jaeger "Movimiento de fuentes de calor y temperatura en superficies deslizantes" publicado en 1942. Se caracteriza por describir el fenómeno de contacto de manera analítica considerando únicamente variables térmicas y cinemáticas [3].

En 1957 se presenta el libro "Deformación elástica y las leyes de fricción". La contribución de Archard consiste en la conclusión de que el área de contacto es proporcional a la fuerza normal entre superficies elásticas rugosas [7]. En 1975 Bush plantea la importancia de considerar asperezas en la interfaz de contacto en superficies rugosas, mediante el modelo de procesamiento Random [8].

Finalmente, en el año 2002 Persson complementa los estudios referidos y señalan que en micro-contacto la carga es un parámetro de poca relevancia [9].

Con el desarrollo de la capacidad de cálculo en la década de 1970, se generaliza el uso de ordenadores con programas específicos para planear y resolver modelos numéricos. En los trabajos más representativos del nuevo siglo se destacan el de Kogut y Etsion [10], Jackson y Green [11], quienes utilizan el programa comercial ANSYS para modelamientos de esferas deformables en contacto con superficies rígidas. Los resultados obtenidos de dichos estudios fueron muy cercanos a los obtenidos experimentalmente demostrando la validez del MEF para contacto y volviéndose para el nuevo siglo un referente para la simulación.

Dentro de esta línea de estudio, el presente documento plantea simular y modelar matemáticamente el comportamiento y desgaste en cojinetes de fricción de aleación de aluminio utilizados con mayor frecuencia en la industria. La validación de los modelos numérico demostrará la utilidad y aplicación práctica del MEF tanto en beneficios de la ciencia como la industria.

Pregunta de Investigación

¿Es posible alcanzar un modelo numérico con el uso de un software comercial, que se aproxime y conserve la tendencia respecto a resultados experimentales en superficies de contacto en cojinetes de fricción de aleación de aluminio?

Objetivo general

Simular correctamente las distribuciones de variables termo-mecánicas en el contacto entre superficies en cojinetes de fricción de aleación de aluminio.

Objetivos específicos

- Modelizar el contacto superficial con el código comercial Ansys.
- Validar modelos de fricción en interfases de contacto sólidas.
- Validar modelos de comportamiento termo-mecánico de materiales en interfase de contacto.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Cojinete de fricción

Los cojinetes, elementos de sacrificio cuyo objetivo es aumentar la vida útil de una maquinaria soportando solicitudes de carga y/o velocidades transmitidas desde un eje de rotación reduciendo así la fricción sobre los elementos de contacto prolongando la vida útil de los mismos [12].

Los cojinetes de fricción disponen una clasificación en base al tipo de lubricación que disponga.

- Clase I: Cojinete con lubricación permanente proveniente de una fuente externa. Se caracteriza por ser fabricado con materiales de fácil disipación de calor.
- Clase II: Cojinete con una capa de lubricante abundante en la zona de contacto impidiendo así un contacto sólido-sólido.
- Clase III: Consiste en rodamientos sin lubricación. Los materiales del cojinete son de baja fricción y en ocasiones consisten en materiales auto-lubricantes. Esta mención se da a materiales de alta porosidad (20 a 25% en volumen) que dificulta el aumento de temperatura en el elemento [13]. (ver Figura 1.1.)

Los cojinetes de fricción de aluminio son de gran incidencia en la industria automotriz, en gran medida la razón consiste por su alta resistencia a la corrosión, alta conductividad térmica y resistencia a la fatiga. Su uso específico en motores es cómo elemento de contacto entre la biela y el cigüeñal. Debido a ello se debe considerar una gran solicitud de cargas, grandes esfuerzos flectores, altas temperaturas de operación y un desgaste continuo considerable [14].



Figura 1.1. Cojinete de fricción de Aluminio.
(Fuente: [14])

1.1.1. Materiales

En el presente documento se analizará las aleaciones de Al con mayor incidencia en cojinetes de fricción.

El aluminio es un material de alta versatilidad, económico y ligero. Debido a estos motivos las aleaciones de Al son el segundo grupo de aleaciones estructurales de mayor uso en el mundo después del acero [15].

Dependiendo del material aleante las propiedades mecánicas de la matriz de Al se verán modificadas de manera favorable para el cojinete.

Dentro de los principales materiales aleados encontrados en cojinetes de fricción de Al son Sn, Si y Cu.

La aleación Al-Sn produce en el Al una mejora de propiedades anti-fricción [14].

Al analizar la aleación Al-Si aumenta la dureza y rigidez del material reduciendo el desgaste y aumentando su capacidad para solicitud de cargas [16].

La aleación Al-Mg presenta un cambio en propiedades y permite una mayor resistencia a la corrosión en especial en ambientes de considerable concentración de sal [15].

La aleación Al-Pb presenta un aumento en el punto de fusión, permitiendo operar a mayores temperaturas [16].

Dentro de los cojinetes de fricción secos, se presenta una asignación o tipo en base a la disposición de capas, siendo:

Cojinete mono-metal: Consiste únicamente en una matriz de aluminio aleada a Si

Cojinete bi-metal: Cojinete de dos capas; un acero de refuerzo en contacto al soporte y una capa interna de Al.

Cojinete tri-metal: Consiste en un cojinete de tres capas; capa de refuerzo (acero) aplicado en la zona exterior como soporte. Una capa dura intermedia de aleación de Al y una capa superior de baja fricción de aleación de Al con materiales como Zn, Sn. Esta última capa puede subdividirse hasta en 5 capas con la finalidad de reducir al máximo el efecto de la fricción y corrosión [17]. (ver Figura 1.2.)

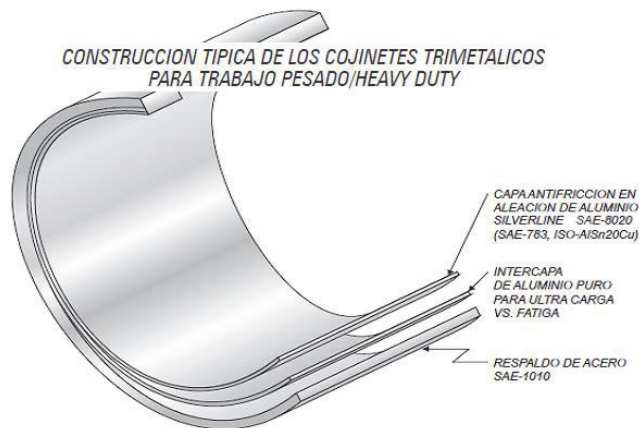


Figura 1.2. Composición de un cojinete tri-metálico.
(Fuente: [14])

1.1.2. Movimiento relativo

El sistema cojinete de fricción-eje presenta una holgura que producirá en el movimiento una posición relativa del uno respecto al otro. Las zonas de contacto que existirán entre ambos elementos será aproximadamente lineal y para definir la posición relativa existen dos parámetros esenciales: excentricidad y ángulo de contacto.

Excentricidad: Distancia entre el centro del eje y el centro del cojinete. Se considera un parámetro elemental para el análisis de la lubricación hidrodinámica.

Ángulo de contacto: Ángulo entre el centro del eje y la zona de contacto entre el cojinete y el eje [12].

1.1.3. Criterios de desempeño

Se debe considerar ciertas variables para modelar de manera adecuada el comportamiento de un cojinete de fricción. Dentro de dichas variables cabe destacar:

- **Fuerza:** Consistirá en la carga asociada al movimiento del eje. Debido al movimiento relativo se presentará esfuerzos de tensión y compresión en el área de contacto y esfuerzos cortantes en las capas internas del contacto. Las cargas mencionadas producirán en los cojinetes de fricción (debido a las no-linealidades asociadas al material) deformaciones permanentes imposibilitando por lo tanto valores constantes del módulo de Young [18].
- **Presión:** La variable presión es un parámetro indicador del rango de operación en un cojinete de fricción. Se presentará una presión distribuida a través de la

superficie de contacto y su valor más representativo para el diseño consiste en la presión máxima.

- Velocidad: El régimen de rotación del eje consistirá en un factor de relevancia en el comportamiento de un cojinete de fricción. Presenta una dependencia junto con el parámetro presión limitando mutuamente la zona de operación del cojinete de fricción. En el diseño se vuelve de interés determinar la velocidad máxima.
- Factores PV (presión- velocidad): A un determinado coeficiente de fricción las variables presión y velocidad permitirán medir en cojinetes de fricción secos el calor generado en la superficie de contacto, el aumento de temperatura relacionado y la tasa de desgaste asociada. Los límites de velocidad y presión que confinarán el funcionamiento del cojinete, fueron obtenidos de un punto mínimo permisible para la disipación de calor y máximo de temperatura en la superficie de contacto. Más allá de estos puntos la tasa de desgaste incrementa rápidamente arriesgando la integridad del elemento [18].

Para fines prácticos se suele crear un diagrama logarítmico P vs V a una tasa fija de desgaste (ver Figura 1.3), definiendo el rango de operación para un cojinete de fricción. Cerca de la zona media de la curva se observa un comportamiento lineal, mientras que en los límites de la curva se observa la influencia del calor y temperatura en el cojinete produciendo que se pierda la linealidad mencionada.

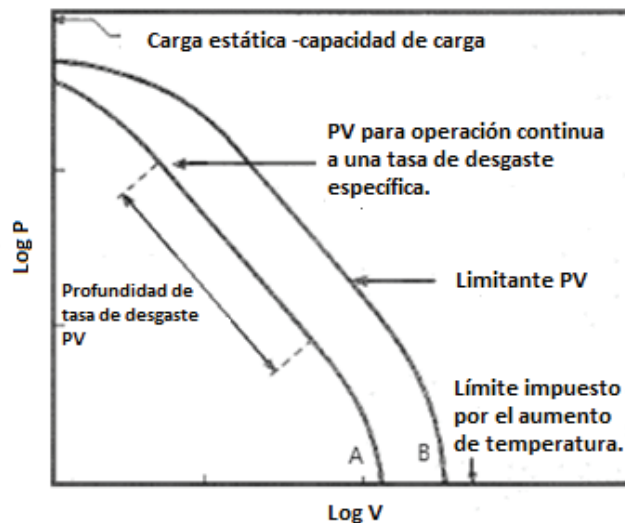


Figura 1.3. Diagrama P vs V en cojinetes de fricción secos.
(Fuente: [18]. Editado por autores)

- Temperatura: Parámetro de mayor influencia dentro del diagrama velocidad – presión. La temperatura está compuesta por dos componentes de contacto; Temperatura media (T_a): Temperatura promedio generada en la superficie de contacto, depende de la geometría y materiales del contacto. Temperatura flash (T_f): Temperatura generada en asperezas [18].

1.2. Geometría

El modelo de contacto cojinete de fricción-muñón representa el modelo geométrico del fenómeno de análisis. Sin embargo, debido a limitaciones experimentales se han utilizado a lo largo del tiempo otros modelos geométricos para predecir el contacto.

Dentro de las variables geométricas existentes, el modelo Pin on disc presenta resultados favorables para predecir el contacto en cojinetes secos [16]. Al paso de los años los distintos centros de investigación y organismos estatales han normado el uso de éste modelo geométrico para determinar variables de contacto y desgaste pues permite la extrapolación de las mismas a distintos materiales. En base a este enunciado el presente documento utilizará la configuración Pin on disc para describir el fenómeno de contacto existente en cojinetes de fricción.

1.2.1. Pin on disc

En la Figura 1.4 se muestra la configuración de contacto plano entre la cara transversal de un disco de elevada dureza y un pin de sacrificio. En éste caso el pin será el material a analizar. Permanecerá estático y bajo una determinada carga se analizarán el desgaste, la presión y las variables térmicas.

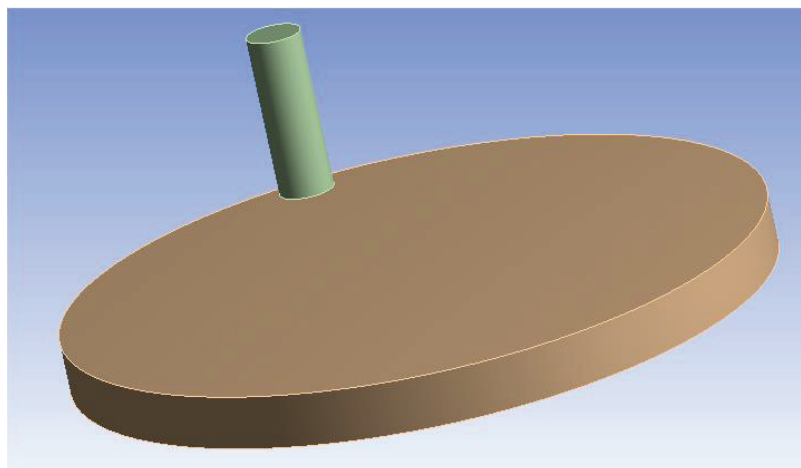


Figura 1.4. Configuración de contacto Pin on disc
(Fuente: Propia)

1.3. Análisis estructural

El análisis estructural es el proceso por el cual se calculan y determinan los efectos de las cargas y fuerzas en una estructura, edificio u objeto, utilizando las ecuaciones de la resistencia de materiales para obtener esfuerzos internos, deformaciones y tensiones presentes en la estructura.

1.3.1. Cargas

Un cuerpo puede estar sometido a dos tipos de cargas, las fuerzas de superficie o las fuerzas de cuerpo.

Fuerzas de superficie: Son causadas por el contacto directo de un cuerpo con la superficie de otro, esas fuerzas están distribuidas sobre el área de contacto entre los cuerpos. Si ésta área es pequeña en comparación con el área de la superficie total del cuerpo, entonces ésta fuerza puede idealizarse como una sola fuerza concentrada [19].

Fuerzas de cuerpo: Una fuerza de cuerpo se desarrolla cuando un cuerpo ejerce una fuerza sobre otro cuerpo sin contacto físico directo entre éstos. Un ejemplo es la fuerza gravitacional que actúa sobre el dentro de gravedad del cuerpo [19].

1.3.2. Esfuerzos

La fuerza por unidad de área, o la intensidad de las fuerzas distribuidas a través de una sección dada, se llama esfuerzo. El esfuerzo es un elemento con área transversal A sometido a una carga axial W .

$$\sigma = \frac{W}{A}$$

Ecuación 1.1. Esfuerzo normal.

Para indicar un esfuerzo de tensión se empleará un signo positivo, y para un esfuerzo de compresión se utilizará un signo negativo.

La pendiente de la gráfica de deformación contra esfuerzos elásticos se conoce como módulo de Young o de elasticidad.

1.3.2.1. Esfuerzo normal

Los esfuerzos normales axiales por lo general ocurren en elementos como cables, barras o columnas sometidos a fuerzas axiales (que actúan a lo largo de su propio eje), las cuales pueden ser de tensión o de compresión. Además de tener resistencia, los materiales deben tener rigidez, es decir tener capacidad de oponerse a las deformaciones puesto que una estructura demasiado deformable puede llegar a ver comprometida su funcionalidad y obviamente su estética. [19]

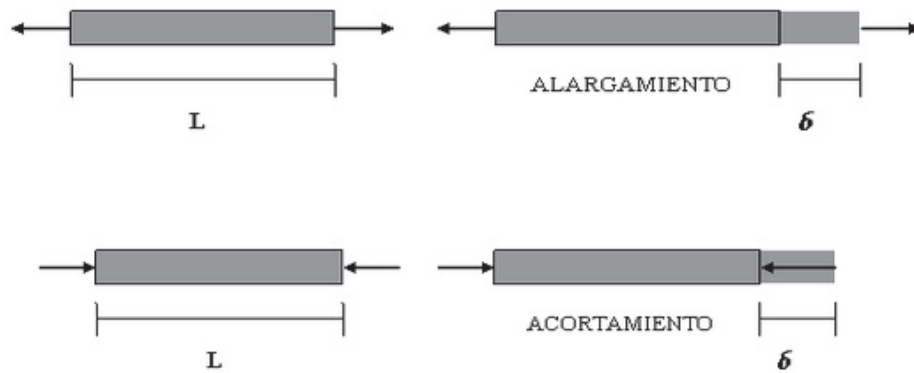


Figura 1.5. Esfuerzo Normal.
(Fuente: [20])

1.3.2.2. Esfuerzo cortante

Las fuerzas aplicadas a un elemento estructural pueden inducir un efecto de deslizamiento de una parte del mismo con respecto a otra. En este caso, sobre el área de deslizamiento se produce un esfuerzo cortante, tangencial, o de cizalladura. Análogamente a lo que sucede con el esfuerzo normal, el esfuerzo cortante se define como la relación entre la fuerza y el área a través de la cual se produce el deslizamiento, donde la fuerza es paralela al área [19].

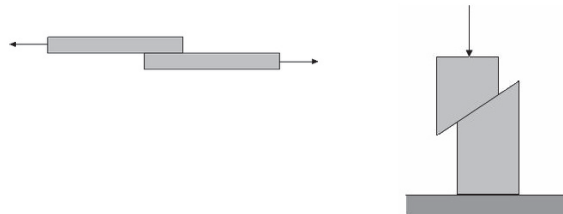


Figura 1.6 Esfuerzo Cortante.
(Fuente: [20])

El esfuerzo cortante se calcula:

$$\tau = \frac{W}{A}$$

Ecuación 1.2. Esfuerzo cortante.

1.3.3. Deformaciones

La deformación se define como el cambio en la forma y el tamaño de un cuerpo cuando se le aplica una fuerza, estos cambios pueden ser visibles o casi imperceptibles. La deformación de un cuerpo también puede ocurrir cuando cambia su temperatura. En general, la deformación de un cuerpo no será uniforme en todo su volumen, por lo que el cambio en la geometría de cualquier segmento de línea dentro del cuerpo puede variar de manera considerable a lo largo de su longitud.

La deformación unitaria se define como el cambio de dimensión por unidad de longitud [20].

$$\varepsilon = \frac{\delta}{L}$$

Ecuación 1.3. Deformación

Las propiedades del material serán ingresadas dependiendo del tipo de análisis que se vaya a realizar, para un análisis estructural dentro de las propiedades más comunes se tienen: la densidad, el Módulo de Young, el coeficiente de Poisson, etc. Las propiedades utilizadas en cada análisis dependerán fundamentalmente de la influencia que éstas tengan en el comportamiento del sistema.

1.3.5. Teoría de Von Misses o Von Misses- Hencky

La teoría de energía de distorsión establece que se presentará una falla por fluencia cuando la energía de deformación total por unidad de volumen total es superior a la resistencia a la fluencia del material. Se define entonces en la teoría las ecuaciones:

$$u = \frac{1}{2E} [\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - 2\nu(\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x)]$$

Ecuación 1.4. Energía de deformación principal en función de esfuerzos direccionales.

$$\sigma' = \frac{1}{2E} [\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 - 2\nu(\sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x)]$$

Ecuación 1.5. Esfuerzo plano.

1.4. Análisis térmico

Las variables térmicas en el contacto superficial presentan una importancia considerable en el análisis. La distribución de temperaturas en las configuraciones de contacto depende de la disposición geométrica, propiedades de los materiales, disposición friccional entre cuerpos y condiciones operacionales [21].

Los primeros trabajos plantearon la generación de calor en la interfaz de contacto para la distribución de temperaturas en un cuerpo. Dicha generación tenía consideración de un cuerpo semi-infinito sin disipación de calor hacia el ambiente, únicamente se transfería a los cuerpos adyacentes.

A lo largo de los años los modelos térmicos de contacto entre sólidos han generado mejores resultados en relación a los obtenidos experimentalmente.

1.4.1. Distribución de Temperaturas en sólidos

En el contacto superficial las variables térmicas son de gran relevancia, resultando indispensable analizar la distribución de temperaturas en sólidos.

La temperatura domina los mecanismos de desgaste en superficies en contacto con movimiento relativo. Se han realizado estimaciones analíticas y numéricas para estimar las temperaturas en interface de contacto. Los métodos numéricos para el análisis térmico de superficies en contacto tienen buenas aproximaciones con los resultados teóricos validados por transferencia de calor. Las discrepancias existentes en este método se deben a que se asume que la fricción se disipa en su totalidad en forma de calor. Los resultados obtenidos tienen una amplia aplicabilidad en materiales metálicos, cerámicos y poliméricos. La ecuación general de difusión de calor, permite un análisis de conservación de la energía en donde se considera los procesos de energía más relevantes. Involucrando la transferencia de calor por conducción, generación de energía térmica y almacenamiento de energía térmica [22] (1).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = \rho C \frac{dT}{dt}$$

Ecuación 1.6. Ecuación de difusión de calor.

La ecuación general de difusión de calor (1) permite obtener una distribución de temperaturas en función del tiempo, posición, fuente de calor. Además las propiedades del material influirán en el análisis [22].

1.4.2. Generación de calor por fricción

En el contacto superficial entre dos cuerpos se generará calor en la interfaz de contacto. Este calor generado se asume constante por unidad de tiempo. Se suelen despreciar las pérdidas de calor externas, produciendo que todo el calor generado se transferirá a los cuerpos en contacto [3].

Mediante el estudio y experimentación, se definió un modelo analítico inicial para la generación de calor en una superficie de contacto.

$$q = \mu * \frac{W}{A} * V$$

Ecuación 1.7. Ecuación de generación de calor por fricción.

Este modelo matemático plantea la generación de calor en función de variables presentes en todo tipo de contacto, sin embargo, su solución dependerá en gran medida de la superficie de contacto. Años posteriores se modifica la ecuación y plantea:

$$q = \mu * P * V$$

Ecuación 1.8. Ecuación de generación de calor por fricción bajo una presión.

Jagger define después que el calor generado en la interfaz de contacto se transfiere completamente a los cuerpos en movimiento relativo mediante un flujo de calor constante hacia ambos.

$$q = q_C + q_H$$

Ecuación 1.9. Calor transferido a los cuerpos en contacto.

El factor que determinará la distribución de calor hacia los cuerpos en contacto puede ser obtenido mediante experimentación [21].

1.4.3. Ecuación de Conducción

Planteada por Fourier mediante experimentación, define la relación entre el gradiente de temperaturas, el área de contacto y el flujo de calor a través del sólido [23].

$$q = -kA\nabla T$$

Ecuación 1.10. Conducción de Calor de Fourier.

1.4.4. Ecuación de Convección

La transferencia de calor por convección se produce tanto por el movimiento molecular, cómo el movimiento macroscópico de fluido. El fenómeno físico fue caracterizado por Newton y en él relaciona la transferencia de calor por unidad de área con la diferencia de temperaturas entre la superficie de un sólido y la temperatura del medio. La igualdad se logra al multiplicar la diferencia de temperaturas por un coeficiente llamado coeficiente de transferencia de calor por convección. El coeficiente de calor por convección está ligado a la velocidad promedio del fluido circundante, la densidad, viscosidad y propiedades térmicas del mismo [23].

$$q = Ah\Delta T$$

Ecuación 1.11. Ley de enfriamiento de Newton.

1.4.5. Sólido Semi-infinito

El modelo de sólido semi-infinito es muy útil en el análisis de transferencia de calor en estado transitorio de problemas unidireccionales donde se requiere analizar la transferencia de calor cerca de la superficie. Éste modelo tiene una muy buena aproximación en el análisis transitorio de sistemas que tienen números de Fourier menores a 0.2.

$$Fo = \frac{\alpha t}{L^2} \leq 0.2$$

Ecuación 1.12. Número de Fourier.

Como se observa en la Figura 1.7 existen tres casos para la solución del sólido semi-infinito dependiendo de las condiciones superficiales a las que se encuentre expuesto.

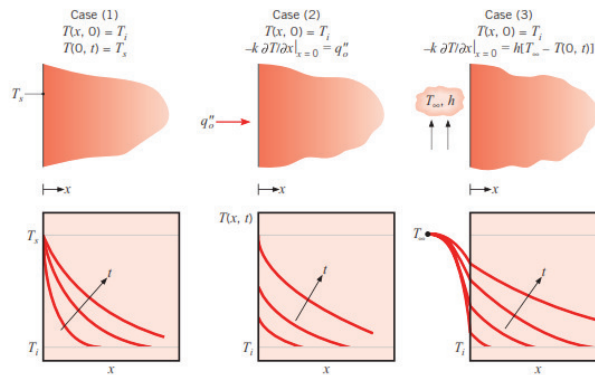


Figura 1.7. Distribución de temperatura transitoria de un sólido semi-infinito para tres condiciones superficiales distintas.
(Fuente: [23])

La primera solución toma en cuenta una temperatura superficial constante, la segunda para un flujo de calor constante y la tercera para una superficie expuesta a convección.

Dentro del presente estudio para tiempos iniciales se considera a la solución 2 cómo una aproximación válida por las condiciones del problema.

$$T(x, t) - T_i = \frac{2 q_0'' \left(\frac{\alpha t}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}}{k} \exp\left(\frac{-x^2}{4\alpha t}\right) - \frac{q_0'' x}{k} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{\alpha t}}\right)$$

Ecuación 1.13. Ecuación sólido semi-infinito. Caso 2.

1.4.6. Aceleración para alcanzar la estabilidad térmica

Debido a limitaciones relacionadas al procesamiento de un computador, alcanzar el estado estable dentro del método de elementos finitos resulta imposible. Para poder obtener en un bajo tiempo de simulación la estabilidad térmica se plantea la aceleración de la misma mediante la reducción del calor específico a valores cercanos a cero. Permitiendo reducir la energía que almacena el cuerpo en igual medida [24].

1.5. Tribología

La tribología es la rama de la ciencia y tecnología que estudia la interacción de superficies en movimiento relativo. Estudiará tres factores de contacto: fricción, desgaste y lubricación.

1.5.1. Fricción

La fricción es una fuerza de resistencia al deslizamiento. Resulta proporcional a la fuerza normal al cuerpo y se relaciona al coeficiente de fricción (ver Figura 1.8.). El coeficiente de fricción que relaciona a la normal con la fuerza de rozamiento o fricción presenta dos comportamientos; uno en estado estático y otro en estado dinámico [25].

Rozamiento seco: éste se presenta cuando las superficies no lubricadas de dos sólidos en contacto se deslizan una con respecto a la otra o están a punto de deslizarse. Se desarrolla entonces una de rozamiento tangente a las superficies de contacto, tanto durante el tiempo que transcurre hasta el movimiento inminente como cuando ya tiene lugar el deslizamiento [26].

El rozamiento o fricción genera calor que a su vez se traduce dentro de la interfaz de contacto cómo un aumento de temperatura.

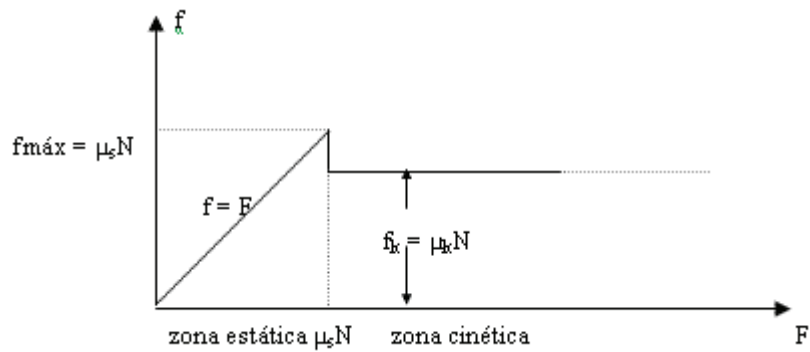


Figura 1.8. Fuerza aplicada vs fuerza de rozamiento.
(Fuente: [26])

1.5.2. Desgaste

El desgaste es el deterioro progresivo de una superficie sólida; la manera de remover un sólido se puede dar solamente por tres formas: por fusión de la superficie, por disolución química y por separación física de los átomos de la superficie. La última forma se da por interacción con movimiento relativo entre dos superficies, presentando la degradación debido a la fuerza de fricción. [12]

Los cambios de generación de partículas están influenciados por varios factores como la naturaleza y la cantidad de partículas retenidas, la pérdida de partículas depende de la forma de las superficies deslizantes, el ciclo de trabajo, las vibraciones, y muchos más factores.

Dentro del desgaste por separación física de los átomos existen múltiples mecanismos de desgaste, dentro de ellos están:

Desgaste adhesivo: Debido a la rugosidad superficial el área de contacto entre dos superficies se ve limitada a los puntos de contacto más prominentes entre ambas, implicando con ello la presencia de esfuerzos locales superiores a los de un contacto uniforme. Estos esfuerzos deformarán plásticamente el material seguido de una transferencia de masa, hacia la interfaz de contacto y entre los materiales.

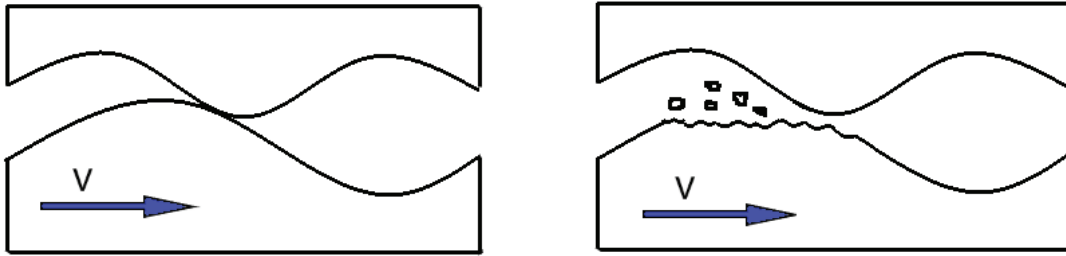


Figura 1.9. Secuencia de etapas del desgaste adhesivo dentro de una interfaz de contacto.
(Fuente: Propia)

Desgaste abrasivo: Desgaste ocasionado por partículas de alta dureza localizada en la interfaz de contacto entre los materiales.

Fatiga superficial: Ocasionado por esfuerzos Hertzianos, implicará el desarrollo de esfuerzos cortantes sub-superficiales cíclicos, que podrían ocasionar grietas de desgaste en el material.

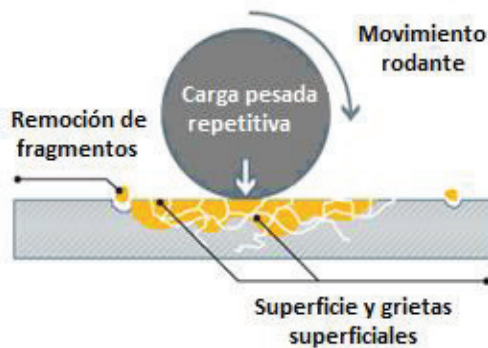


Figura 1.10. Fatiga superficial.
(Fuente: [26]. Editado por autores)

1.5.2.1. Desgaste lineal deslizante

El desgaste lineal deslizante es un fenómeno presente tanto en elementos de revolución como de movimiento lineal. Consiste en la cantidad de volumen de material erosionado por el movimiento relativo por unidad de área. Se expresa mediante la Ecuación 1.14.

$$w = KP_c vt$$

Ecuación 1.14. Volumen de material erosionado por unidad de área o desgaste lineal.

Shigley plantea una modificación para la ecuación de desgaste lineal que considera el tipo de movimiento, velocidad, condiciones ambientales y temperatura [12].

$$w = f_1 f_2 K P_c vt$$

Ecuación 1.15. Desgaste lineal modificado.

$$w = f_1 f_2 \frac{K_a}{H} P_c vt$$

Ecuación 1.16. Ley de Archard modificada [35].

1.6. Contacto

1.6.1. Contacto de Hertz

La teoría de contacto de Hertz estudia los esfuerzos de contacto presentes en elementos que transmiten cargas a través de superficies que presentan contactos puntuales como en dos superficies esféricas o a lo largo de una línea como en dos superficies cilíndricas. Si los elementos fueran totalmente rígidos, las áreas de contacto permanecerían nulas y los esfuerzos que aparecerían serían infinitos. Debido a la elasticidad de los materiales, éstos se deforman bajo la acción de las cargas, produciéndose áreas finitas de contacto. Debido a que estas áreas son muy pequeñas, aparecen grandes esfuerzos.

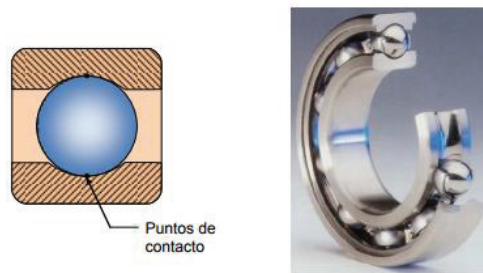


Figura 1.11. Contacto de Hertz entre dos superficies cilíndricas.
(Fuente: [27])

Por lo tanto, a pesar de que los elementos sometidos a esfuerzos de contacto puedan tener suficiente resistencia mecánica de volumen, tienden a fallar en la pequeña zona de contacto, en donde los esfuerzos son mayores.

Los esfuerzos de contacto pueden ocurrir entre dos elementos convexos, uno convexo y uno cóncavo, y uno convexo y uno plano.

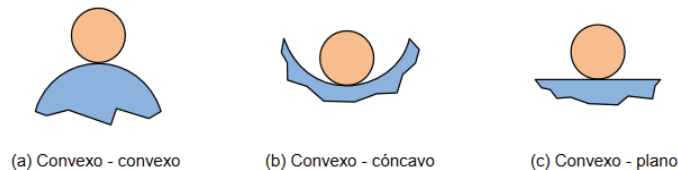


Figura 1.12. Tipos de contacto de Hertz.
(Fuente: [27])

Los problemas de contacto en la teoría de la elasticidad se resuelven bajo las siguientes condiciones:

1. Los materiales de los elementos contiguos son homogéneos e isotrópicos.

2. El área de contacto es muy pequeña comparada con la superficie de los cuerpos que se tocan.
3. Los esfuerzos efectivos están en dirección normal a la superficie de contacto de ambos cuerpos.
4. Las cargas aplicadas sobre los cuerpos crean en la zona de contacto sólo deformaciones elásticas sujetas a la ley de Hooke (no se sobrepasa el límite de proporcionalidad).

Dentro de los tiempos iniciales en el estudio del contacto entre sólidos se debe considerar que la presencia de partículas deslizantes en la interfaz de contacto tiende a ser mínima, debido al tiempo de exposición.

El contacto es un fenómeno no lineal complejo el cual no solo incluye un cambio en el estado del material sino también en el calor o electricidad.

Una superficie sólida, o más exactamente una interfaz sólida-gaseosa o sólida-líquida, tiene una estructura y propiedades complejas dependiendo sobretodo de la naturaleza de los sólidos, el método de preparación de las superficies, y la interacción entre la superficie y el ambiente. Las propiedades de las superficies sólidas son cruciales para la interacción superficial porque éstas afectan al área real de contacto, la fricción, el desgaste, y la lubricación. Además, de las funciones tribológicas las propiedades superficiales son importantes en otras aplicaciones tales como ópticas, eléctricas y rendimiento térmico, pintura, y apariencia. [27]

1.6.2. Modelo de fricción de Coulomb

El modelo de fricción de Coulomb plantea que la fricción entre cuerpos dependerá del coeficiente de fricción instantáneo. El coeficiente de fricción instantáneo dependerá de variables empíricas cómo determinísticas. La Ecuación 1.14 define el modelo.

$$\mu = \mu_d + (\mu_s - \mu_d)e^{-\beta v}$$

Ecuación 1.17. Coeficiente de fricción instantáneo.

1.7. Método de elementos finitos

Los elementos finitos consisten en un método numérico que permite la discretización de ecuaciones diferenciales que caracterizan fenómenos físicos reales.

La discretización implicará la representación de una variable continua como una variable finita. El proceso permitirá realizar la resolución de modelos matemáticos de manera numérica sin una resolución analítica.

ANSYS es un software CAE (Computer Aided Engineering), que permite el diseño, simulación y análisis de modelos numéricos donde intervienen múltiples fenómenos físicos.

1.7.1. Módulo Transitorio Estructural (Transient Structural)

El módulo Transitorio Estructural (Transient Structural) permite la evaluación dinámica de cargas dependientes del tiempo sobre una estructura o cuerpo. El uso del módulo dependerá si la escala de tiempo de las cargas se ve considerablemente influenciada por la inercia y amortiguamiento.

Para el manejo y evaluación de estructuras, ANSYS utiliza la ecuación matricial:

$$[K_D][D] = [F]$$

Ecuación 1.18. Ecuación matricial Fuerza y deformación.

Que consiste en una linealización donde la matriz de fuerza se relaciona con la matriz de deformación mediante una matriz de constantes llamada rigidez. La misma depende de las propiedades del material [28].

El presente trabajo fue realizado en el módulo transitorio estructural. La aplicación del módulo radica en la importancia de los efectos inerciales y de amortiguamiento del contacto cojinete-eje. Debido a la generación de calor presente en la interfaz de contacto que producirá una distribución de temperaturas variable en el tiempo se debe utilizar una geometría en 3D para el modelado de generación [3].

1.7.2. Mallado

La geometría de la pieza, sometida a cargas y restricciones, se subdivide en partes más pequeñas, conocidas como “elementos”, que representan el dominio continuo del problema. La división de la geometría en pequeños elementos resuelve un problema complejo, al subdividirlo en problemas más simples, lo que permite a la computadora hacer las tareas con eficiencia.

Los elementos finitos están conectados entre sí por puntos, que se llaman nodos o puntos nodales. Al conjunto de todos estos ítems – elementos y nodos – se lo denomina malla. Debido a las subdivisiones de la geometría, las ecuaciones matemáticas que rigen el comportamiento físico no se resolverán de una manera exacta, sino aproximada por este método numérico. La precisión del Método de Elementos Finitos depende de la cantidad

de nodos y elementos, del tamaño y de los tipos de elementos de la malla. Por lo tanto, cuanto menor sea el tamaño y mayor el número de elementos en una malla, más precisos serán los resultados del análisis. Se debe considerar que a partir de un tamaño de elementos óptimo los resultados en la simulación no se verán afectados significativamente [29].

1.7.2.1. Elemento de Malla

Por malla estructurada se entiende toda discretización cuya conectividad sigue un patrón reticular. Por esta razón, en este tipo de mallas se utilizan fundamentalmente elementos cuadriláteros (2D), o hexaédricos (3D). [29]

1.7.2.2. Calidad de Malla

La calidad de la malla tiene un papel fundamental en la precisión de los resultados. Ansys utiliza distintas verificaciones para medir la calidad de los elementos en una malla tales como:

Relación de Aspecto (Aspect Ratio)

Para una malla sólida, la precisión numérica se logra mejor mediante una malla con elementos tetraédricos perfectos y uniformes cuyas aristas sean de igual longitud. Para una geometría general, no es posible crear una malla de elementos tetraédricos perfectos. Debido a las aristas pequeñas, la geometría curva, las operaciones lámina y las aristas vivas, algunos de los elementos generados pueden tener algunas aristas mucho más largas que otras. Cuando las aristas de un elemento tienen una notable diferencia en su longitud, la precisión de los resultados se ve perjudicada.

La relación de aspecto de un elemento tetraédrico perfecto se utiliza como la base para el cálculo de relaciones de aspecto de otros elementos. La relación de aspecto de un elemento se define como la relación entre la arista más larga y la normal más corta colocadas desde un vértice a la cara opuesta normalizada con respecto a un tetraedro perfecto. Por definición, la relación de aspecto de un elemento tetraédrico perfecto es 1,0. La verificación de relación de aspecto supone que las aristas rectas se conectan con los cuatro nodos angulares. Dicha verificación es utilizada automáticamente por el programa para comprobar la calidad de la malla. [30]

Oblicuidad (Skewness)

La oblicuidad es una de las principales medidas de calidad para una malla, ésta indica cuan cerca una cara o un elemento está en alcanzar una forma ideal (equilateral o equiangular). [30]

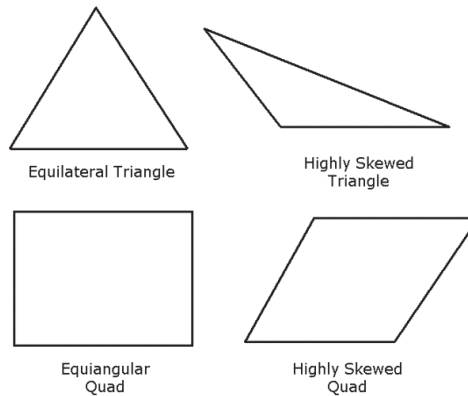


Figura 1.13. Oblicuidad en elementos hexaédricos y tetraédricos.
(Fuente: [30])

La Tabla 1.1 muestra el rango de oblicuidad y sus correspondientes criterios de aceptación de malla:

Tabla 1.1. Valores de calidad de malla según el criterio de oblicuidad.

Valor de oblicuidad	Calidad de la malla
1	Deforme
0.9 - <1	Mala
0.75 - 0.9	Pobre
0.5 - 0.75	Justa
0.25 - 0.5	Buena
>0 - 0.25	Excelente
0	Equilateral

(Fuente: [30])

Calidad Ortogonal (Orthogonal Quality)

El rango para medir la calidad de acuerdo a la ortogonalidad va desde 0 hasta 1, donde 0 es la peor calidad y 1 la mejor.

La calidad ortogonal en una celda toma en cuenta el vector normal a la celda, el vector desde el centroide de la celda hasta el centroide de sus celdas adyacentes y el vector desde el centroide de la celda hacia cada una de las caras [30].

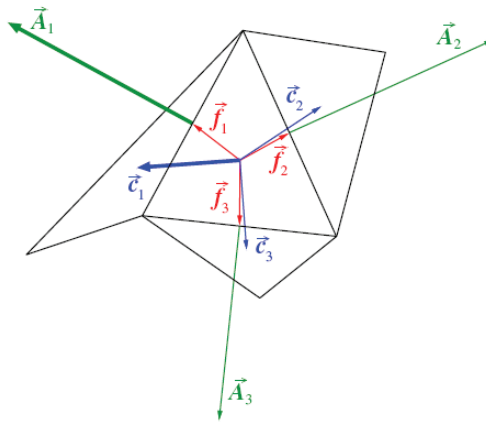


Figura 1.14. Vectores de ortogonalidad.
(Fuente: [30])

Relación del Jacobiano (Jacobian Ratio)

La relación del jacobiano es una de las mejores medidas de calidad de malla, este número define cuán bueno o malo es un elemento. El Jacobiano es una medida de las normales de las caras del elemento en relación con las otras. Un valor de 1 significa que la calidad de malla es excelente, mientras que valores negativos o valores mayores dan calidades ineficientes. Se recomienda valores de hasta 1,8 para una calidad de malla aceptable. [30]

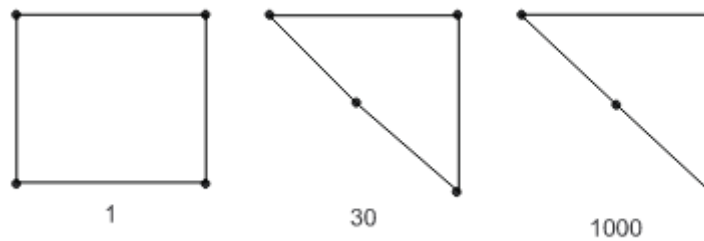


Figura 1.15. Relación de Jacobianos para cuadriláteros.
(Fuente: [30])

1.7.2.3. Tipos de elementos de Malla

Existen 4 tipos de elementos de malla tridimensionales: tetraédrico, hexaédrico, prismático y piramidal. La elección del tipo de elemento de malla dependerá de la geometría, la precisión y el tipo de análisis a realizar.

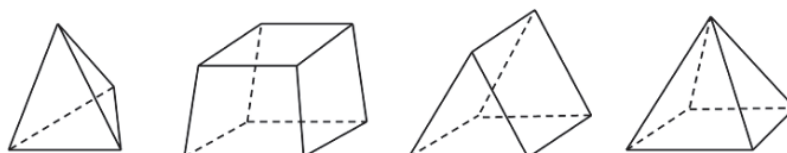


Figura 1.16. Tipos de elementos de malla.
(Fuente: [31])

Los elementos tetraédricos son los elementos más sencillos debido a que cualquier volumen independientemente de su forma o topología se adapta a este tipo de malla. Los otros tipos de elementos deben ser utilizados cuando en realidad el análisis lo requiera y se adapte al tipo de elemento seleccionado. Para conseguir un mallado adecuado del tipo hexaédrico, piramidal o prismático, se deben realizar ciertas operaciones adicionales. Un mallado hexaédrico reduce el número de elementos de malla, la relación de aspecto (Aspect Ratio) incrementa y se obtiene una mayor precisión en los resultados. Por otro lado, al tener un mayor número de nodos el tiempo computacional incrementa. [31]

1.8. Consideración No-lineal

Dentro de un software de elementos finitos se debe realizar una simulación no lineal cuando el comportamiento no lineal de un cuerpo ante un fenómeno particular no es despreciable [1].

Existen tres formas de presentar un comportamiento no lineal en estructuras; deformaciones, cambios de conexión y relación esfuerzo-deformación [28].

No-linealidades geométricas

Conocidas así las no-linealidades ocasionadas por largas deformaciones. En este caso la matriz de rigidez $[K]$, presentará variaciones considerables. Ansys considera una geometría no-lineal mediante un análisis que toma en cuenta grandes deformaciones y se la establece utilizando la herramienta "Large Deflection". Las no-linealidades geométricas implicarán problemas de convergencia, mismos que podrán mejorarse mediante la disminución del paso de tiempo.

No-linealidades topológicas

Son no-linealidades relacionadas a cambios en conexión. Éstas abarcan fallas en miembros estructurales o materiales y cambios en los contactos. Suelen presentarse acompañadas de grandes deformaciones.

No-linealidades del material

Relación esfuerzo-deformación del material, refieren a zona plástica del material. Para trabajar en esta zona, el método de elementos finitos requiere describir la relación esfuerzo-deformación mediante un modelo matemático del material [28].

1.8.1. Iteración de Equilibrio

Para la simulación no-lineal cada paso de tiempo requiere varias iteraciones debido a la complejidad matemática de los modelos no-lineales. A mayor número de iteraciones la

posibilidad de divergencia en soluciones aumenta. Requiriendo por lo tanto un control más riguroso de la convergencia de cada iteración, es decir el equilibrio en las iteraciones [28]. El Método Newton-Raphson consiste en un método de aproximación de una función no lineal mediante la estimación de la tangente en cada punto a analizar en la función. La convergencia del método dependerá de que la primera derivada de la función no lineal exista y sea continua en el intervalo de análisis [32].

Sea:

$$A P_0 \Rightarrow [K_0][D_0] = [F_0]$$

Ecuación 1.19. Ecuación matricial Fuerza y deformación para modelos no-lineales.

Considerando un paso del P_0 a P_1

Existirá una variación de la fuerza siendo: $F_0 + \Delta F$

Se determinará la tangente de [1] obteniendo a la fuerza $F_0 + \Delta F$ una respuesta en el desplazamiento $[D_1]$. Remplazando esta variable en [1], se obtendrá nuevas matrices $[K_1]$ y $[F_1]$.

ANSYS considera el valor residual:

$$F_R = F_0 + \Delta F - F_1$$

Ecuación 1.20. Factor residual en criterios de convergencia.

Si el factor residual F_R es menor a criterios de convergencia impuestos por el programador, la función se encuentra en equilibrio de iteración, caso contrario la iteración se repetirá hasta que se satisfaga dichas condiciones [28].

1.9. Evaluación de Error

El método de elementos finitos consiste en un método discreto para representar el comportamiento de un fenómeno. Por tal motivo significará una aproximación matemática de un modelo analítico, presentando discrepancias entre soluciones. Para determinar la validez de una solución obtenida con el software ANSYS se requiere determinar y comprobar que el error asociado a dicha solución se encuentre dentro de parámetros permisibles [33].

1.9.1. Error de selección del modelo matemático

Error asociado a una elección errónea del modelo matemático que describe un fenómeno físico [33]. Error catastrófico pues la simulación estará condenada al fracaso.

1.9.2. Errores computacionales

Error de redondeo

Es el error existente en todo tipo de programa informático, aparece debido a la limitación referente al número de bits que se dispone para caracterizar un número. Es decir, es el error que presentan los números infinitos donde varios decimales al ser homologados en un programa tendrán un límite máximo de bits para su caracterización, lo que ocasiona una diferencia entre el valor real y el valor presente en el programa [32].

Error por truncamiento (Truncation error)

Asociado al error producido por realizar operaciones algebraicas entre términos finitos que representan cantidades infinitas [32].

1.9.3 Error por discretización

Asociado a la transformación de un elemento continuo en uno discreto. El error por discretización se medirá dependiendo de la variación con respecto a la respuesta analítica. Dicho error se suele reducir mediante un refinamiento de malla, pues la transferencia de datos entre nodos disminuye [32].

2. METODOLOGÍA

La presente sección describe la metodología implementada para la simulación numérica del contacto en cojinetes de fricción. Con este objetivo, en base a documentación especializada y experimental de contacto y comportamiento de cojinetes de fricción, fueron tomados las pautas necesarias y lineamientos de elaboración.

La Figura 2.1. Presenta un diagrama sobre el desarrollo de la metodología implementada durante el presente proyecto. Se presenta 4 etapas a considerar:

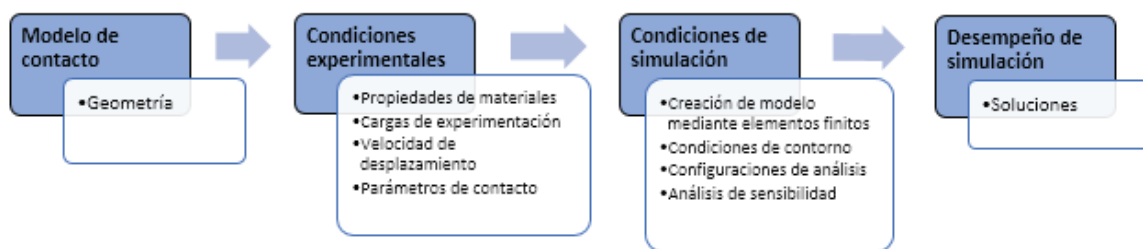


Figura 2.1. Diagrama de Metodología.
(Fuente: Propia)

Las cuatro etapas presentan tanto un estudio, como un desarrollo para su sustentación individual y en conjunto.

- El Modelo de contacto limita geoméricamente las condiciones de estudio del fenómeno. Debido a ello resulta esencial una selección correcta.
- Definir las condiciones experimentales a la que se realiza un experimento facilita el proceso de simulación, restringe las variables presentes en el fenómeno permitiendo reducir el error bajo dichas condiciones.
- La imposición de las condiciones de simulación serán un resultado del fenómeno, las condiciones experimentales definidas previamente y las aproximaciones permitidas por el software.
- Optimizar el desempeño de la simulación permite reducir costos computacionales y disminuir el error asociado a la discretización.

2.1. Modelo de contacto

2.1.1. Cojinete de fricción-muñón

El sistema cojinete de fricción – muñón es una junta rotacional, con una geometría angular tal como se muestra en la Figura 2.2. Sin embargo, el planteamiento de esta configuración geométrica para la realización de los modelos numéricos implica un alto coste computacional, además de entrar en la simulación de lubricación hidrodinámica, aspecto que se sale del tema que trata el presente trabajo.

Debido a lo señalado se opta por buscar alternativas que generen una simulación numérica aplicable a cualquier configuración geométrica y cuyo costo computacional sea manejable dentro del Ecuador.

Para la simulación de contacto en un cojinete de fricción se considera una geometría plana de contacto entre el cojinete de fricción y el eje de rotación. Esta consideración se realiza para disminuir el gasto computacional, disminuir tiempos de simulación y facilitar la implementación del estudio a diversas configuraciones geométricas, dimensionales y de materiales [34].

Dentro de la documentación especializada en el comportamiento de cojinetes de fricción, existe un modelo de contacto ampliamente usados para describir el fenómeno térmico, y de contacto; Pin on disc.

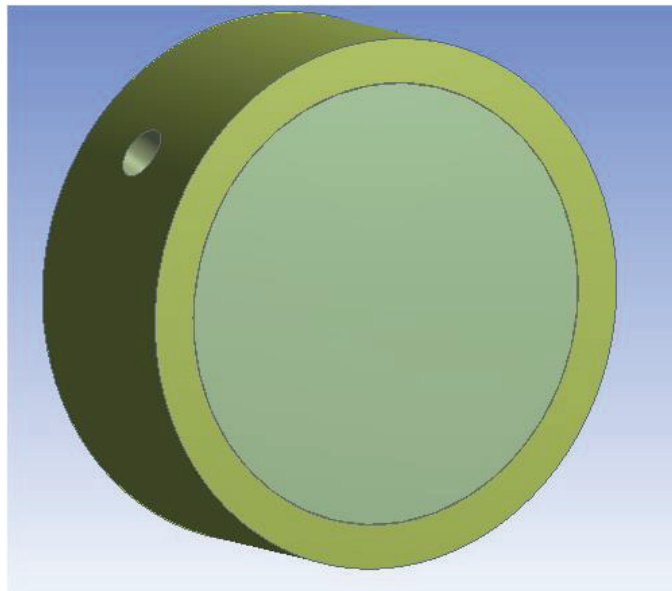


Figura 2.2. Configuración de contacto muñón cojinete de fricción.
(Fuente: Propia)

2.1.2 Pin on disc

Configuración de mayor incidencia en los estudios de desgaste (ver Figura 1.4.).

Los investigadores Gee y Vaessen iniciaron los estudios de desgaste en cojinetes de fricción lubricados utilizando la configuración Pin on disc [19]. El método presenta buenos resultados respecto a distribución de presiones y fuerzas de reacción resultantes. Más tarde Patnaik empieza a utilizar la configuración Pin on disc tanto para analizar cojinetes de fricción secos y lubricados.

En la Figura 2.3 se especifican las dimensiones de cada elemento del equipo utilizado en el análisis [16].

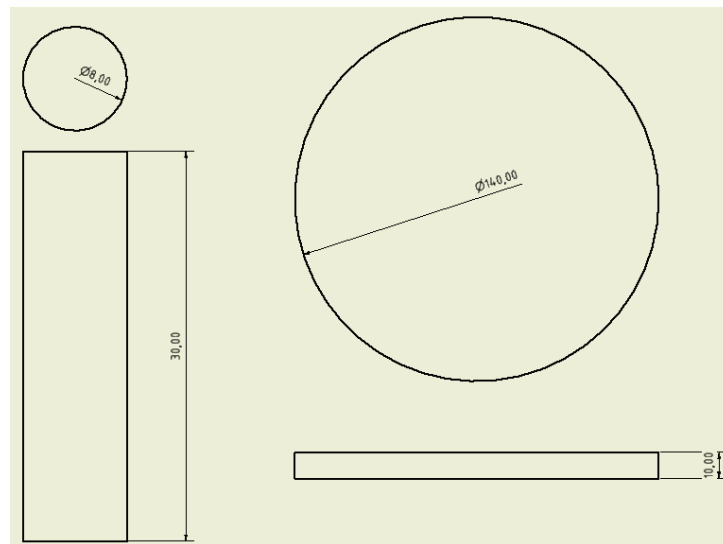


Figura 2.3. Dimensiones de la configuración de contacto Pin on disc.
(Fuente: Propia)

2.2. Condiciones experimentales

El modelo de contacto seleccionado permite la búsqueda de información experimental para la validación respectiva de presiones y temperaturas.

En base a la bibliografía encontrada se determinó el paper “Numerical Simulation & Experimental study of wear depth and Contact pressure distribution Of Aluminum MMC Pin on disc Tribometer”, como la base experimental y sustento para el análisis de presiones del presente trabajo. [12],

La selección del mismo fue en base a la validez de sus resultados obtenidos y las consideraciones de tiempo efectuadas en el mismo. El método de elementos finitos (MEF)

requiere de altos costos computacionales debido al número de elementos, ecuaciones que modelan el fenómeno y número de iteraciones, lo que dificulta directamente la simulación.

Al utilizar el trabajo desarrollado por Suresh, los tiempos de análisis son bajos permitiendo un análisis mediante elementos finitos con un menor requerimiento computacional. [35]

Las simulaciones de contacto a realizar en el presente trabajo deberán estar representadas y limitadas bajo las mismas condiciones experimentales utilizadas en el estudio desarrollado por Suresh. De esta manera será posible validar los resultados obtenidos en la simulación en base a dichos resultados.

2.2.1 Propiedades de materiales

Dentro de los documentos de referencia, se encuentra un análisis para distintos materiales. La presente simulación trabajará con los materiales analizados en el documento de validación de presiones [35].

En las Tablas 2.1, 2.2 y 2.3 se presentan las propiedades de los distintos materiales utilizados en las simulaciones a realizar.

Tabla 2.1. Propiedades de materiales utilizados en configuraciones de contacto.

Designación del Material	Módulo de Young	Relación de Poisson	Densidad
	[Gpa]		[kg/m ³]
Al 6061	86,3	0,3	2796
Acero estructural	200	0,3	7850

(Fuente: [35])

Tabla 2.2. Propiedades térmicas del Aluminio 6061.

Propiedad	Símbolo	Valor
Conductividad térmica [W/m ^{°K}]	K _{Al}	209
Densidad [Kg/m ³]	P _{Al}	2796
Calor específico [J/kg °K]	C _{Al}	880

(Fuente: [36])

Tabla 2.3. Propiedades térmicas del acero estructural.

Propiedad	Símbolo	Valor
Conductividad térmica [W/m ^{°K}]	K _{Ac}	60,5
Densidad [Kg/m ³]	P _{Ac}	7850
Calor específico [J/Kg °K]	C _{Ac}	434]

(Fuente: [36])

2.2.2. Cargas de experimentación

Dentro de los parámetros experimentales utilizados para la configuración de contacto se tienen 5 diferentes cargas de experimentación que estarán aplicadas al elemento que sufrirá el desgaste mayoritariamente, éste último representa el cojinete de fricción. Su objetivo consiste en simular la carga a la que estará sometida el eje, además de mantener el área de contacto invariable permitiendo o aparentando una tasa de desgaste constante. En la Tabla 2.4 se presentan las cargas de experimentación de la configuración Pin on disc.

Tabla 2.4. Configuración de cargas Pin on disc.

Configuración Pin on disc	
N-	Carga [N]
1	10
2	20
3	30
4	40
5	50

(Fuente: [35])

2.2.3. Velocidad de deslizamiento

La velocidad de desplazamiento o rotación consiste en un parámetro de entrada constante dentro de los modelos experimentales. Será un factor influyente tanto para el cálculo de presiones como de temperaturas. Se debe hacer énfasis en que la velocidad relativa del pin con respecto a la superficie es la que entrará en juego para la distribución de presiones y temperaturas (ver Tabla 2.5.).

Tabla 2.5. Velocidad de deslizamiento y rotación para Pin on ring.

Configuración	Velocidad de deslizamiento	Velocidad de rotación
	[m/s]	[rad/s]
Pin on ring	3,76	62,83

(Fuente: [35])

2.2.4. Parámetros de contacto

Dentro del contacto superficial presente, se debe considerar características experimentales. En el contacto, el coeficiente de fricción $[\mu]$ y la dureza del pin Al6061. Valores constantes y determinados en experimentación

Tabla 2.6. Parámetros de contacto en la configuración Block on ring.

Carga	Velocidad	Dureza Al 6061	Coeficiente de fricción $[\mu]$
[N]	[m/s]	[HV]	
50	3,76	60,6	0,6
40			
30			
20			
10			

(Fuente: [35])

2.2.5. Condiciones térmicas

Las variables térmicas consideradas para el presente trabajo serán bajo condiciones ambientales, considerando una temperatura ambiental de 22 [°C].

2.3. Condiciones de Simulación

El proyecto de estudio tiene como objetivo plantear un modelo numérico sobre el contacto superficial en cojinetes de fricción utilizando el software ANSYS.

Con el objetivo de alcanzar de manera exacta y precisa la distribución de variables termomecánicas en el contacto el modelo Pin on disc, el presente trabajo se enfocará en lograr distribuciones de temperaturas y presiones cercanas a las experimentales.

En la Figura 2.4 se plantea un diagrama de flujo para la simulación del modelo de contacto, cada paso de simulación dentro del diagrama de flujos de la Figura 2.3, se especifica a detalle en la presente sección.

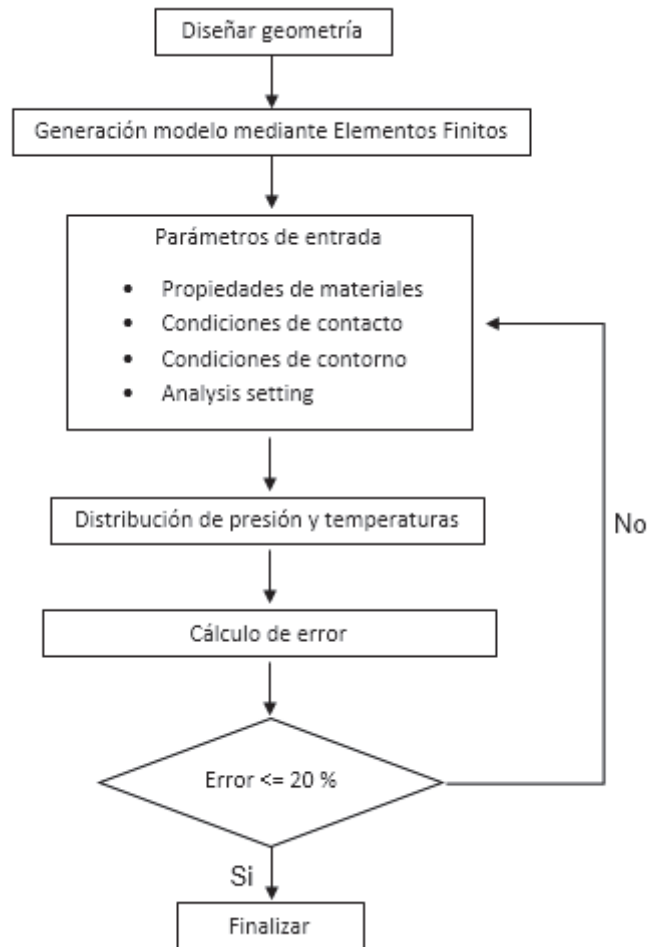


Figura 2.4. Diagrama de flujo para la simulación de contacto.
(Fuente: Propia)

2.3.1. Diseño geométrico

La geometría y dimensiones del modelo Pin on disc fueron realizadas utilizando la herramienta de interfaz Space Claim para facilidad e importación.

Se presenta dos tipos de variaciones, todas las variaciones realizadas tuvieron una finalidad y propósito específico en el proyecto.

2.3.1.1. Pin on disc 2-D

Modelo 2-D que representa en dos dimensiones el contacto existente en la configuración Pin on disc. Conserva las dimensiones de la proyección frontal del contacto, mas no presenta profundidad. Al tener un menor número de grados de libertad es posible optimizar el costo computacional en la simulación (ver Figura 2.5).

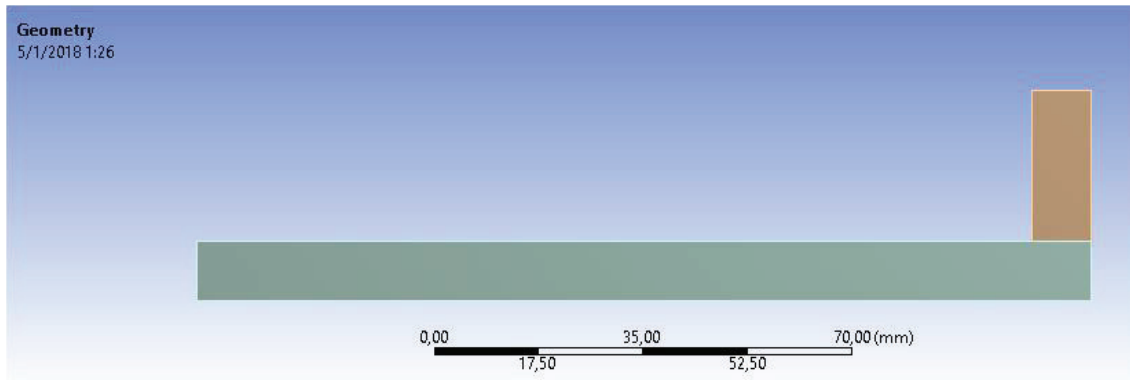


Figura 2.5. Configuración de contacto Pin on disc 2-D.
(Fuente: Propia)

2.3.1.2 Pin on block

Modelo 3-D, donde se secciona un bloque del ring y se utiliza un pin cilíndrico para simular el contacto entre estos cuerpos. Esta configuración geométrica facilita el mallado en la zona de contacto, reduce el tiempo de simulación y el costo computacional.

Debido a que se pierde el movimiento continuo debido a la ausencia de rotación de una superficie, el modelo Pin on block limitará el análisis a tiempos de contacto pequeños (ver Figura 2.6.).

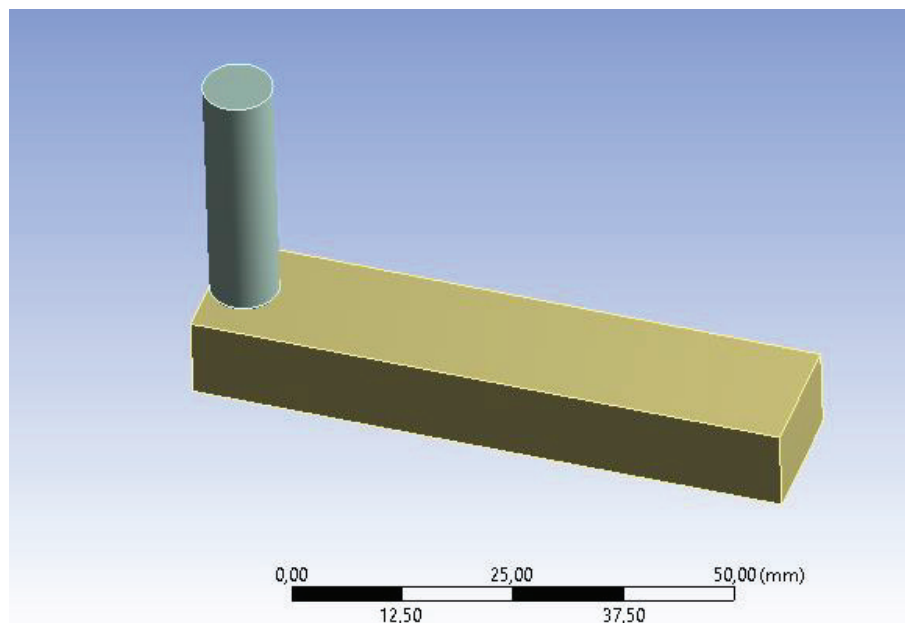


Figura 2.6. Configuración de contacto Pin on block.
(Fuente: Propia)

2.3.2. Mallado y discretización

El proceso de mallado consiste en la discretización del modelo continuo. Como parte de la simulación de contacto se requiere la discretización por elementos y nodos de los 2 modelos de contacto planteados.

2.3.2.1 Pin on disc 2-D

Modelo 2-D presenta elementos tipo plana, debido que únicamente utiliza dos direcciones cartesianas.

Para realizar el mallado en Ansys transitorio estructural 2-D se plantea un mallado del tipo automático, que facilita la generación del mismo sin importar la geometría siempre y cuando no existan discontinuidades.

La generación de un mallado automático presenta como defecto que buscará una distribución homogénea de elementos, dentro del caso de estudio se requiere dar un especial énfasis a la zona cercana al contacto.

Se plantea el uso de 2 técnicas de mallado para obtener un afinamiento de malla en las zonas de interés y mejorar las cualidades de la misma.

Tamaño de borde (Edge Sizing)

Se aplican dos edge sizing dentro del pin. El objetivo es lograr un afinamiento mediante un mayor número de elementos en la zona de contacto y un menor número de elementos en sentido perpendicular a la zona de contacto.

Dentro del disco se aplicará un edge sizing en los bordes de contacto de igual manera para aumentar el número de elementos en el área de interés.

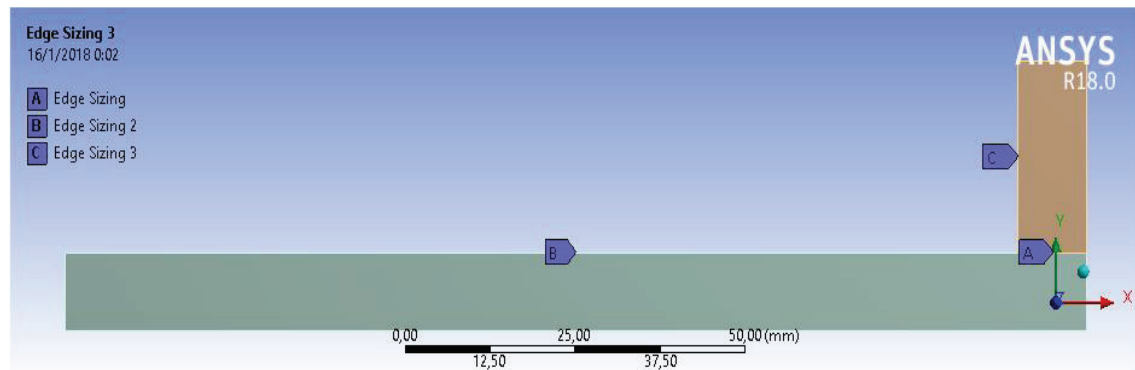


Figura 2.7. Edge Sizing aplicado a los cuerpos en contacto.
(Fuente: Propia)

Mallado de cara (Face meshing)

Se aplica esta técnica en la superficie de ambos cuerpos con el objetivo de mejorar la calidad de malla mediante la uniformidad de los elementos.

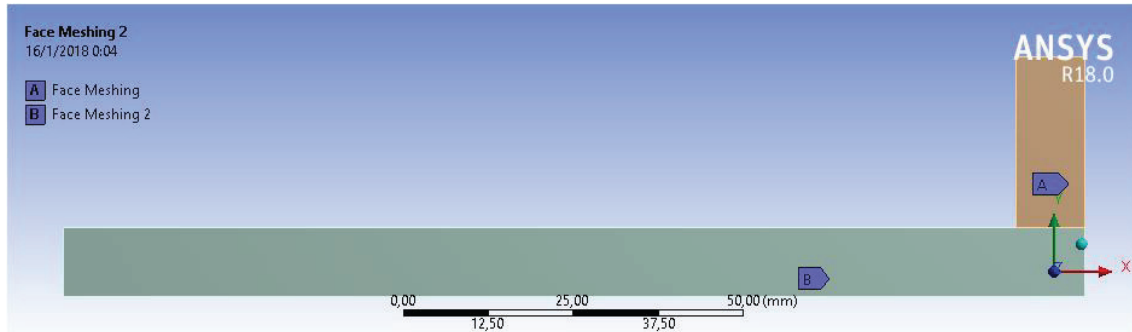


Figura 2.8. Face meshing aplicado a los cuerpos en contacto.
(Fuente: Propia)

El mallado final se presenta en la Figura 2.9 mientras la calidad del mallado se presenta en la Tabla 2.7

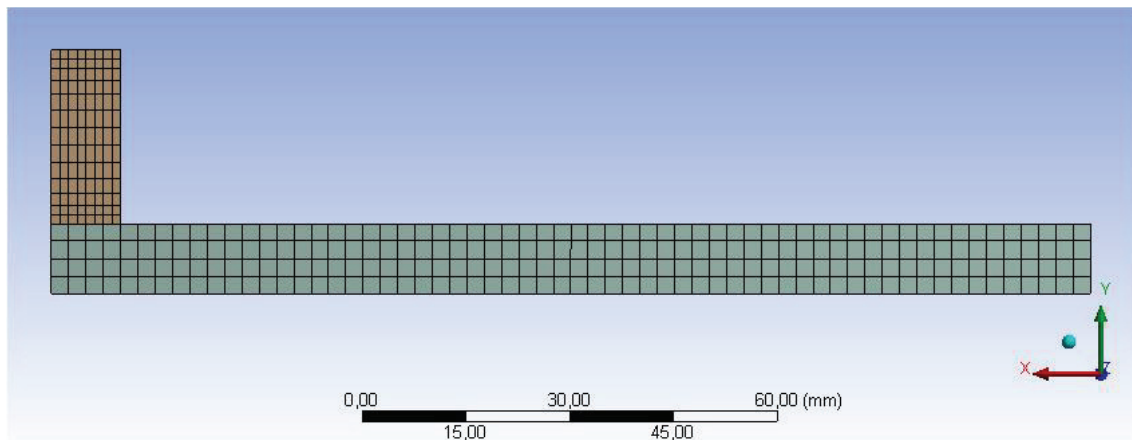


Figura 2.9. Mallado Pin on disc 2-D.
(Fuente: Propia)

Los elementos utilizados en la simulación Pin on disc se presentan en la Tabla 2.8 y en la tabla 2.9 se presenta las características asociadas al mallado.

Tabla 2.7. Calidad de mallado en la simulación Pin on disc 2-D.

Medida de calidad de malla	Mínimo	Promedio	Máximo	Desviación Standard
Relación del jacobiano (MAPDL)	1	1,0001	1,0009	0,00018197
Oblicuidad	0,000166	0,0003759	0,001057	0,00037579
Calidad ortogonal	1	1	1	4,659E-007
Relación de aspecto	1,0166	1,2015	1,9797	0,30248

(Fuente: Propia)

En la Tabla 2.8 se observa un detalle de los elementos presentes en la simulación, especificando:

Elemento PLANE 183 consiste en un sólido seteado por defecto en ANSYS 2-D. Presenta 6 u 8 nodos y un desplazamiento cuadrático. Permite grados de libertad de translación y torsión.

Elementos CONTA 172, ubicados en la superficie de contacto del cuerpo de menor rigidez.

Elemento TARGE 169, localizado en la superficie de contacto del cuerpo de mayor rigidez.

Elemento SURF 153, ubicado en la superficie donde se aplica las distintas cargas.

Tabla 2.8. Elementos simulación Pin on disc 2-D.

Tipo de elemento	Número
PLANE183	344
CONTA172	68
TARGE169	68
SURF153	8
Total	488

(Fuente: Propia)

La generación de calor en la interfaz de contacto debido a fricción no se puede manejar en Ansys 2-D. Debido a que en el modelo de Bowden y Thomas especifica áreas de contacto el modelo en Ansys 2-D no puede ser generado. Siendo por lo tanto la simulación en 2-D limitada a un estudio de presiones.

El modelo Pin on disc 2-D, facilitó el encontrar la configuración de contacto correcta dentro de la simulación. Los parámetros de contacto encontrados en el modelo serian el punto de partida de los siguientes modelos geométricos de mayor complejidad.

Tabla 2.9. Características de malla Pin on disc 2-D.

Característica	Valor
Número de elementos	488
Nodos	1204
Número de sólidos	344
Número de elementos en contacto	144

(Fuente: Propia)

2.3.2.2 Pin on block

Modelo 3-D, permite un análisis estructural enfocado al estudio de presiones en la interfaz de contacto, así como un análisis térmico sobre la distribución de temperaturas en la interfaz de contacto.

Se busca simplificar al máximo posible el mallado y optimizar las características relacionadas a la calidad del mallado. Se plantea el uso de dos técnicas de mallado dentro de la simulación:

Método de ajuste de malla (Patch conforming method)

Técnica de mallado que permite que bordes y caras dentro de un cuerpo queden completamente asignadas a elementos. Dicha técnica se aplica en el modelo a ambos cuerpos con el objetivo de generar un dominio completo de tetraedros.

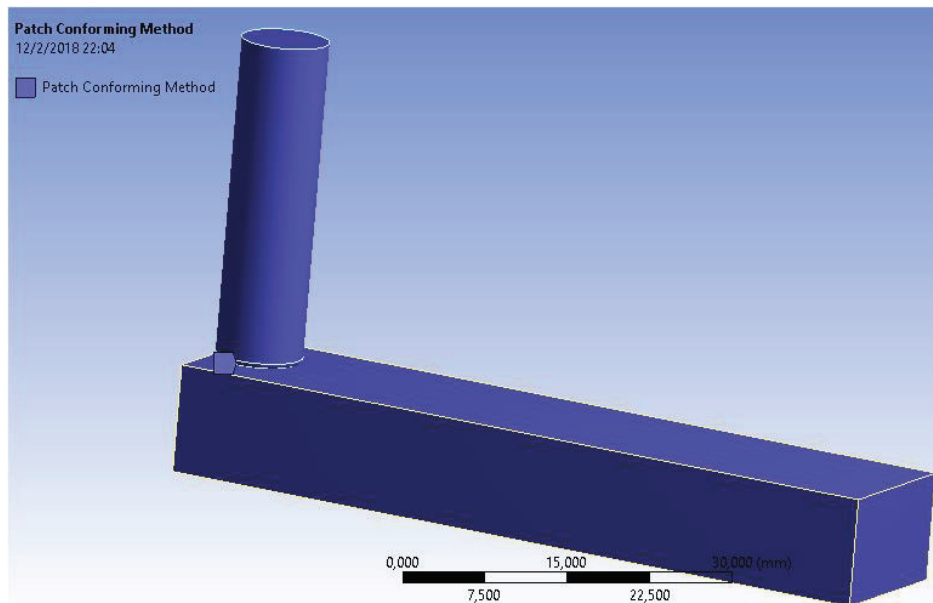


Figura 2.10. Método de ajuste de malla (Patch conforming method) aplicado a los cuerpos. (Fuente: Propia)

Refinamiento (Refinement)

Se aplica esta técnica en las superficies de ambos cuerpos, con el objetivo de mejorar la calidad de malla mediante la multiplicación de los elementos en la zona de mayor interés para analizar.

El mallado resultante del bloque y el pin se presenta en las Figuras 2.12 y 2.13 respectivamente. En la Tabla 2.10 se presenta la calidad de mallado.

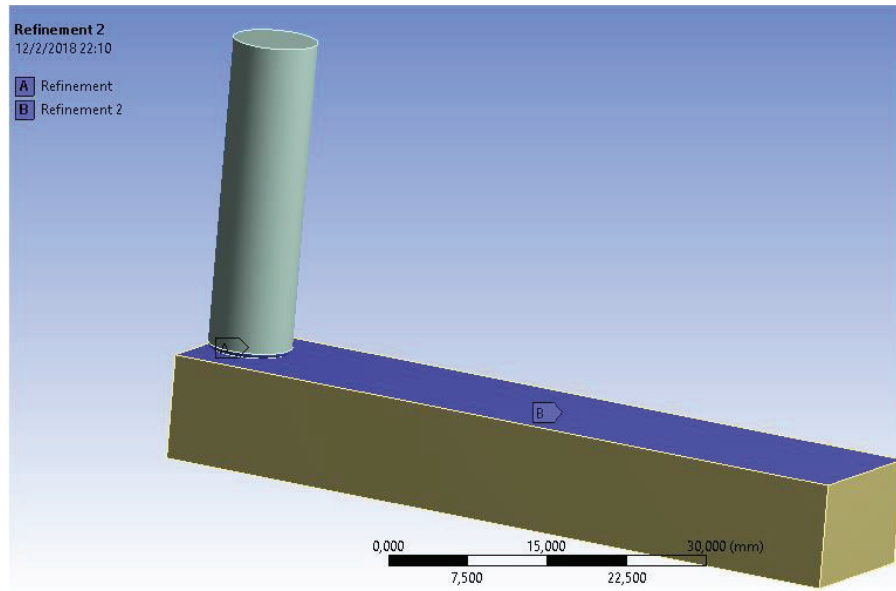


Figura 2.11. Refinement aplicado en la superficie de contacto.
(Fuente: Propia)

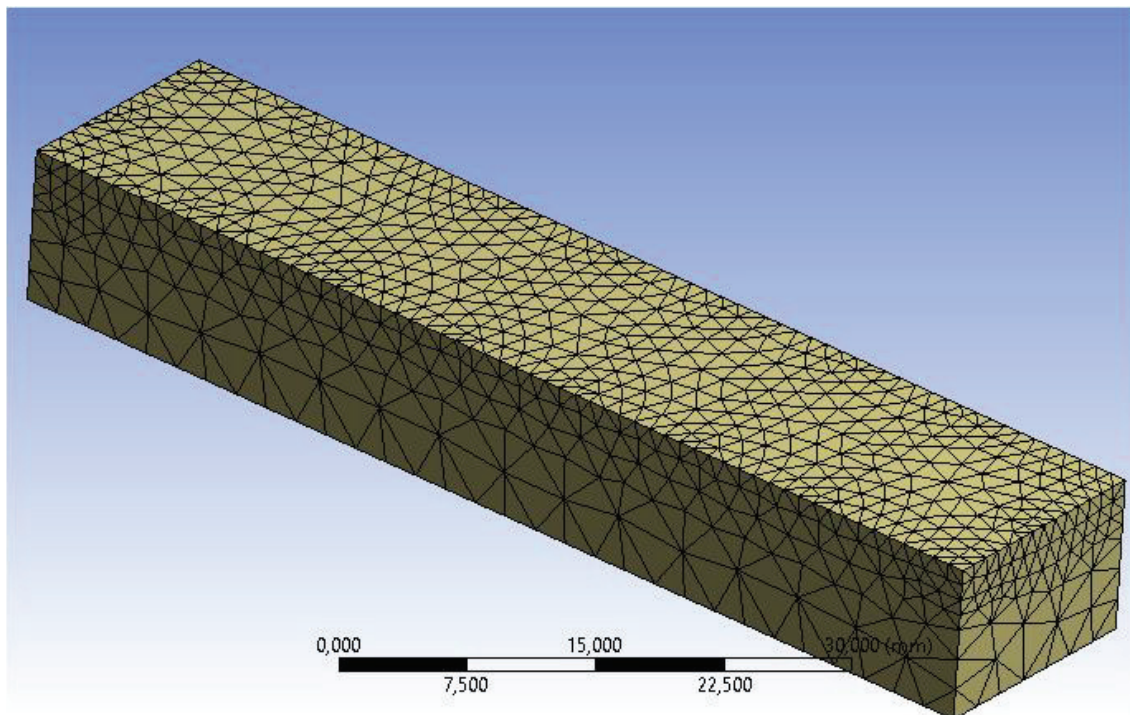


Figura 2.12. Mallado utilizado en la configuración Bloque
(Fuente: Propia)

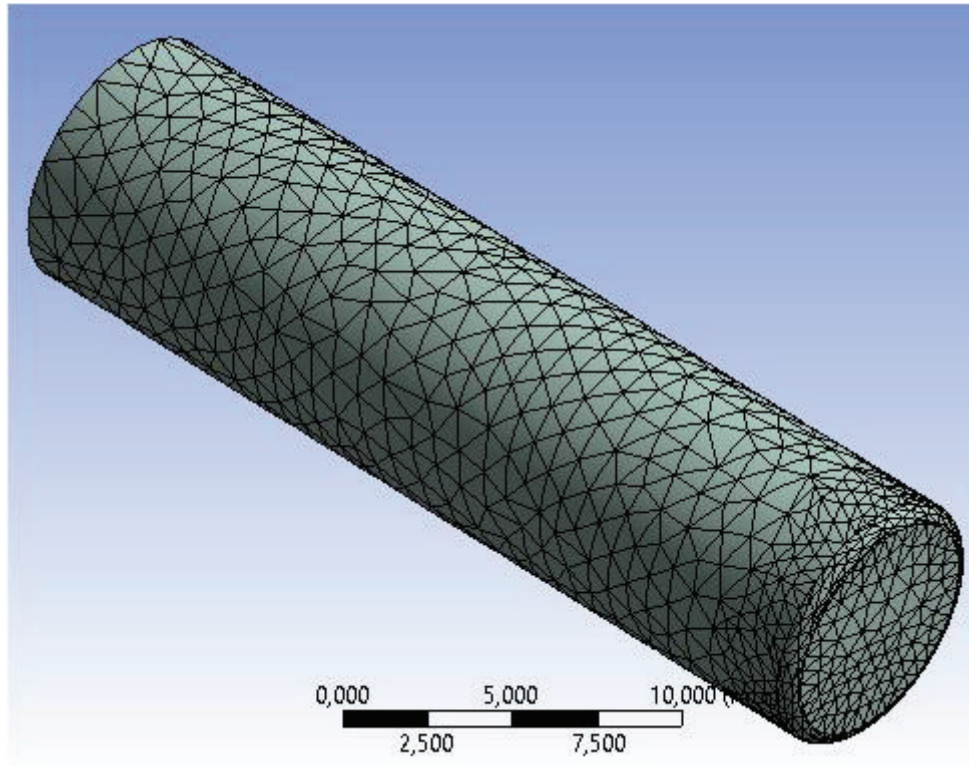


Figura 2.13. Mallado utilizado en la configuración del pin.
(Fuente: Propia)

Los elementos utilizados en la simulación Pin on block se presentan en la Tabla 2.11 y en la Tabla 2.12 se presenta las características asociadas al mallado.

Tabla 2.10. Calidad de mallado en la simulación Pin on block.

Medida de calidad de malla	Mínimo	Promedio	Máximo	Desviación Standard
Relación del jacobiano (MAPDL)	-100	1,1059	765,54	7,0696
Oblicuidad	4,928e-003	0,3276	0,99729	0,17452
Calidad ortogonal	0,11045	0,98404	0,81051	0,10492
Relación de aspecto	1,1952	2,0746	23,837	0,72265

(Fuente: Propia)

Tabla 2.11. Elementos simulación Pin on block.

Tipo de elemento	Número
SOLID227	16195
CONTA174	528
TARGE170	896
SURF154	76
COMBIN14	48
Total	17743

(Fuente: Propia)

Tabla 2.12. Características de malla Pin on block.

Característica	Valor
Número de elementos	17743
Número de nodos	26353
Número de sólidos	16195
Número de elementos en contacto	1500

(Fuente: Propia)

El detalle y características de los elementos utilizados para la simulación (Tabla 2.11) presentan las características:

SOLID227 de dominio tetraédrico, habilita el uso de variables térmicas y estructurales. Ambos cuerpos presentan dicha disposición para un correcto acople de variables.

Dentro de las superficies en contacto se halla presente el elemento CONTA174 y TARGE170 en el pin y en el bloque respectivamente.

Elementos CONTA 174, ubicados en la superficie de contacto de menor rigidez, consiste en un elemento de ocho nodos que permite un análisis de contacto flexible-flexible.

Elemento TARGE 170, localizado en la superficie de contacto de mayor rigidez. Responde cuando elementos de contacto se mueven hacia su dominio.

Elemento SURF154 delimitado entre cuatro y ocho nodos, permite analizar el efecto de cargas dentro de estructuras.

Elemento COMBIN14 de dos nodos, permite una deformación longitudinal o torsional.

2.3.3 Parámetros de entrada

Consiste en las entradas o especificaciones del modelo matemático para la correcta representación del fenómeno de contacto.

2.3.3.1. Propiedades de materiales

Se define en base a documentación experimental y teórica (sección 2.2) las propiedades de los materiales a utilizar en la presente simulación. Los mismos deberán ingresarse en Ansys mediante el módulo “Engineering Data” Figura 2.14, Figura 2.15 y Figura 2.16.

1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	2796	kg m ⁻³		
4	Isotropic Elasticity				
5	Derive from	Young's Modulu...			
6	Young's Modulus	8,63E+10	Pa		
7	Poisson's Ratio	0,334			
8	Bulk Modulus	8,6647E+10	Pa		
9	Shear Modulus	3,2346E+10	Pa		
10	Isotropic Thermal Conductivity	209	W m ⁻¹ C ⁻¹		
11	Specific Heat	880	J kg ⁻¹ C ⁻¹		

Figura 2.14. Propiedades del material Al-6061.
(Fuente: Propia)

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	7850	kg m ⁻³		
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
6	Isotropic Elasticity				
12	Alternating Stress Mean Stress	Tabular			
16	Strain-Life Parameters				
24	Tensile Yield Strength	2,5E+08	Pa		
25	Compressive Yield Strength	2,5E+08	Pa		
26	Tensile Ultimate Strength	4,6E+08	Pa		
27	Compressive Ultimate Strength	0	Pa		
28	Isotropic Thermal Conductivity	60,5	W m ⁻¹ C ⁻¹		
29	Specific Heat	434	J kg ⁻¹ C ⁻¹		
30	Isotropic Relative Permeability	10000			
31	Isotropic Resistivity	1,7E-07	ohm m		

Figura 2.15. Propiedades del material acero estructural.
(Fuente: Propia)

Outline of Schematic C2: Engineering Data					
	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data			Source	Description
2	Material				
3	Al6061			C:\	
4	Structural Steel			Ger	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5 -110.1

Figura 2.16. Materiales utilizados en el presente trabajo dentro de ANSYS.
(Fuente: Propia)

2.3.3.2. Condiciones de contacto

Dentro de Workbench se permite imponer condiciones de contacto. Dichas condiciones limitarán grados de libertad o consistirán entradas que eventualmente serán procesados

sobre los nodos del modelo. Las condiciones de contacto definirán o limitarán el contacto entre cuerpos. Se especifican como condiciones de contacto:

Conexiones de Contacto - Friccional: Permite el desplazamiento relativo de un cuerpo sobre otro en un determinado plano de contacto. Este desplazamiento estará influenciado por la fricción y se presentarán posiblemente no-linealidades en la simulación. El contacto friccional dependerá del coeficiente de fricción ingresado por el usuario, la geometría de contacto y las ecuaciones que modelarán el fenómeno.

Debido a la dureza relativa del anillo frente al bloque se puede considerar que la presencia de volumen desgastando en el anillo tiende a ser nula al compararla con el volumen de desgaste generado en el bloque. Tomando esa premisa, para optimizar memoria computacional y tiempo de cálculo se opta por especificar cómo cuerpo rígido al anillo. Esta simplificación en el modelo no afecta, pues de igual manera que en cojinete de fricción se analiza únicamente el material sacrificado.

Ansys Transitorio Estructural (Transient Structural) utiliza de manera automática el modelo de fricción de Coulomb. El coeficiente de fricción ingresado por el usuario trabajará dentro de este modelo de fricción para describir el contacto. El que se producirá entre los nodos exteriores del cuerpo rígido y la cara exterior del cuerpo flexible. El contacto producido entre los cuerpos es asimétrico y el análisis se enfoca en el bloque, cuerpo flexible.

El método aumentado de Lagrange es utilizado en problemas de contacto donde se presenta un bajo nivel de penetración el cual generalmente es tan pequeño que su efecto puede ser despreciado ayudando a mejorar la convergencia del modelo.

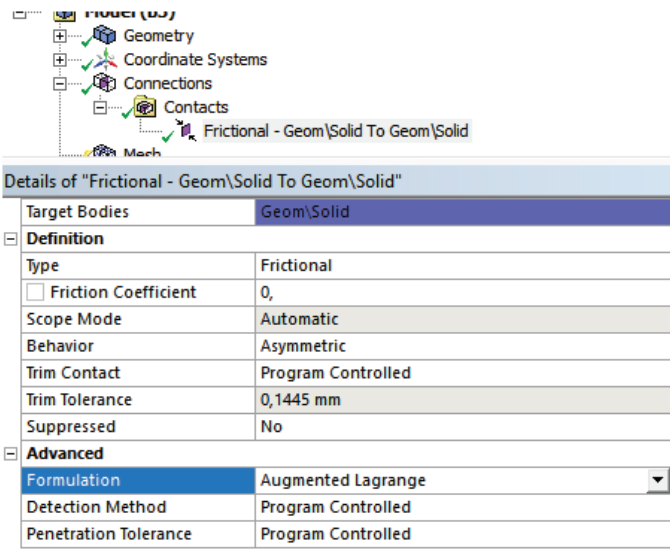


Figura 2.17. Método Aumentado de Lagrange en Ansys Workbench. (Fuente: Propia)

Dentro del contacto se requiere definir el comportamiento que presentan los cuerpos en el movimiento relativo. ANSYS permite definir 3 alternativas de contacto; Asimétrico (asymmetric), simétrico (symmetric) y un método automático (program controlled).

Asymmetric permite definir en un solo cuerpo los elementos tipo target y en otro cuerpo los elementos contact.

Symmetric por su parte permite la presencia de elementos contact y target en ambos cuerpos.

2.3.3.3. Condiciones de entorno

Las condiciones de entorno consisten en aquellas solicitudes o condiciones a las que estará sometido el elemento durante el experimento. En la Tabla 2.6 se especifican las condiciones del experimento. En ANSYS se busca delimitar el modelo numérico con dichas variables mediante las condiciones de contorno.

Carga (Load): Definida cómo condiciones de fuerza, térmicas, presión o momento.

Fuerza: Aplicable a una cara, borde o vértice. En el caso de que no sea puntual la fuerza se distribuirá de manera uniforme a través de la cara.

Condiciones térmicas: Aplicable a cuerpos. Otorga una temperatura de referencia a un cuerpo determinado.

Cargas en juntas (Joint load): Aplica un movimiento dinámico dentro de un grado de libertad de un determinado objeto o junta [32].

Soportes (Supports): Consisten en las condiciones que determinan la matriz [D] dentro de la Ecuación 1.19.

Soporte fijo (Fixed Support): Estatiza el movimiento de una cara, vértice o línea en cualquier coordenada cartesiana.

Desplazamiento (Displacement): Determina o condiciona desplazamientos en ciertas coordenadas cartesianas.

Soportes sin fricción (Frictionless Support): Inhibe el movimiento de una línea o una cara de manera normal a la misma, permitiendo únicamente un desplazamiento tangencial.

Inercial (Inertial): Consiste en condiciones que determinan la matriz [F] dentro de la Ecuación 1.19.

Velocidad de rotación (Rotational velocity): Permitire la rotación a determinada velocidad de un cuerpo.

En la presente simulación se utiliza tres condiciones de contorno:

- Fuerza: Se aplicó una fuerza variable dependiendo de la carga a simular en la cara superior del pin.
- Soporte sin fricción (frictionless support): Permite el deslizamiento libre en una dirección del pin de tal manera que actúa como guía sin aplicar ningún tipo de esfuerzo al elemento.
- Velocidad: En el caso 2D o Pin on block se condiciona la simulación con una velocidad lineal tangente a la longitud del block.
- Soporte fijo: Para las variables de modelo 2D o Pin on block se ajusta el bloque de acero estructural en su base inferior para impedir su movimiento.

Para realizar el análisis térmico del pin es necesario considerar el modelo matemático que domina el fenómeno físico. Debido a la fricción en la interfaz de contacto se genera calor, dicho calor formará dos flujos constantes dirigidos a los cuerpos en contacto [3].

Dentro de la simulación en 2-D, la generación de calor se ve limitada pues únicamente está se generará entre superficies. Por lo tanto la generación de calor está limitada a los modelos geométricos right-angled Pin on block y right-angled Pin on ring.

El módulo transitorio estructural 3-D de manera predeterminada utiliza el sólido 228, el cual dispone de grados de libertad con utilidad estructural. Para permitir la manipulación de variables térmicas se requiere un cambio de sólido o elemento, siendo los sólido 226 y 227 la opción que permita el uso de variables térmicas y mecánicas con el uso de elementos tipo hexaedros y tetraedros respectivamente.

Se asumirá en el análisis térmico:

- La generación de calor en la interfaz de contacto presenta dos flujos de calor constante. Para el presente trabajo se considera que el calor se divide de manera equitativa para ambos cuerpos de contacto. Además se desprecian pérdidas de calor al ambiente circundante. Estas consideraciones no representan de manera fiel, un comportamiento real, sin embargo bajo las premisas de Jaeger la aproximación resulta de alta eficiencia. [3]
- Para el estado transitorio se considera el modelo analítico del sólido semi-infinito como el modelo base o guía para el análisis.

- El estado estable se realiza mediante la discretización y operación de las ecuaciones que rigen el fenómeno físico.

Dentro de ANSYS Transitorio Estructural (Transient Structural) se utilizan los comandos indicados en las Figuras 2.18, 2.19 y 2.20 para permitir el uso de variables térmicas, generación de calor en la interfaz de contacto y condiciones de borde.

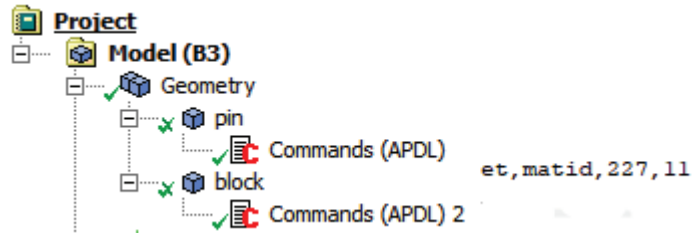


Figura 2.18. Comando APDL utilizado para definir los grados de libertad tanto térmicos como estructural para ambos elementos.

(Fuente: Propia)

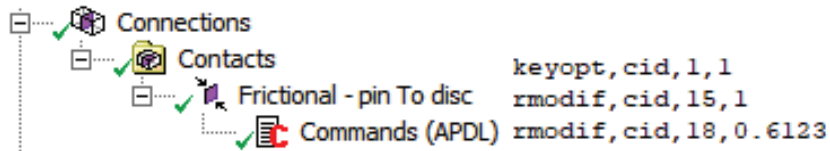


Figura 2.19. Comando APDL utilizado para definir la generación de calor y transferencia a los cuerpos en contacto.

(Fuente: Propia)

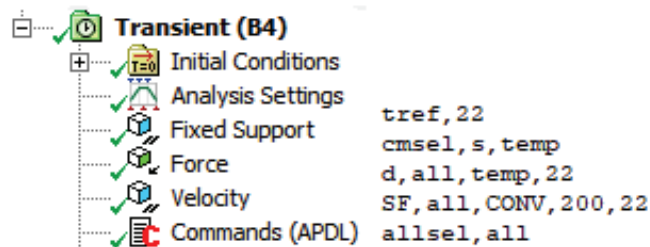


Figura 2.20. Comando APDL utilizado para definir las condiciones de borde tipo térmicas.

(Fuente: Propia)

Estado transitorio

Modelo analítico del sólido semi-infinito

Ejemplo de cálculo

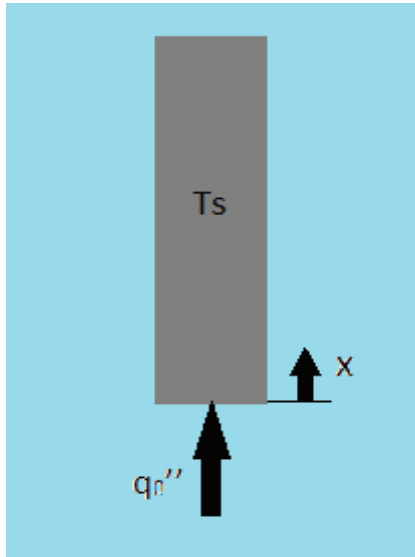


Figura 2.21. Condiciones de Borde para el sólido semi-infinito.
(Fuente: Propia)

Datos

W=50 [N]

V=3.75 [m/s]

$\mu=0,6$

A=5.0265 e-5 [m²]

$$q'' = \frac{W V \mu}{A}$$

Ecuación 2.1. Calor generado por fricción.

$$q'' = \frac{50[N] * 3.75 \left[\frac{m}{s}\right] * 0.6}{5.0265 e^{-5}[m^2]}$$

$$q'' = 2244084,698 [W/m^2]$$

$$q_0'' = 0.6123 * q''$$

Ecuación 2.2. Calor generado hacia el pin.

$$q_0'' = 1374053,06 [W/m^2]$$

$$Fo = \frac{\alpha t}{L^2}$$

Ecuación 2.3. Número de Fourier.

$$Fo = 0.0000849$$

Tabla 2.13. Parámetros y variables del estudio de temperatura

Datos		
Intervalo de tiempo [s]	Δt	0.02
Ancho [m]	Δx	0.002
Tiempo [s]	T	0.014
Longitud [m]	L	0.03
Temperatura superficial pin [°C]	Ts	22

(Fuente: propia)

Desarrollo del coeficiente de difusividad térmica

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$$

Ecuación 2.4. Difusividad térmica.

$$\alpha = \frac{209 \left[\frac{W}{m \cdot ^\circ K} \right]}{2796 \left[\frac{Kg}{m^3} \right] 880 \left[\frac{J}{Kg \cdot ^\circ K} \right]}$$

$$\alpha = 8,4943 e^{-5} \left[\frac{m^2}{s} \right]$$

Condiciones de Borde:

$$T(x,0) = T_s$$

$$q''(0,t) = q_0'' = cte$$

$$T(0,0.002) = 22 + \frac{2 * 1374053,06 \left(\frac{8,4943 * 10^{-5} * 0.002}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}}}{209} \exp \left(\frac{-0^2}{4 * 8,4943 * 10^{-5} * 0.002} \right)$$

$$- \frac{1374053,06 * 0}{209} \operatorname{erfc} \left(\frac{0}{2\sqrt{8,4943 * 10^{-5} * 0.002}} \right)$$

$$T(0,0.002) = 22 + 3.057 = 25.057 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Tabla 2.14. Temperaturas en la superficie de contacto del pin a diferentes tiempos para una carga aplicada de 50 [N].

Tiempo	T[°C]
$T(0,0)$	22
$T(0,0.002)$	25,06
$T(0,0.004)$	26,32
$T(0,0.006)$	27,30
$T(0,0.008)$	28,12
$T(0,0.010)$	28,84
$T(0,0.012)$	29,49

(Fuente. Propia)

Método numérico implícito

Cómo sustento matemático para la estabilidad del fenómeno se discretiza el mismo utilizando el programa Matlab.

Para el análisis del fenómeno térmico en el pin (Figura 2.22), se plantea un modelo matemático para su representación.

Dentro del modelo térmico del pin se debe distinguir que existe una fuente y un sumidero en el análisis, siendo el calor generado en la interfaz de contacto un calor constante que ingresa al pin, mientras el sumidero consiste en el aire circundante al pin.

Dentro del modelo matemático se consideran 3 zonas con distintos comportamientos (ver Figura 2.22.)

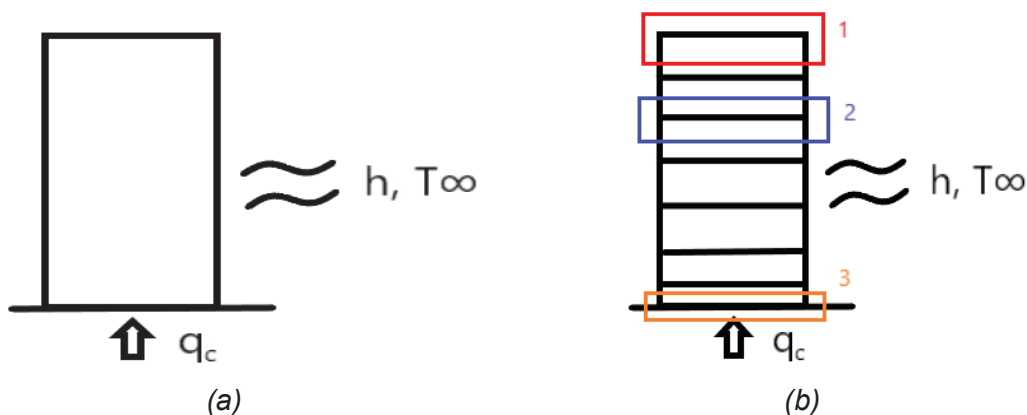


Figura 2.22. (a) Modelo térmico de pin. (b) Modelo matemático representativo del pin.
(Fuente: Propia)

Cada zona se analiza mediante un balance general de energía y se presenta a continuación.

En la zona 3 delimitada por un rectángulo de color naranja el balance de energía presenta:

$$E_{en} - E_{sal} = E_{alm}$$

Ecuación 2.5. Balance de energía.

$$q_c - E_{cond} - E_{conv} = E_{alm}$$

$$qA - \left(-kA \frac{T_{i+1}^{P+1} - T_i^{P+1}}{\Delta x} \right) - hA(T_i^{P+1} - T_\infty) = \rho CA \frac{\Delta x}{2} \frac{T_i^{P+1} - T_i^P}{\Delta t}$$

$$q + k \frac{T_{i+1}^{P+1} - T_i^{P+1}}{\Delta x} - h(T_i^{P+1} - T_\infty) = \rho C \frac{\Delta x}{2} \frac{T_i^{P+1} - T_i^P}{\Delta t}$$

$$\frac{q\Delta t}{\rho C \Delta x} + \frac{2k\Delta t}{\rho C \Delta x^2} (T_{i+1}^{P+1} - T_i^{P+1}) - \frac{2h\Delta t}{\rho C \Delta x} (T_i^{P+1} - T_\infty) = T_i^{P+1} - T_i^P$$

$$\frac{2qFo\Delta x}{k} + 2Fo(T_{i+1}^{P+1} - T_i^{P+1}) - \frac{2hFo\Delta x}{k} (T_i^{P+1} - T_\infty) = T_i^{P+1} - T_i^P$$

$$\frac{2qFo\Delta x}{k} + 2Fo(T_{i+1}^{P+1} - T_i^{P+1}) - \frac{2hFo\Delta x}{k} (T_i^{P+1} - T_\infty) = T_i^{P+1} - T_i^P$$

$$-2Fo T_{i+1}^{P+1} + T_i^{P+1} \left(2Fo + \frac{2hFo\Delta x}{k} + 1 \right) = T_i^P + \frac{2qFo\Delta x}{k} + \frac{2hFo\Delta x}{k} T_\infty$$

Ecuación 2.6. Discretización zona tres; ingreso de flujo de calor.

La zona 2 ubicada entre los límites del pin representará la mayoría de elementos dentro del pin. El balance de energía realizado a un elemento ubicado en ésta zona podrá generalizarse para el resto.

$$E_{en} - E_{sal} = E_{alm}$$

$$E_{cond_entrada} - E_{cond_salida} - E_{conv} = E_{alm}$$

$$-kA \frac{T_i^{P+1} - T_{i-1}^{P+1}}{\Delta x} - \left[-kA \frac{T_{i+1}^{P+1} - T_i^{P+1}}{\Delta x} + hA(T_i^{P+1} - T_\infty) \right] = \rho CA \Delta x \frac{T_i^{P+1} - T_i^P}{\Delta t}$$

$$-k \frac{T_i^{P+1} - T_{i-1}^{P+1}}{\Delta x} - \left[-k \frac{T_{i+1}^{P+1} - T_i^{P+1}}{\Delta x} + h(T_i^{P+1} - T_\infty) \right] = \rho C \Delta x \frac{T_i^{P+1} - T_i^P}{\Delta t}$$

$$\frac{k\Delta t}{\rho C \Delta x^2} (T_{i+1}^{P+1} - 2T_i^{P+1} + T_{i-1}^{P+1}) - \frac{h\Delta t}{\rho C \Delta x} (T_i^{P+1} - T_\infty) = T_i^{P+1} - T_i^P$$

$$Fo(T_{i+1}^{P+1} - 2T_i^{P+1} + T_{i-1}^{P+1}) - \frac{Foh\Delta x}{k} (T_i^{P+1} - T_\infty) = T_i^{P+1} - T_i^P$$

$$-Fo T_{i-1}^{P+1} + T_i^{P+1} \left(2Fo + \frac{hFo\Delta x}{k} + 1 \right) - Fo T_{i+1}^{P+1} = T_i^P + \frac{hFo\Delta x}{k} T_\infty$$

Ecuación 2.7. Discretización zona dos; interior pin.

La zona 1 ubicada en el borde superior del pin. El balance de energía presenta:

$$E_{en} - E_{sal} = E_{alm}$$

$$E_{cond_entrada} - E_{conv} = E_{alm}$$

$$-kA \frac{T_i^{P+1} - T_{i-1}^{P+1}}{\Delta x} - hA(T_i^{P+1} - T_\infty) = \rho CA \frac{\Delta x T_i^{P+1} - T_i^P}{2 \Delta t}$$

$$-k \frac{T_i^{P+1} - T_{i-1}^{P+1}}{\Delta x} - h(T_i^{P+1} - T_\infty) = \rho C \frac{\Delta x T_i^{P+1} - T_i^P}{2 \Delta t}$$

$$\frac{2k\Delta t}{\rho C \Delta x^2} (T_{i-1}^{P+1} - T_i^{P+1}) - \frac{2h\Delta t}{\rho C \Delta x} (T_i^{P+1} - T_\infty) = T_i^{P+1} - T_i^P$$

$$2Fo(T_{i\pm}^{P+1} - T_i^{P+1}) - \frac{2Foh\Delta x}{k} (T_i^{P+1} - T_\infty) = T_i^{P+1} - T_i^P$$

$$-2Fo T_{i-1}^{P+1} + T_i^{P+1} \left(2Fo + \frac{2hFo\Delta x}{k} + 1 \right) = T_i^P + \frac{2hFo\Delta x}{k} T_\infty$$

Ecuación 2.8. Discretización zona uno; extremo superior del pin.

En base a la Tabla 2.15, extraída de la literatura especializada [23] se toma como coeficiente de convección forzada un $h = 200 \left[\frac{Wm^2}{K} \right]$.

De igual manera se recomienda el uso de un número de Fourier [Fo] menor a 0,2 para una aproximación de alta calidad. En el programa se utiliza un Fo de 0,1. [23]

Tabla 2.15. Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección.

Proceso	h (W m ² /K)
Convección libre	
Gases	2-25
Líquidos	50-1000
Convección forzada	
Gases	25-250
Líquidos	50-20000
Convección con cambio de fase	
Ebullición o condensación	2500-100000

(Fuente: [33])

Las ecuaciones 2.1, 2.2 y 2.3 representaran el modelo térmico del pin y mediante el uso de un ciclo for se procesan dichas ecuaciones en el tiempo y posición del pin (Figura 2.23). La programación se especifica en el anexo 1.

```

T=T1;
for i=1:s1
    T_i=T;
    for i=1:x
        if i==1
            A(i,i)=1+2*Fo+((2*h*Fo*Delta_x)/K_p);
            A(i,i+1)=-2*Fo;
            C(i)=((2*Fo*q_pin*Delta_x)/K_p)+((2*Fo*h*T_amb*Delta_x)/K_p)+T_i(i)
        elseif i==x
            A(i,i)=((2*h*Fo*Delta_x)/K_p)+2*Fo+1;
            A(i,i-1)=-2*Fo;
            C(i)=((2*h*Delta_x*T_amb*Fo)/K_p)+T_i(i);
        else
            A(i,i-1)=-Fo;
            A(i,i)=1+2*Fo+((Fo*Delta_x*h)/K_p);
            A(i,i+1)=-Fo;
            C(i)=T_i(i)+((Fo*h*T_amb*Delta_x)/K_p);
        end
    end
    A;
    C;
    T=A_inv*C;
end
T10=T;

```

Figura 2.23. Ciclo For para evaluar la temperatura en el pin en el tiempo y posición dentro del pin.

(Fuente: Propia)

Debido a limitantes relacionadas al tiempo de cálculo y procesamiento del computador, alcanzar el estado estable en Ansys bajo las condiciones reales del problema consiste en un imposible para la simulación Pin on block.

Con la mira de alcanzar la estabilidad térmica en ANSYS se emplea la metodología indicada en el estudio de Deshpande [24]. Se reduce el calor específico del pin de Aluminio de tal manera que se aproxime a cero, produciendo que la energía de almacenamiento tienda a ser nula. Para alcanzar la estabilidad se trabaja dentro de ANSYS con un $C=0,088 \left[\frac{J}{kg K} \right]$.

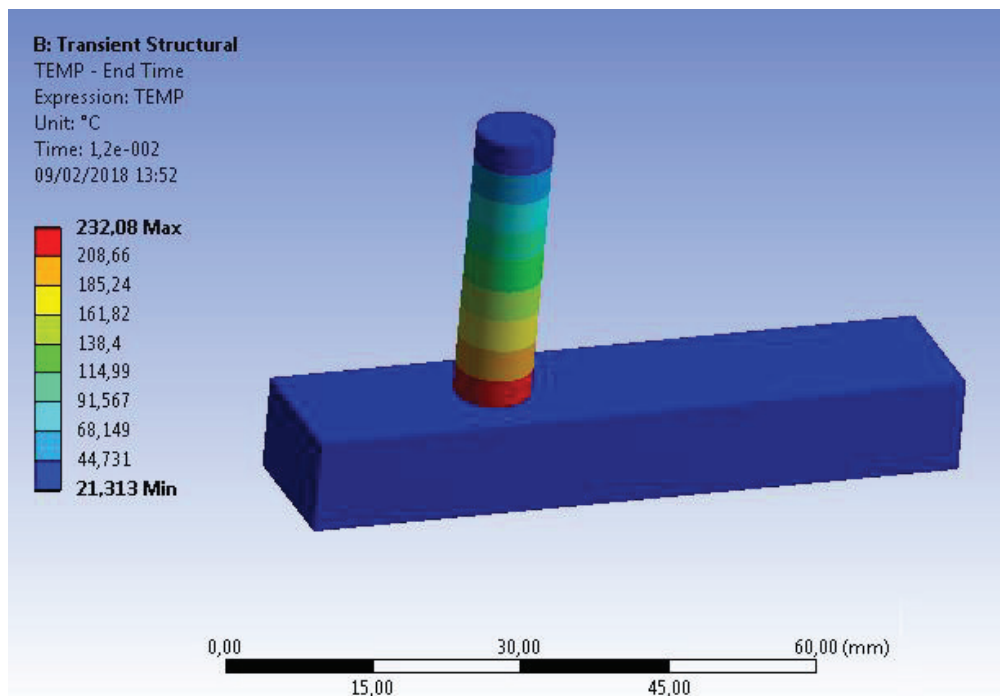


Figura 2.24. Perfil de temperaturas en estado estable a una carga de 50 N en Ansys Workbench.
(Fuente: Propia)

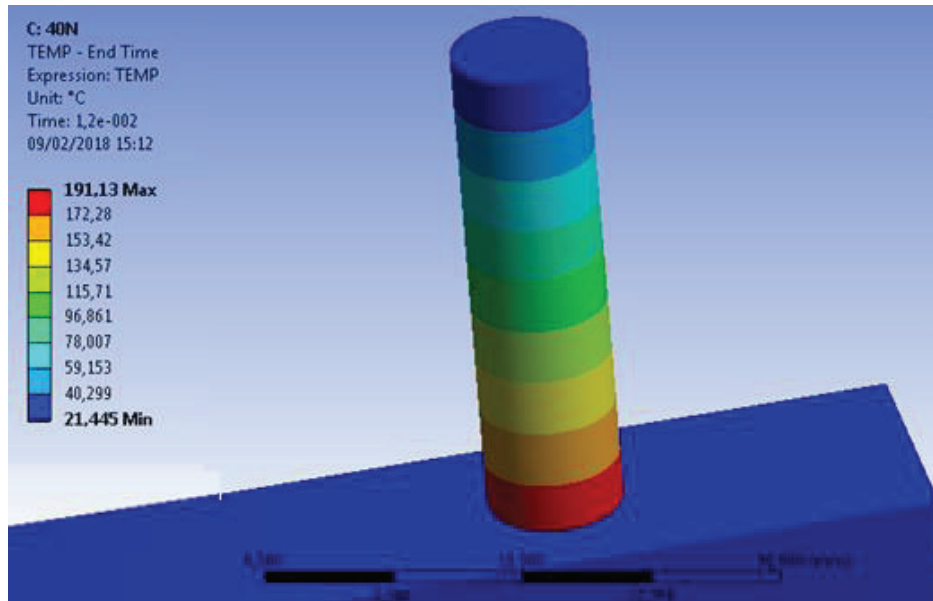


Figura 2.25. Perfil de temperaturas en estado estable a una carga de 40 N en Ansys Workbench.
(Fuente: Propia)

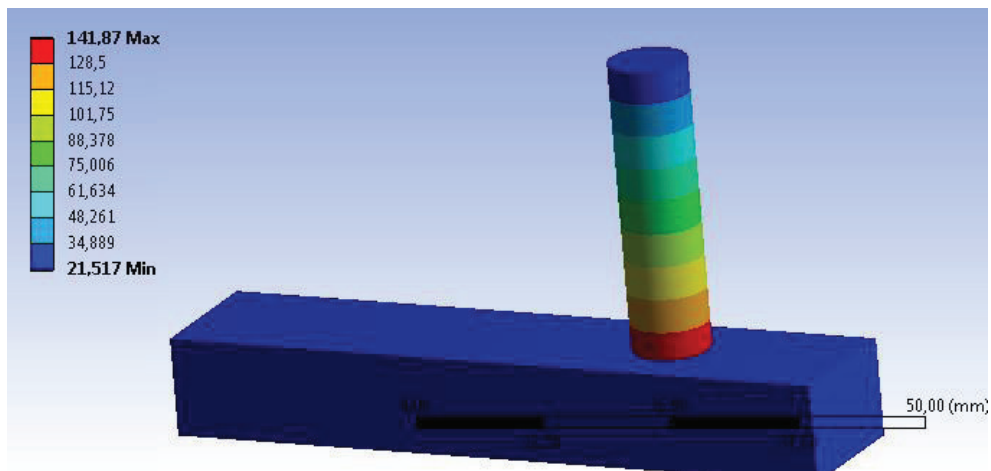


Figura 2.26. Perfil de temperaturas en estado estable a una carga de 30 N en Ansys Workbench.
(Fuente: Propia)

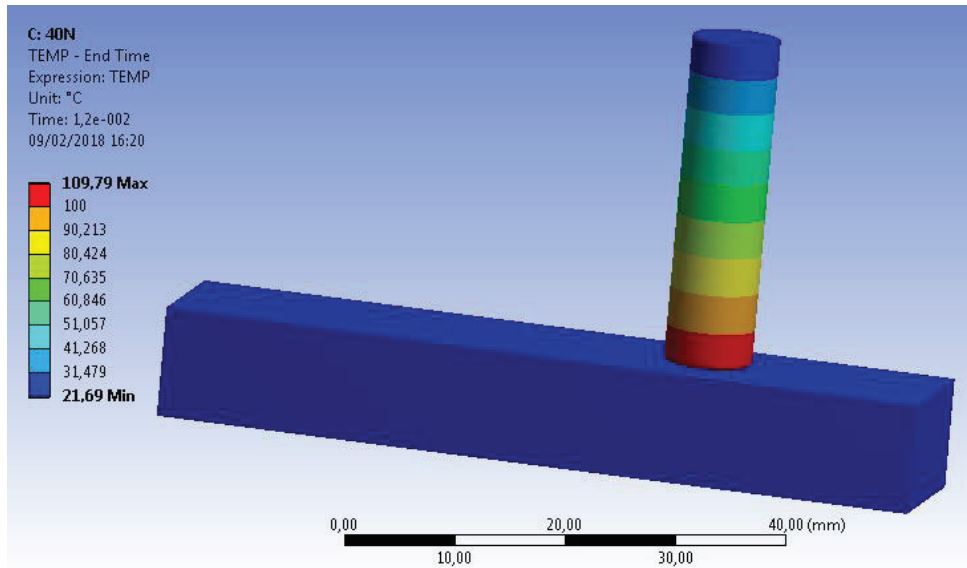


Figura 2.27. Perfil de temperaturas en estado estable a una carga de 20 N en Ansys Workbench. (Fuente: Propia)

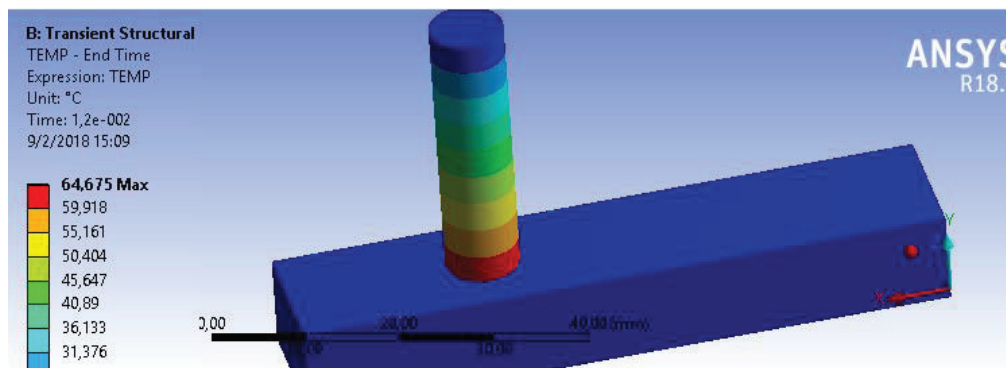


Figura 2.28. Perfil de temperaturas en estado estable a una carga de 10 N en Ansys Workbench. (Fuente: Propia)

Desgaste lineal

Para realizar el análisis del desgaste lineal presente en el pin se considera el modelo de Archard modificado de acuerdo a la Ecuación 1.16. Los valores de las constantes f_1 y f_2 se obtienen de la literatura especializada [12] y se muestran a continuación en las Tablas 2.16 y 2.17 respectivamente.

Tabla 2.16. Constante f1 en función del tipo de movimiento, carga y velocidad.

Modo de movimiento	Presión característica P [psi]	Velocidad [V]	pie/min	f1*
Rotatorio	720 o menor		3,3 o menor	1
			3,3-33	1-1,3
			33-100	1,3-1,8
	720-3600		3,3 o menor	1,5
			3,3-33	1,5-2
			33-100	2-2,7
Oscilatorio	720 o menor		3,3 o menor	1,3
			3,3-100	1,3-2,4
			3,3 o menor	2
			3,3-100	2-3,6
	720-3600		3,3 o menor	2
			3,3-100	2-3,2
			3,3 o menor	3
			3,3-100	3-4,8
Reciprocante	720 o menor		33 o menor	1,5
			33-100	1,5-3,8
	720-3600		33 o menor	2
			33-100	2-7,5
*Valores de f1 con base en resultados sobre un periodo de tiempo de máquina para fabricar automóviles				

(Fuente: [12]. Editado por autores)

Tabla 2.17. Constante f2 en función de la temperatura ambiental y limpieza de la superficie.

Temperatura ambiental, °F	Materia extraña	f2
140 o inferior	No	1.0
140 o inferior	Sí	3.0-6.0
140-210	No	3.0-6.0
140-210	Sí	6.0-12.0

(Fuente: [12]. Editado por autores)

Considerando las presiones de contacto máximas obtenidas en la simulación y la velocidad de operación en la Tabla 2.18 se presenta el valor de la constante f1 para cada carga.

En el caso de la constante f_2 , se considera que el cojinete de fricción deberá presentar en la interfaz de contacto la mayor limpieza superficial posible. En base a la temperatura ambiente seleccionada el valor de la constante será 1.

Para el valor de la constante de desgaste K se toma como valor de referencia el indicado en el documento experimental (Suresh, Prasanna, Basavarajappa, Mahesh & Naresh). Siendo por lo tanto un K en un rango entre $[10^{-3} - 10^{-7}]$ [35]. Para obtener dicho coeficiente se realiza el cálculo para una distancia de deslizamiento de 2000 m, de esta manera se toma como referencia el valor de desgaste lineal experimental [35]. A continuación se presenta un ejemplo de cálculo.

$W=50$ [N]

Desgaste lineal experimental: 0,000338 [m]

Distancia de deslizamiento: 2000 [m]

$$S = v * t_{deslizamiento}$$

$$t_{deslizamiento} = \frac{2000 \text{ [m]}}{3,76 \text{ [m/s]}} = 531,92 \text{ [s]}$$

$$w = f_1 f_2 \frac{K_a}{H} P_c v t$$

$$K_a = \frac{w * H}{f_1 f_2 P_c v t_{deslizamiento}}$$

$$K_a = \frac{0,000338 \text{ [m]} * 588,4 \text{ [MPa]}}{2,088 \text{ [MPa]} * 3,76 \text{ [m/s]} * 532,92 \text{ [s]}} = 0,000048$$

Tabla 2.18. Constante f_1 seleccionada en base a las condiciones de operación.

Fuerza aplicada (N)	Presión de contacto [Mpa] Simulación 2-D	Presión contacto [Psi]	Velocidad [ft/min]	f_1
10	0,3947	57,2465	740,15748	[1,3-1,8]
20	0,7892	114,464		
30	1,1914	172,7983		
40	1,5928	231,0165		
50	1,9895	288,5531		

(Fuente. Propia)

2.3.4. Configuraciones de análisis

La presente sección específica, determina y limita el análisis para la simulación a tratar.

La configuración de análisis permitirá definir:

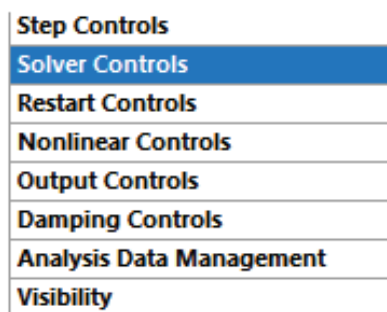
- Tipo de análisis
- Control de inicialización
- Control de duración
- Control de iteración

El tipo de análisis permite indicar a la simulación en que rango de operación se encuentra. Es decir estado transitorio o estado estable. Por defecto la simulación trabaja en estado transitorio y estable, mediante la opción general.

El segundo parámetro dentro de la configuración de análisis es el control de inicialización. La zona de mayor sensibilidad se encuentra en el inicio de la simulación debido a que en éste momento el software comienza a realizar varias iteraciones en búsqueda de la convergencia.

El control de duración limita el tiempo de simulación, definiendo el alcance del mismo en el tiempo. El control de duración de la presente simulación requiere ser definido teniendo en consideración la velocidad del pin junto con la carrera que le permitirá el bloque.

En el control de duración se requiere definir el paso de iteración junto a los sub-pasos de iteración para permitir la convergencia de la simulación.



Step Controls
Solver Controls
Restart Controls
Nonlinear Controls
Output Controls
Damping Controls
Analysis Data Management
Visibility

Figura 2.29. Configuración de análisis.
(Fuente: Propia)

A continuación, se presentan cada uno de los parámetros a introducir en la configuración de análisis.

Controles de pasos (Step controls): El control de los pasos juega un rol muy importante dentro de la convergencia de la simulación y el tiempo computacional de la misma. Para controlar el número de pasos y el tiempo de simulación se utilizan las siguientes herramientas:

Número de pasos (Number of steps): Permite definir el número de pasos en los que se dividirá el tiempo del análisis.

Número de paso actual (Current step number): Una vez definido el número de pasos, ésta herramienta permite ubicar cada paso para su correspondiente configuración.

Paso final (Step end time): Dentro de ésta herramienta se especifica el tiempo final de análisis que tendrá cada paso.

Tipo de discretización (Define by): Permite configurar el tipo de discretización de tiempo de cada paso ya sea por tiempo o por subpasos.

Número de subpasos (Number of substeps): Controla el número de subpasos en el análisis de cada paso.

En la presente simulación se utilizan las siguientes configuraciones de pasos.

Número de pasos : Para la simulación Pin on block se utilizan 6 pasos con el fin de conocer las temperaturas en los tiempos finales de cada paso las cuales se utilizarán en la parte de validación mientras que en la simulación en 2-D al no tener temperaturas se analiza únicamente en un solo paso.

Paso final: En la simulación Pin on block se utiliza un tiempo de análisis final de 0,012 segundos con incrementos de 0,002 segundos por cada paso, éste tiempo depende de la velocidad del pin, así como la distancia del bloque.

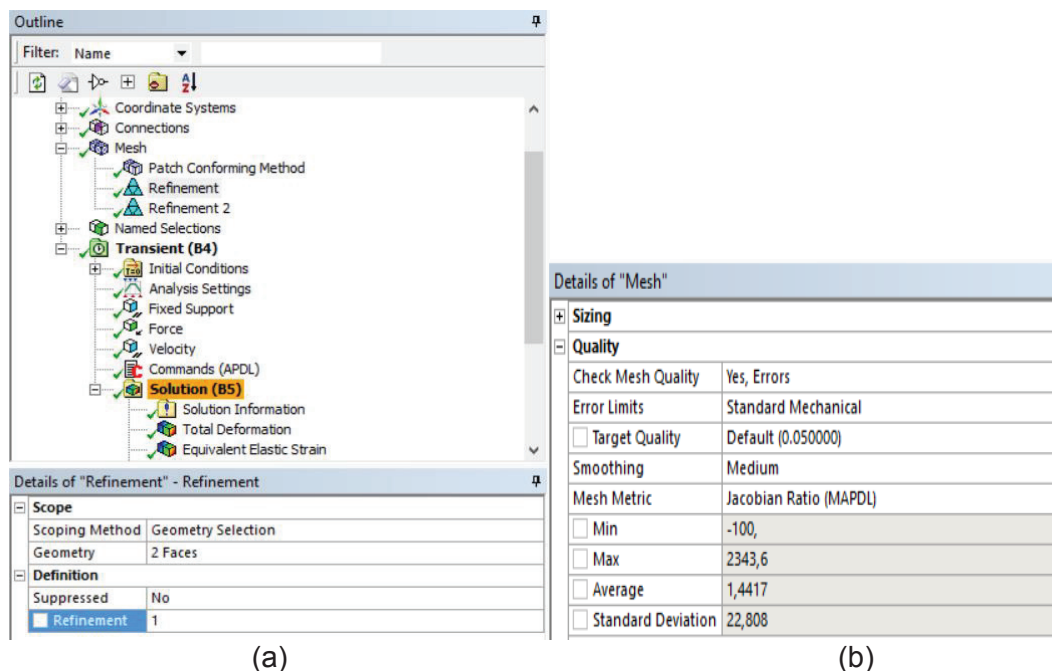
Para la simulación 2-D se utiliza un tiempo final más largo de 0,035 segundos debido a que la longitud del bloque es mayor y al ser una simulación en 2-D el tiempo computacional es mucho menor.

Número de subpasos: El número de subpasos en la simulación Pin on block es de 10 mientras que en la simulación 2-D es de 350. En la simulación 2-D es mayor debido a que el análisis completo se lo realiza en un solo paso.

2.3.5. Análisis de sensibilidad

La configuración de la malla es un parámetro fundamental dentro del análisis de sensibilidad ya que de ésta configuración depende tanto la convergencia del resultado, así como el tiempo de simulación. En el presente análisis se evalúa el criterio de calidad de malla del radio jacobiano, los tiempos de simulación y los resultados obtenidos para la configuración Pin on block a una carga de 50 N. Para éste análisis se toma en cuenta dos configuraciones diferentes de malla.

La primera configuración realiza un mallado tetraédrico tanto en el pin como en el bloque con el método de ajuste de malla (Patch conforming method), con el fin de obtener la mayor precisión en la zona de contacto se realiza un refinamiento bajo de 1 tanto en la superficie superior del bloque como en la cara inferior del pin obteniéndose una calidad de malla de 1,44.



(a) (b)
Figura 2.30. (a) Configuración de malla con refinamiento bajo (b) Calidad de malla.
(Fuente: Propia)

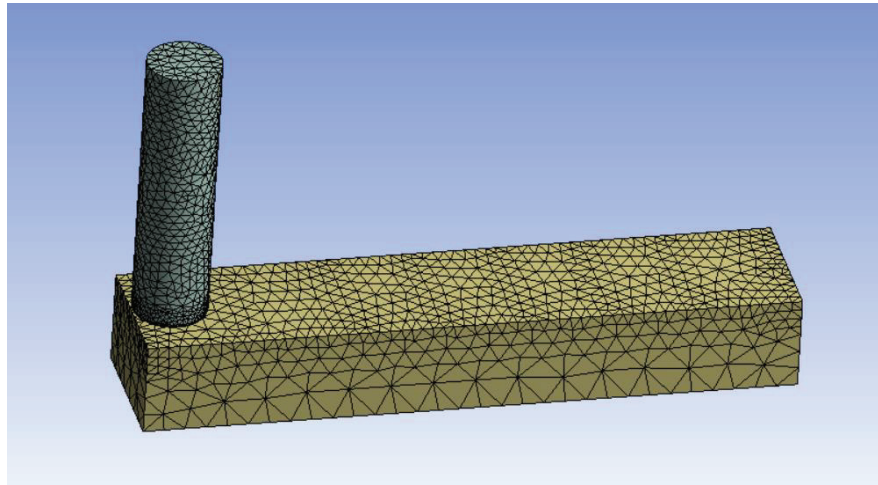


Figura 2.31 Mallado con refinamiento bajo para el modelo pin on block.
(Fuente: Propia)

La segunda configuración realiza un mallado tetraédrico tanto en el pin como en el bloque con el método de ajuste de malla (Patch conforming method), con el fin de obtener la mayor precisión en la zona de contacto se realiza un refinamiento medio tanto en la superficie superior del bloque como en la cara inferior del pin obteniéndose una calidad de malla de 1,09.

Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
Error Limits	Standard Mechanical
<input type="checkbox"/> Target Quality	Default (0.050000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Jacobian Ratio (MAPDL)
<input type="checkbox"/> Min	-100
<input type="checkbox"/> Max	846,56
<input type="checkbox"/> Average	1,0973
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	7,9739

Figura 2.32. (a) Configuración de malla con refinamiento medio. (b) Calidad de malla.
(Fuente: Propia)

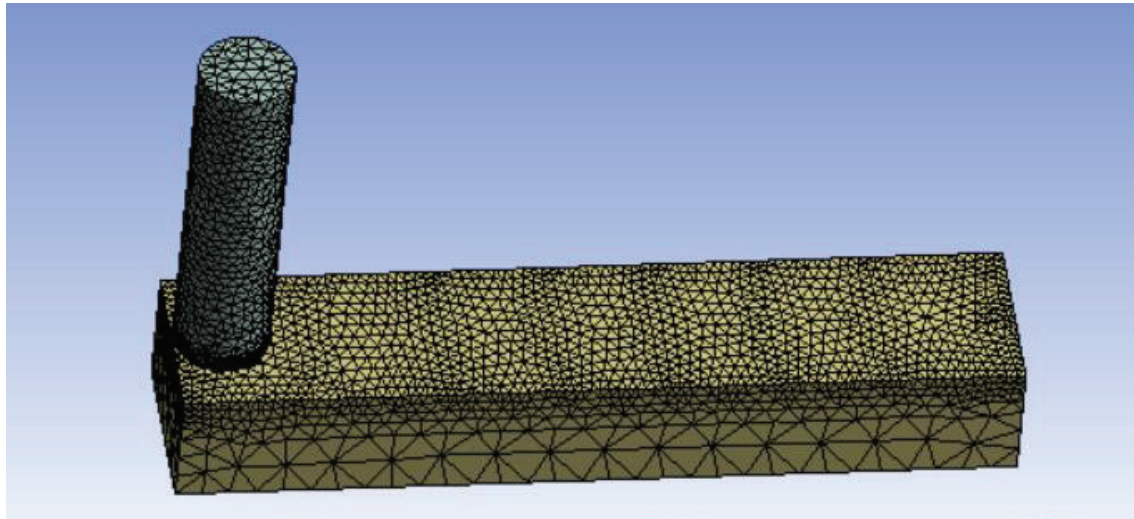


Figura 2.33. Mallado con refinamiento medio para el modelo Pin on block.
(Fuente: Propia)

Como se puede observar en la Tabla 2.19 la configuración de malla con refinamiento medio a pesar que tiene una mejor calidad de malla requiere de un tiempo de simulación mayor a una hora y un error del 7,09 %. La configuración de malla con refinamiento bajo presenta una calidad de malla de 1,44 aceptable teniendo un tiempo de simulación de aproximadamente 23 minutos y un error de tan solo el 5,65 %. Se evidencia que la segunda configuración al tener un mayor número de elementos la solución diverge aún más debido a errores por redondeo lo que conlleva a utilizar la primera configuración de malla para los correspondientes análisis.

Tabla 2.19. Resultados obtenidos en las distintas configuraciones.

Refinamiento	Número de elementos	Radio Jacobiano	Tiempo de simulación	Presión de Contacto	Error
1 (bajo)	15979	1,44	23 m 8 s	1,97	5,651341
2 (medio)	34575	1,09	1 h 8 m	1,94	7,08812261

(Fuente. Propia)

2.4. Desempeño de simulación

2.4.1. Solución

El proceso de solución esta precedido por una secuencia de cálculos que predicen el comportamiento de una estructura, fluido u objeto en análisis dependiendo del módulo utilizado en ANSYS. Dentro de la solución podemos visualizar el comportamiento del

sistema ya sea por gráficos, tablas y el comportamiento del mismo a través del tiempo mediante una animación.

Las simulaciones del presente trabajo son realizadas en el módulo Transitorio estructural acoplado a un análisis térmico en el mismo módulo. Las soluciones utilizadas para el análisis se presentan en las Figuras 2.30 y 2.31 y se detallan a continuación.

Deformación total (Total Deformation): Permite determinar la deformación total que experimentan los elementos analizados ya sea individualmente o de todo el sistema.

Deformación elástica equivalente (Equivalent Elastic Strain): Debido a que los elementos se encuentran sometidos a distintas cargas ya sean estructurales o térmicas, éstos experimentan una deformación la cual es analizada en esta solución.

Esfuerzo equivalente (Equivalent Stress): Determina los esfuerzos elásticos equivalentes a los que están sometidos los elementos.

Herramienta de contacto (Contact Tool): La zona de contacto en el análisis Pin on block así como en la simulación 2-D es de mucho interés ya que es allí donde se generan las máximas presiones y temperaturas.

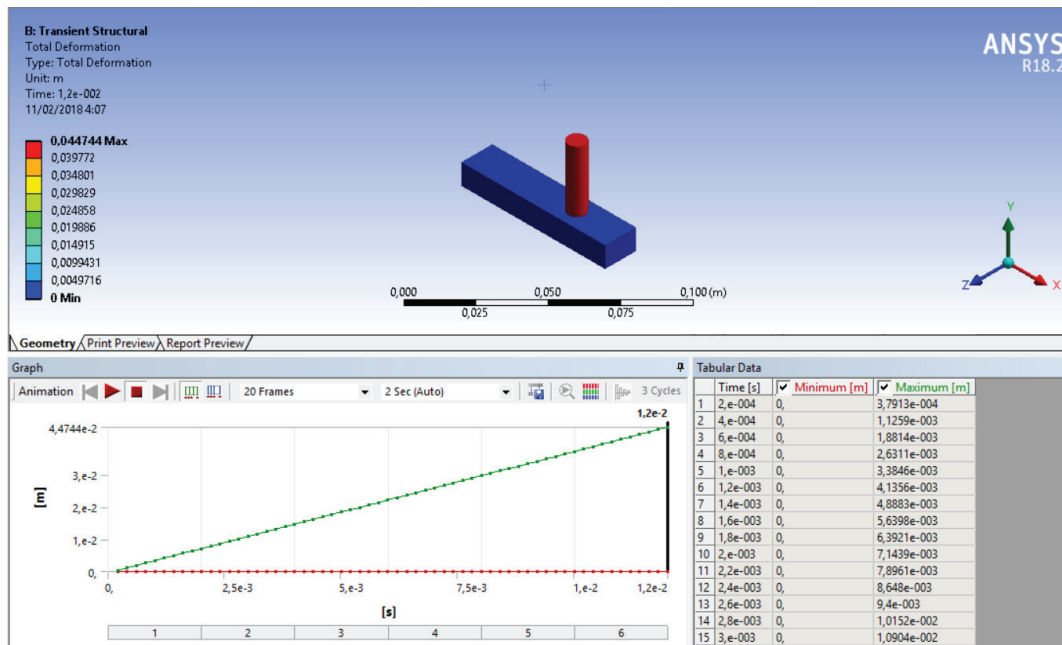


Figura 2.34. Solución del modelo Pin on block.
(Fuente: Propia)

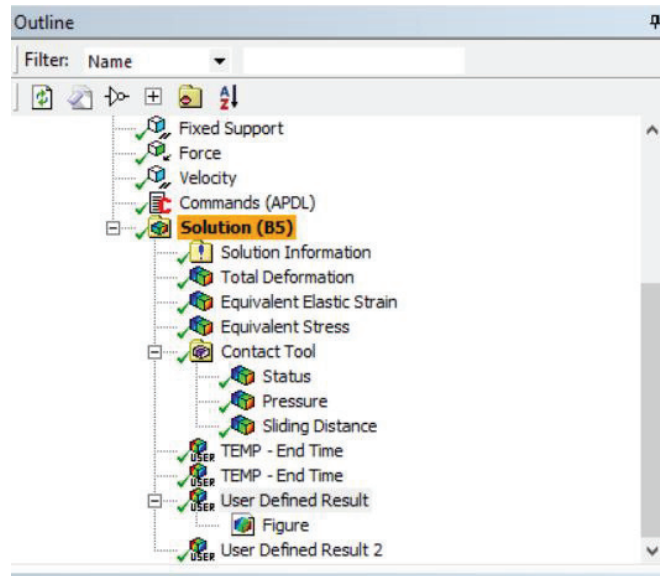


Figura 2.35. Soluciones utilizadas en la configuración Pin on block.
(Fuente: Propia)

Dentro de ésta carpeta se encuentran distintas herramientas que ayudan a analizar ésta zona de una mejor manera. Dentro de las más importantes se encuentran:

Estado de contacto (Contact status): Muestra el tipo de contacto que tienen los elementos, éstos pueden encontrarse lejos, cerca, deslizándose o desgarrándose dependiendo del caso.

Presión (Pressure): Muestra la distribución de presiones en la zona de contacto.

Distancia de deslizamiento (Sliding distance): Éste parámetro determina la distancia de deslizamiento del elemento móvil en éste caso el pin.

Resultado definido por el usuario (User Defined Result): Debido a que en el módulo Transitorio estructural no es posible definir cargas directamente sino con comandos APDL, así mismo en las soluciones es necesario especificar el tipo de resultado que se requiere para la obtención de la distribución de temperaturas. Una vez seleccionado el elemento SOLID 226 o SOLID 227 las soluciones para el análisis térmico se muestran automáticamente en ésta herramienta.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados

El presente trabajo se enfoca en determinar tanto la distribución de presiones como de temperaturas en la superficie de contacto en los cojinetes de fricción. En base a los resultados obtenidos se procesa la información para predecir el desgaste en cojinetes de fricción.

Para la validación de las simulaciones realizadas se utilizan los datos de presiones obtenidas en el estudio de Suresh et al [35] (ver Tabla 3.1 y Figura 3.1), mientras que el análisis térmico se valida en base al modelo analítico del sólido semi-infinito y mediante la discretización implícita del fenómeno térmico (ver Figura 3.4.). El desgaste del cojinete se valida en base a la consideración planteada en literatura especializada [12].

La presente sección se divide en tres partes. Enfocada la primera a los resultados de presiones, mientras que la segunda está enfocada a los resultados de temperatura. Finalmente se plantea el desgaste lineal del pin asociado a los resultados obtenidos en la simulación.

3.1.1. Resultados distribución de presiones

Se plantean dos simulaciones distintas con el fin de desarrollar un perfil de presiones en la zona de contacto del pin. Los resultados de presiones de contacto máximas obtenidos se muestran en la Tabla 3.2.

La Figura 3.2 indica las presiones de contacto máximas obtenidas en las simulaciones a distintas cargas comparadas a los valores de referencia obtenidos de Suresh.

Tabla 3.1. Presión de contacto obtenido de manera experimental y mediante elementos finitos por Suresh, 2017.

Carga [N]	Presión [MPa]	
	Simulación de Suresh et al	Experimental
10	0,46	0,42
20	0,93	0,85
30	1,38	1,25
40	1,82	1,69
50	2,2303	2,088

(Fuente: [35])

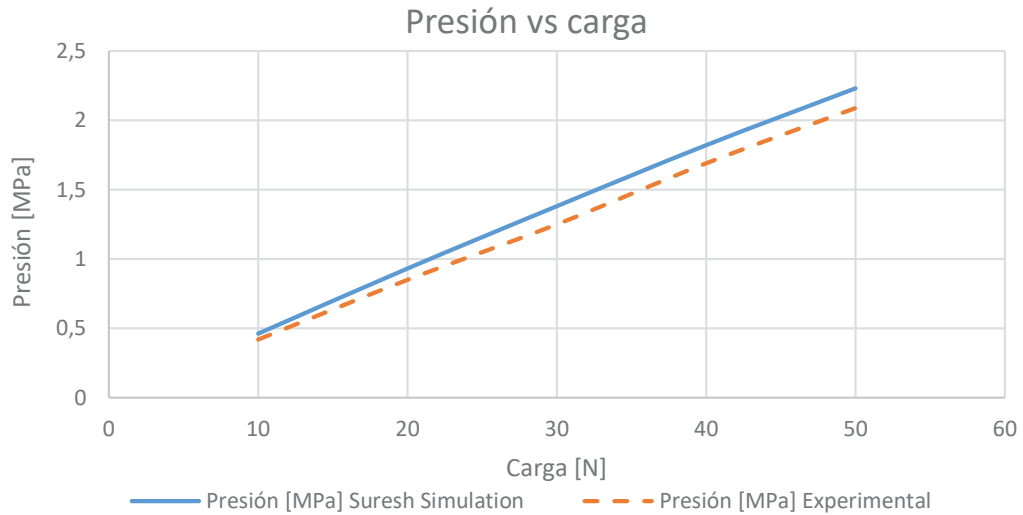


Figura 3.1. Presiones de contacto obtenidos en Suresh.
(Fuente: [35])

Tabla 3.2. Presión de contacto a distintas cargas en Ansys Workbench.

Carga aplicada (N)	Presión de contacto (Mpa)			
	Simulación de Suresh	Experimental	Simulación 2-D	Simulación 3-D
10	0,46	0,42	0,3886	0,3947
20	0,93	0,85	0,7773	0,7892
30	1,38	1,25	1,166	1,1914
40	1,82	1,69	1,554	1,5928
50	2,2303	2,088	1,9433	1,9895

(Fuente: Propia)

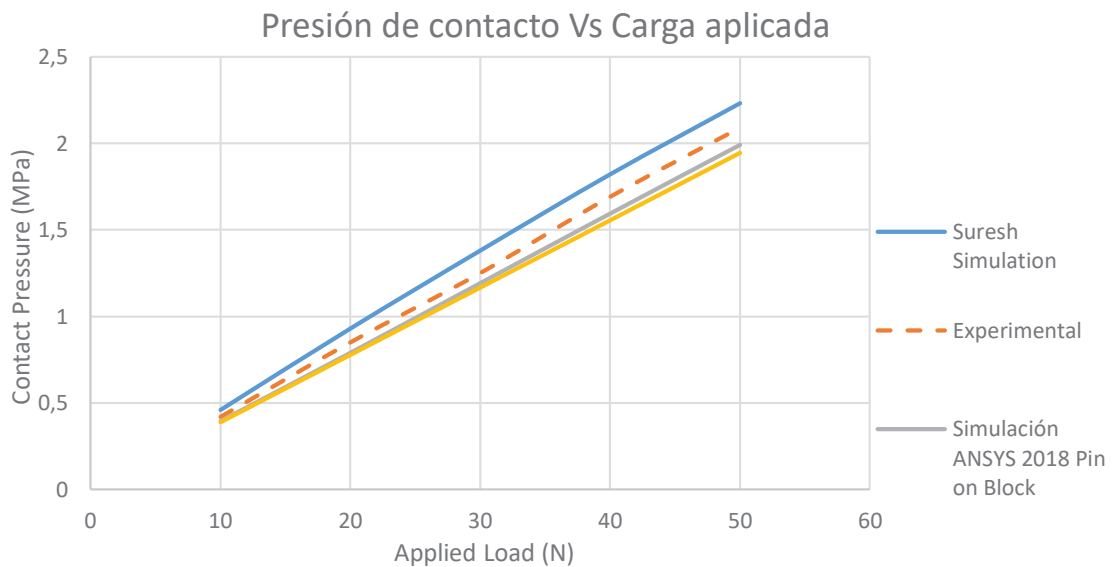


Figura 3.2. Presiones de contacto vs carga aplicada publicado en Suresh y simulaciones realizadas en el estudio.
(Fuente: [35])

El error relacionado a cada simulación con respecto a los resultados experimentales se presenta en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Errores calculados para las presiones de contacto a distintas cargas.

Fuerza aplicada (N)	% Error		
	Simulación de Suresh	Simulación 2-D	Simulación
10	9,524%	7,476%	6,024%
20	9,412%	8,553%	7,153%
30	10,400%	6,720%	4,688%
40	7,692%	8,047%	5,751%
50	6,815%	6,930%	4,717%

(Fuente. Propia)

La distribución de presiones en el modelo de simulación Pin on block se presenta en las Figuras 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 y 3.7 a las cargas de análisis.

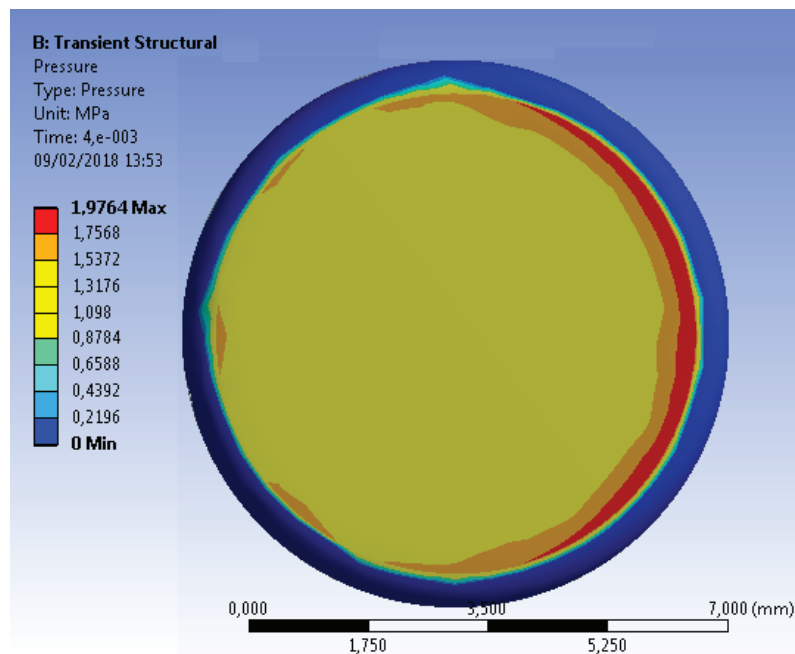


Figura 3.3. Distribución de presión de contacto en MPa en la cara de contacto del pin de Al bajo una carga de 50N.

(Fuente: Propia)

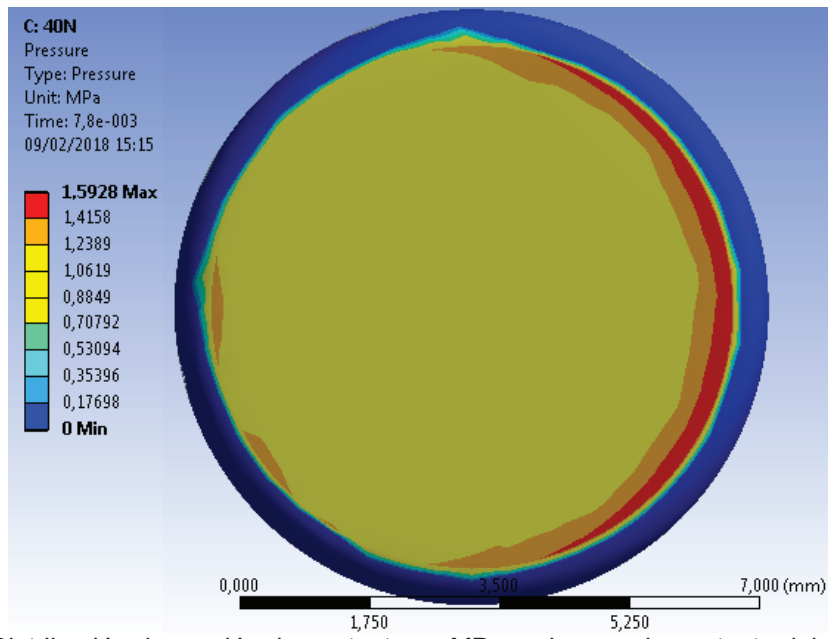


Figura 3.4. Distribución de presión de contacto en MPa en la cara de contacto del pin de Al bajo una carga de 40N.
 (Fuente: Propia)

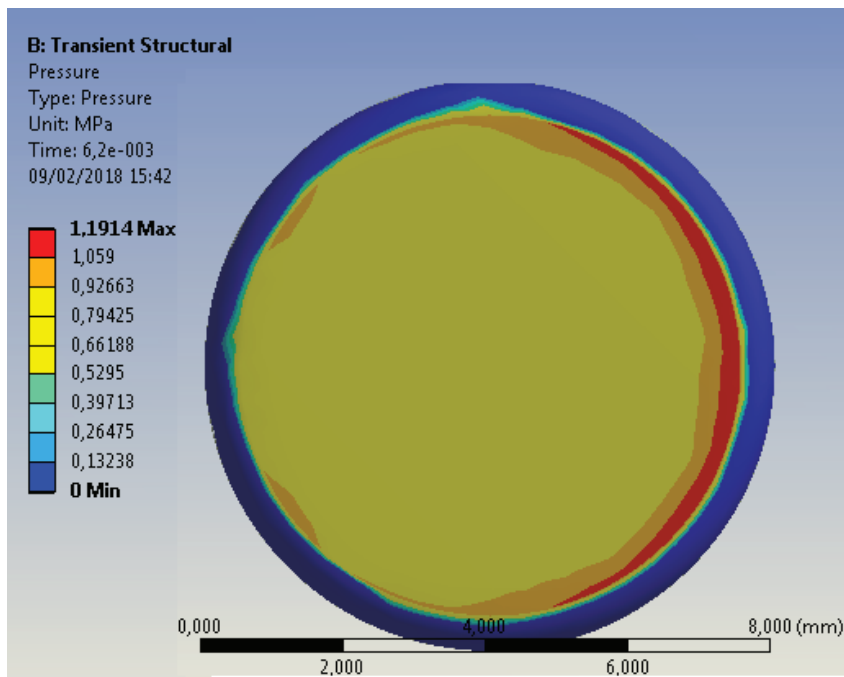


Figura 3.5. Distribución de presión de contacto en MPa en la cara de contacto del pin de Al bajo una carga de 30N.
 (Fuente: Propia)

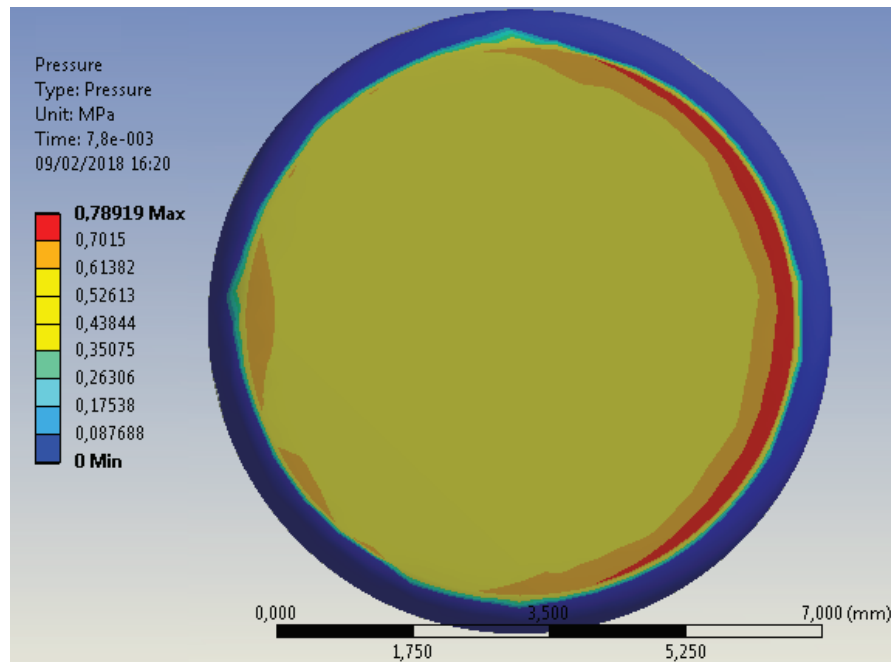


Figura 3.6. Distribución de presión de contacto en MPa en la cara de contacto del pin de Al bajo una carga de 20N.
(Fuente: Propia)

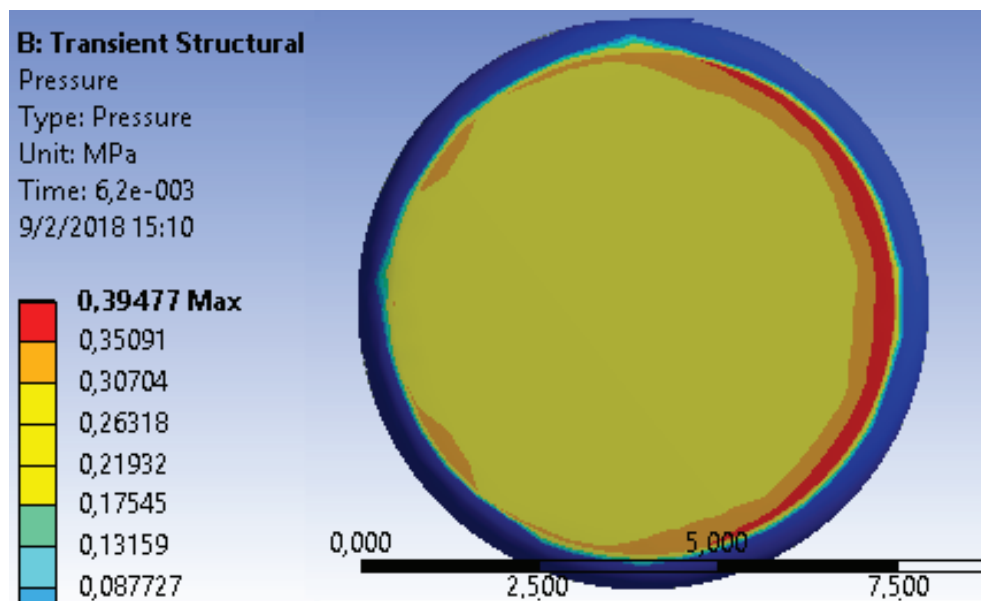


Figura 3.7. Distribución de presión de contacto en MPa en la cara de contacto del pin de Al bajo una carga de 10N.
(Fuente: Propia)

3.1.2. Resultados distribución de temperaturas

La distribución de temperaturas en el pin presenta dos tipos de resultados; en estado transitorio y en estado estable.

3.1.2.1. Estado Transitorio

La distribución de temperaturas en estado transitorio tiene como piloto de validación al modelo analítico del sólido semi-infinito, modelo válido a tiempos iniciales [23].

Las gráficas de temperaturas en la superficie del pin bajo el modelo analítico a distintas cargas se presentan en la Figura 3.8 y los valores de temperatura respecto al tiempo se muestran en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Temperatura superficial en el pin bajo distintas cargas en estado transitorio.

Analítico					
tiempo (s)	50 N	40 N	30 N	20 N	10 N
	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)
0	22	22	22	22	22
0,002	25,06	24,45	23,83	23,22	22,61
0,004	26,32	25,46	24,59	23,70	22,86
0,006	27,30	26,24	25,18	24,12	23,06
0,008	28,12	26,89	25,67	24,45	23,22
0,01	28,84	27,47	26,10	24,73	23,37
0,012	29,49	27,99	26,49	25,00	23,50

(Fuente. Propia)

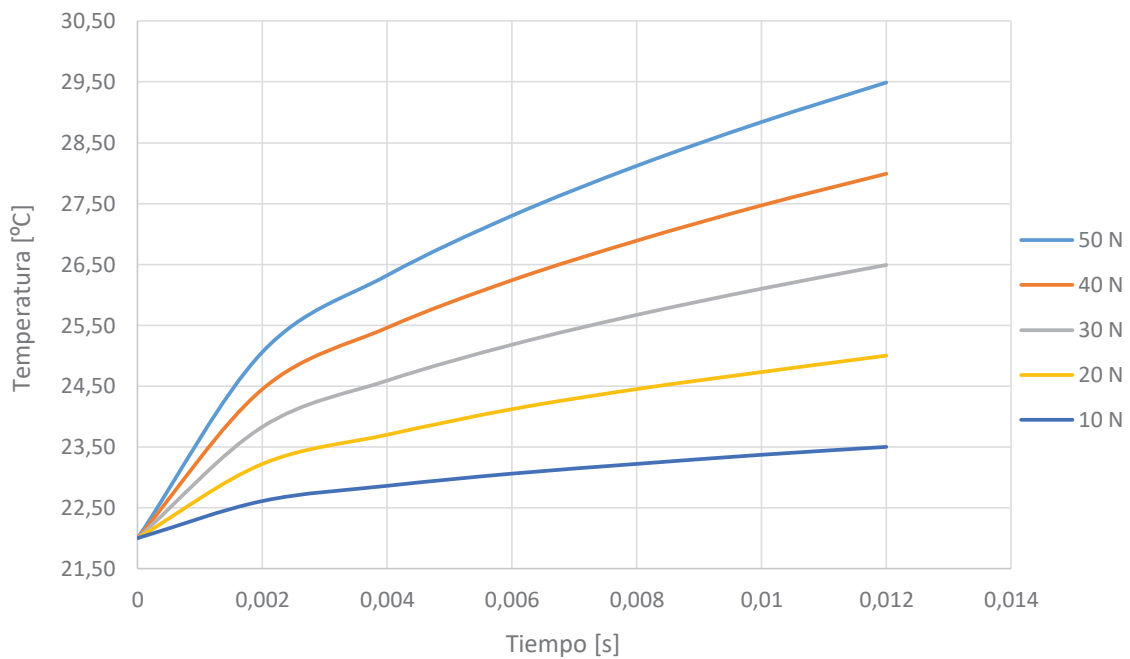


Figura 3.8. Temperatura superficial en el pin vs tiempo mediante el método del sólido semi-infinito. (Fuente: Propia)

La simulación Pin on block realizada en ANSYS durante el tiempo inicial, presenta una temperatura superficial en el contacto del pin en estado transitorio tal como indica la Figura 3.9. Los valores de temperatura a distintas cargas se presentan en la Tabla 3.5.

Tabla 3.5. Temperatura superficial en el pin bajo distintas cargas en el modelo Pin on block.

Simulación					
tiempo (s)	50 N	40 N	30 N	20 N	10 N
	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)
0	22	22	22	22	22
0,002	26,335	25,521	24,479	23,794	22,803
0,004	27,879	26,767	25,367	24,429	23,105
0,006	29,016	27,692	26,021	24,903	23,325
0,008	29,941	28,438	26,567	25,292	23,509
0,01	30,755	29,095	27,043	25,619	23,664
0,012	31,489	29,686	27,461	25,919	23,804

(Fuente: Propia)

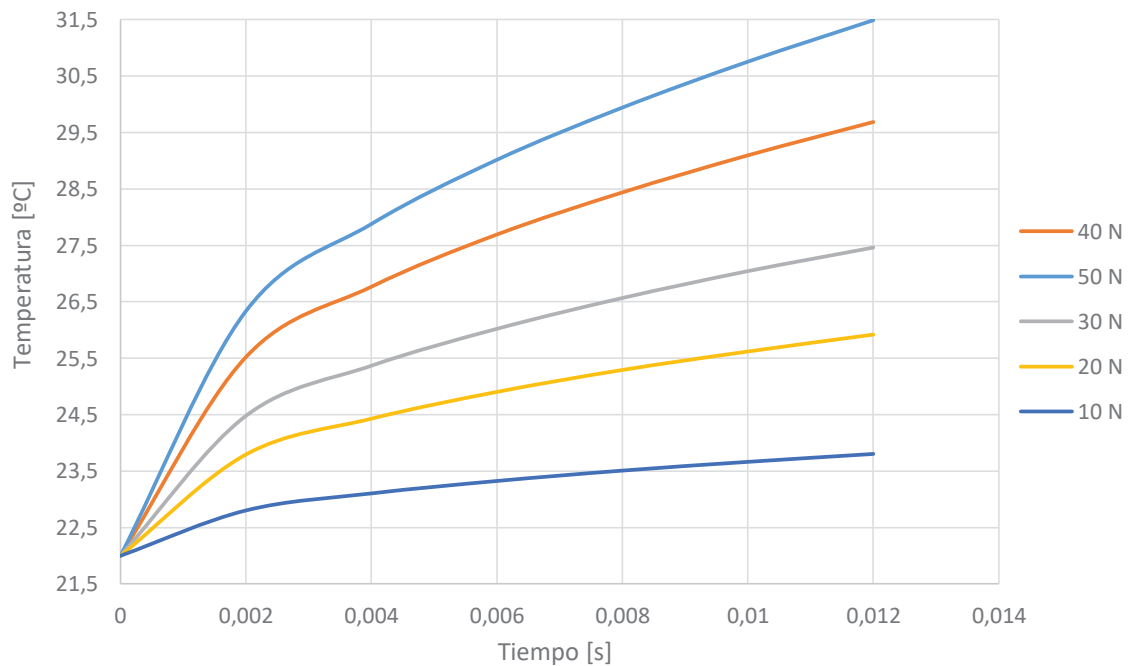


Figura 3.9. Temperatura superficial en el pin vs tiempo simulación Pin on block.

(Fuente: Propia)

La Figura 3.10. presenta el cambio de la temperatura en el tiempo de ambos métodos. El error asociado a la simulación con respecto al método analítico se presenta en la Tabla 3.6.

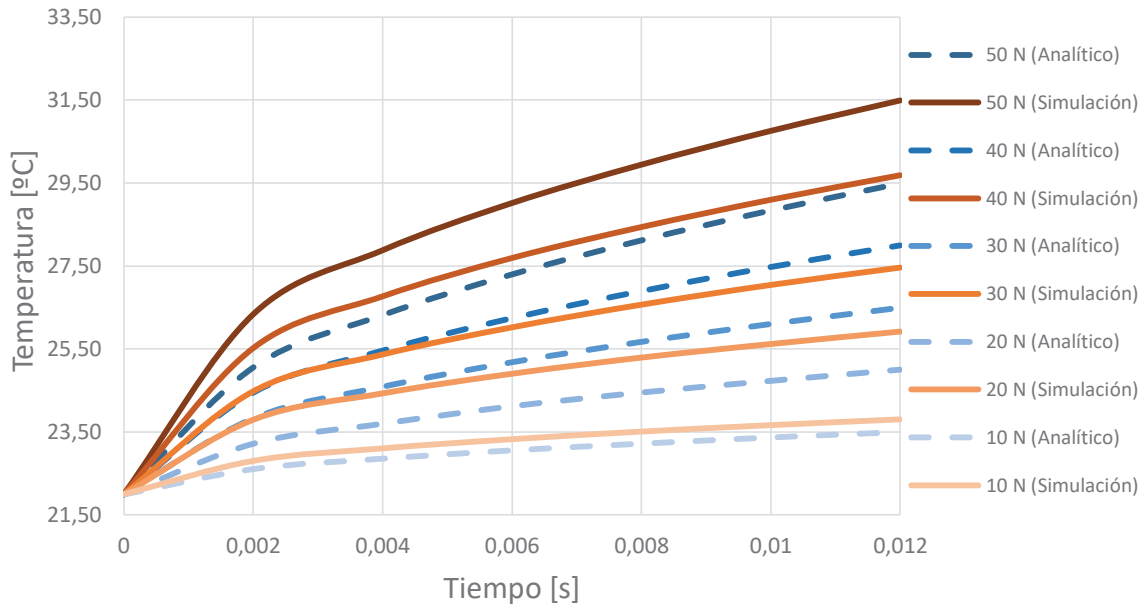


Figura 3.10. Perfiles de temperaturas superficiales en el pin en estado transitorio tanto del método analítico como de la simulación Pin on block en Ansys.
(Fuente: Propia)

Tabla 3.6. Error absoluto entre la temperatura superficial en estado transitorio entre el modelo pin on block y modelo sólido semi-infinito.

tiempo (s)	50 N	40 N	30 N	20 N	10 N
	Error [%]	Error [%]	Error [%]	Error [%]	Error [%]
0	0	0	0	0	0
0,002	5,088	4,380	2,723	2,472	0,854
0,004	5,923	5,134	3,160	3,076	1,072
0,006	6,286	5,534	3,340	3,246	1,149
0,008	6,476	5,757	3,494	3,444	1,245
0,01	6,640	5,916	3,613	3,595	1,258
0,012	6,779	6,059	3,666	3,676	1,294

(Fuente: Propia)

Las Figuras 3.11, 3.12, 3.13, 3.14, y 3.15 presentan el perfil de temperaturas vs el tiempo en cada carga tanto del modelo analítico y Pin on block.

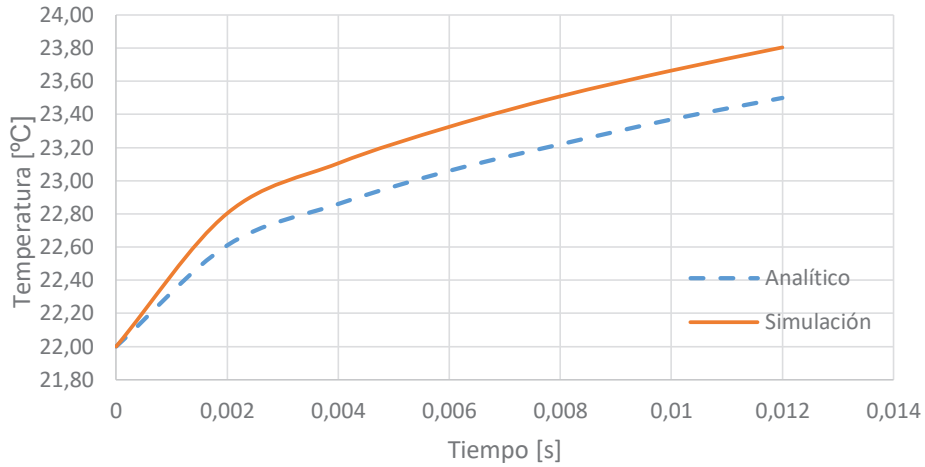


Figura 3.11. Perfiles de temperaturas superficiales en el pin vs tiempo a una carga de 10 N. (Fuente: Propia)

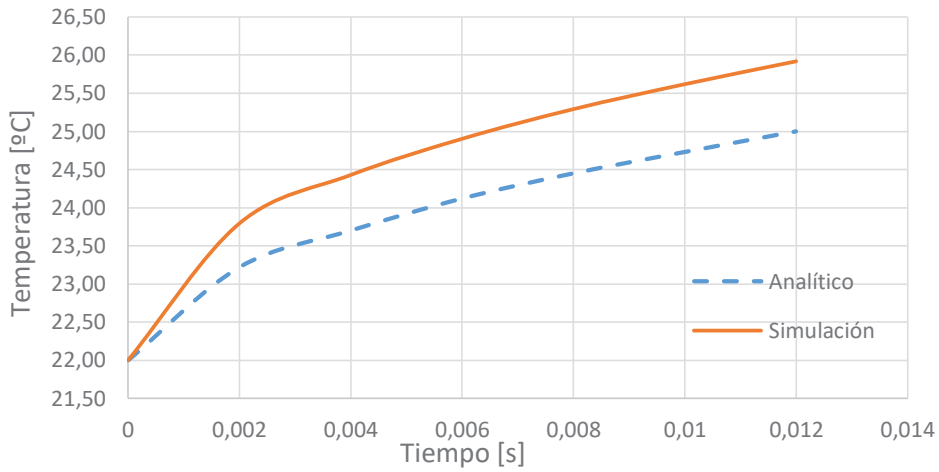


Figura 3.12. Perfiles de temperaturas superficiales en el pin vs tiempo a una carga de 20 N. (Fuente: Propia)

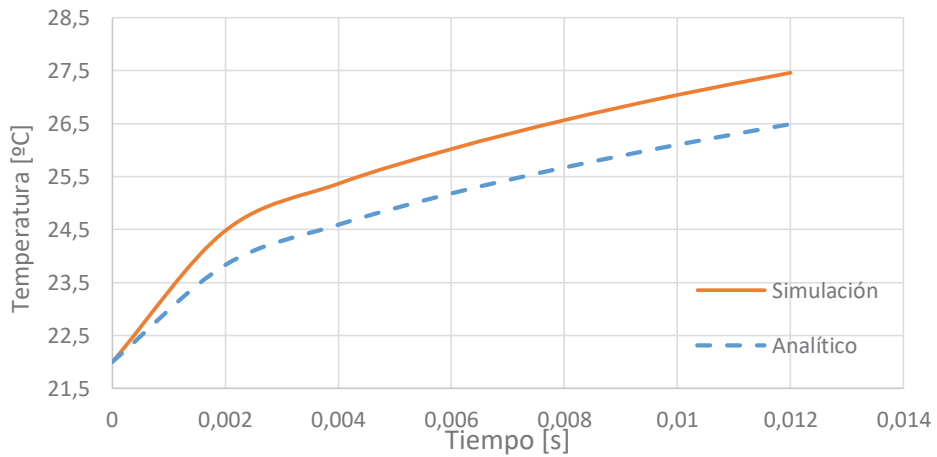


Figura 3.13. Perfiles de temperaturas superficiales en el pin vs tiempo a una carga de 30 N. (Fuente: Propia)

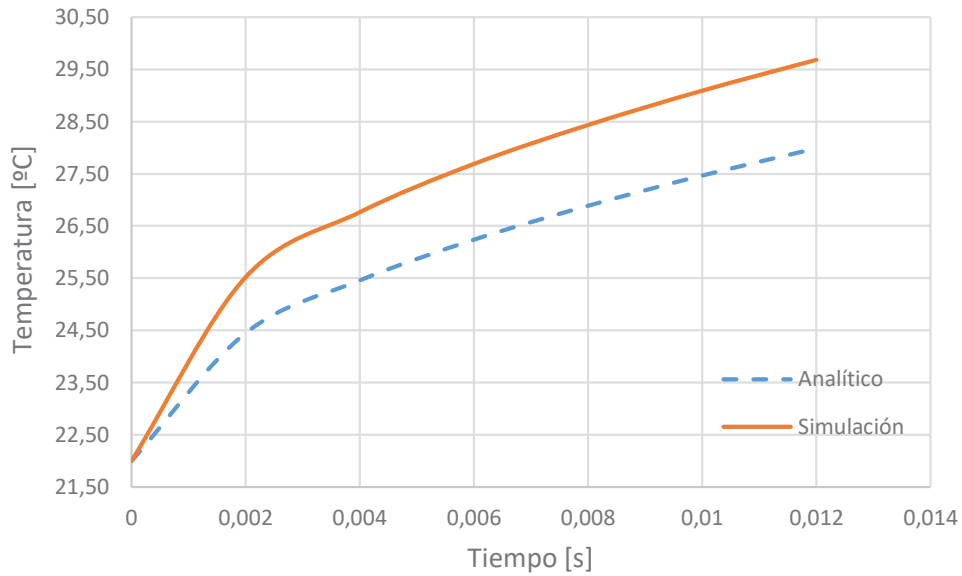


Figura 3.14. Perfiles de temperaturas superficiales en el pin vs tiempo a una carga de 40 N. (Fuente: Propia)

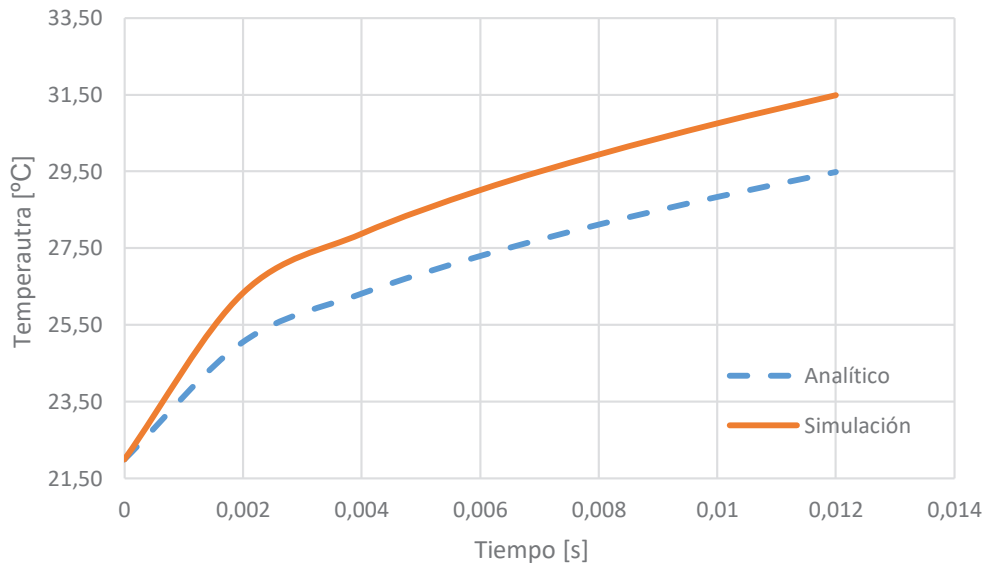


Figura 3.15. Perfiles de temperaturas superficiales en el pin vs tiempo a una carga de 50 N. (Fuente: Propia)

3.1.2.2. Estado Estable

Mediante el uso de un método numérico se plantea el análisis térmico para cualquier tiempo y procede a su resolución en Matlab. Los resultados del análisis numérico desarrollado en Matlab se exponen cómo la base de sustentación de temperaturas para el estado estable.

En la Figura 3.16 se presenta el perfil de temperaturas en el tiempo hasta llegar a la estabilidad, mientras en la Figura 3.17. se presenta la estabilidad de temperaturas en el tiempo para una carga de 50 N.

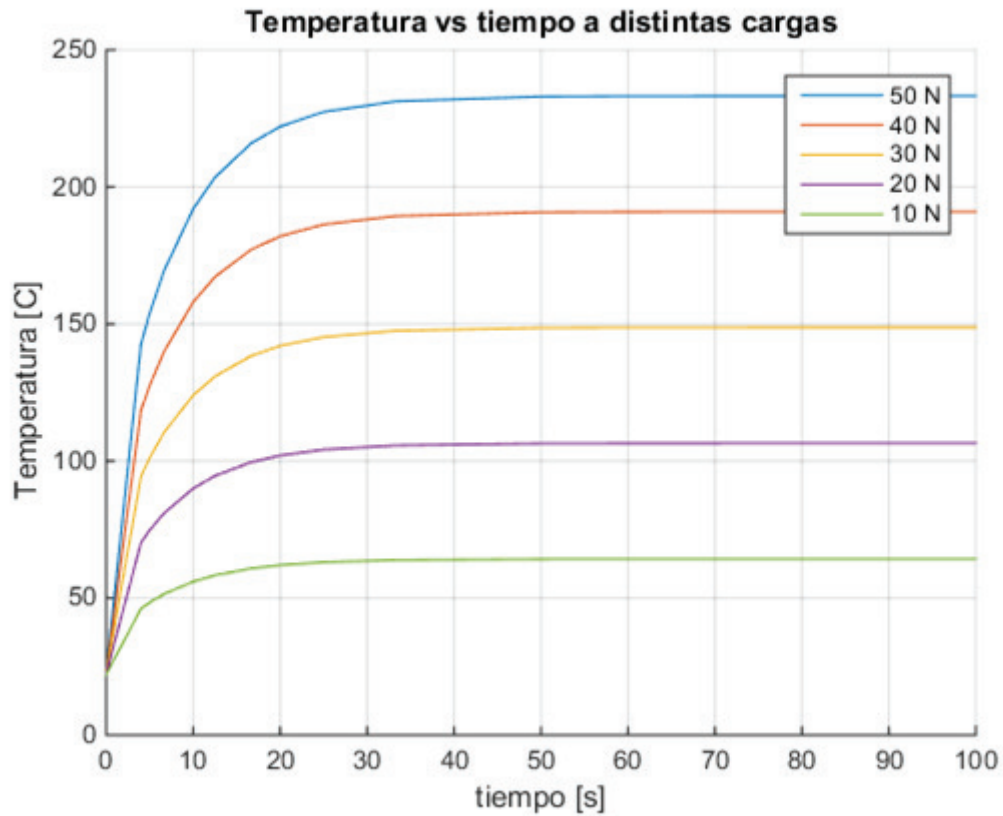


Figura 3.16. Perfiles de temperaturas superficiales en el pin vs tiempo, obtenido mediante análisis numérico en Matlab.
(Fuente: Propia)

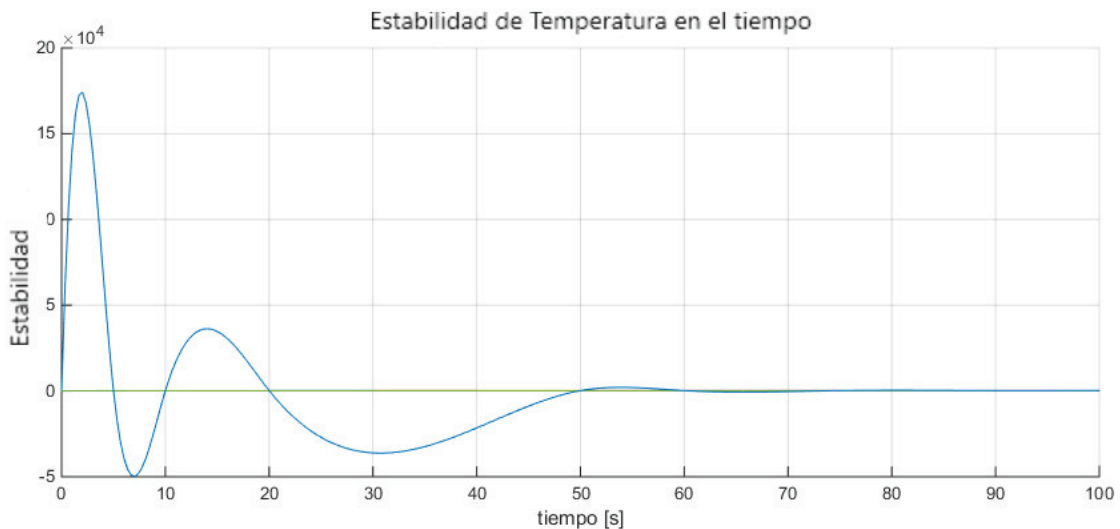


Figura 3.17. Estabilidad de temperatura superficial en el pin en tiempo bajo una carga de 50 N.
(Fuente: Propia)

La temperatura de estabilización varía dependiendo de la carga aplicada pues el calor generado en la interfaz de contacto se encuentra en función de la carga. Se presenta en las Figuras 3.18. y 3.19. el perfil de temperaturas hasta alcanzar la estabilidad bajo una carga de 30 N mediante el método numérico en Matlab y Ansys respectivamente.

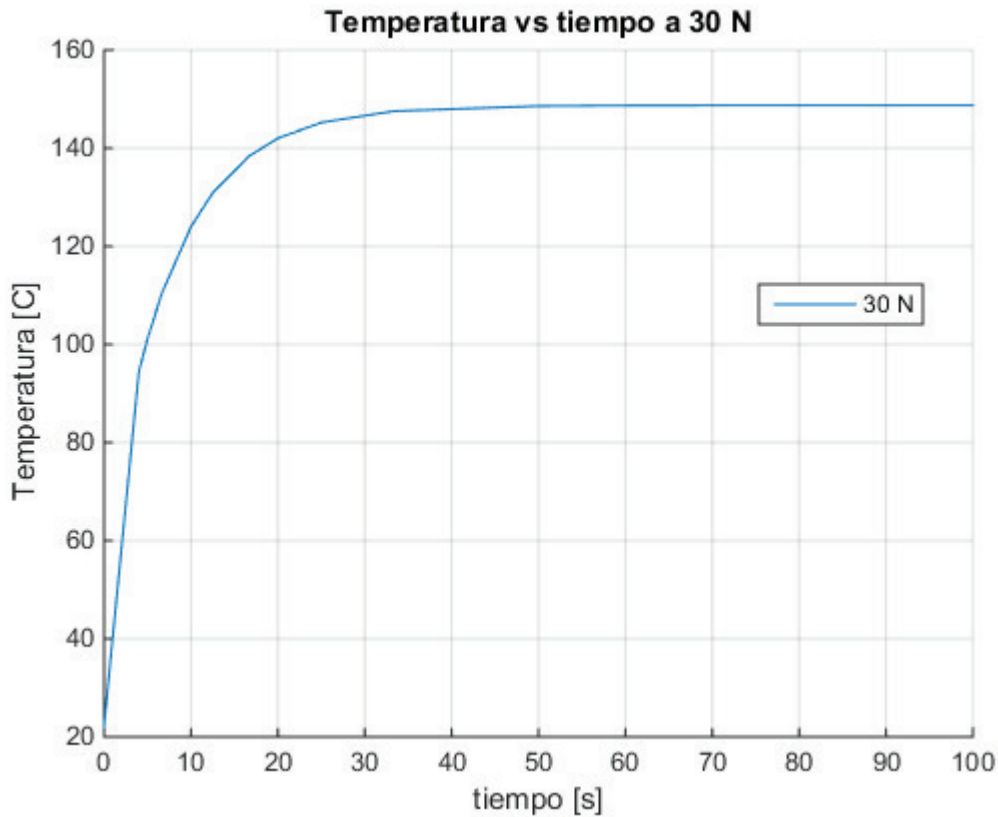


Figura 3.18. Perfil de temperatura superficial en el pin en tiempo hasta alcanzar la estabilidad a una carga de 30 N bajo el análisis numérico en Matlab.
(Fuente: Propia)

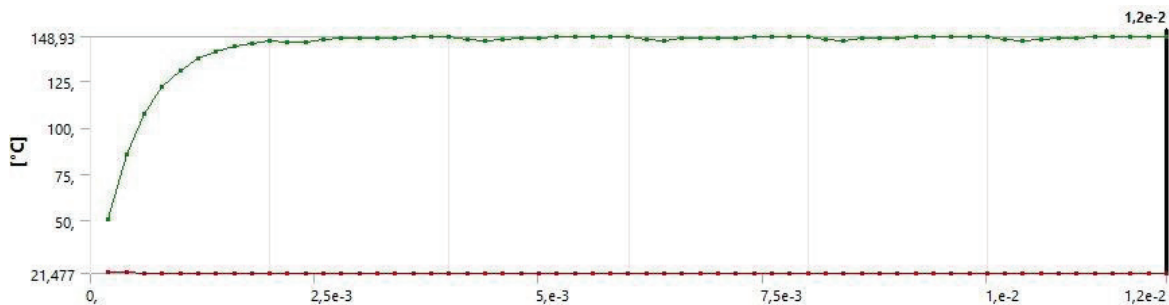


Figura 3.19. Perfil de temperatura superficial en el pin en tiempo hasta alcanzar la estabilidad a una carga de 30 N en la simulación en Ansys.
(Fuente: Propia)

El error en la temperatura de estabilización entre el análisis numérico y la simulación de Matlab se presenta en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Error absoluto de la temperatura de estabilidad entre el modelo Pin on block y el modelo de análisis numérico.

Carga	50 N	40 N	30 N	20 N	10 N
Temperatura de estabilidad M. numérico Matlab [°C]	233,2	190,96	148,72	106,48	64,24
Temperatura de estabilidad Simulación ANSYS [°C]	232,00	191,13	148,93	109,79	64,66
Error [%]	0,515	0,089	0,141	3,109	0,649

(Fuente: Propia)

3.1.3. Desgaste lineal

En base a las presiones y temperaturas obtenidas de la simulación se puede determinar el desgaste lineal que presenta un cojinete de fricción. Considerando los resultados de Suresh se determina un coeficiente de desgaste lineal adhesivo promedio que se encuentre dentro del rango de referencia obtenido en la literatura especializada [35]. Se presenta en la Tabla 3.8. los valores de K obtenidos a cada carga.

Tabla 3.8. Coeficiente de desgaste adhesivo a distintas cargas.

Carga aplicada (N)	Presión de contacto experimental [Mpa]	Ka
10	0,42	0,000084
20	0,85	0,000048
30	1,25	0,000045
40	1,69	0,000047
50	2,088	0,000048
Coefficiente de desgaste promedio		5,44E-05

(Fuente: Propia)

En base al coeficiente de desgaste adhesivo calculado se presenta en la Tabla 3.9. el desgaste lineal para cada simulación, junto con los valores de referencia [35]. En la Figura 3.20. se presenta el desgaste lineal de los distintos modelos, mientras en la Tabla 3.10. los errores asociados a cada modelo.

Tabla 3.9. Desgaste lineal en los distintos modelos desarrollados en el trabajo.

Carga aplicada (N)	Desgaste lineal experimental [m]	Desgaste lineal Suresh simulación [m]	Desgaste lineal Simulación 2-D [m]	Desgaste lineal Simulación 3-D [m]
10	1,20E-04	9,00E-05	7,18E-05	7,29E-05
20	1,40E-04	1,50E-04	1,44E-04	1,46E-04
30	1,90E-04	2,20E-04	2,15E-04	2,20E-04
40	2,70E-04	2,95E-04	2,87E-04	2,94E-04
50	3,38E-04	3,63E-04	3,59E-04	3,68E-04

(Fuente: Propia)

Tabla 3.10. Error absoluto del desgaste lineal calculado para los distintos modelos desarrollados en el trabajo.

Carga aplicada (N)	Desgaste lineal Suresh simulación error [%]	Desgaste lineal simulación 2-D error [%]	Desgaste lineal simulación 3-D error [%]
10	25%	40%	39%
20	7%	3%	4%
30	16%	13%	16%
40	9%	6%	9%
50	7%	6%	9%

(Fuente: Propia)

Considerado los resultados obtenidos para el desgaste lineal en contacto plano se presenta bajo las consideraciones de Shigley [12] el desgaste lineal en cojinetes de fricción en la Tabla 3.11.

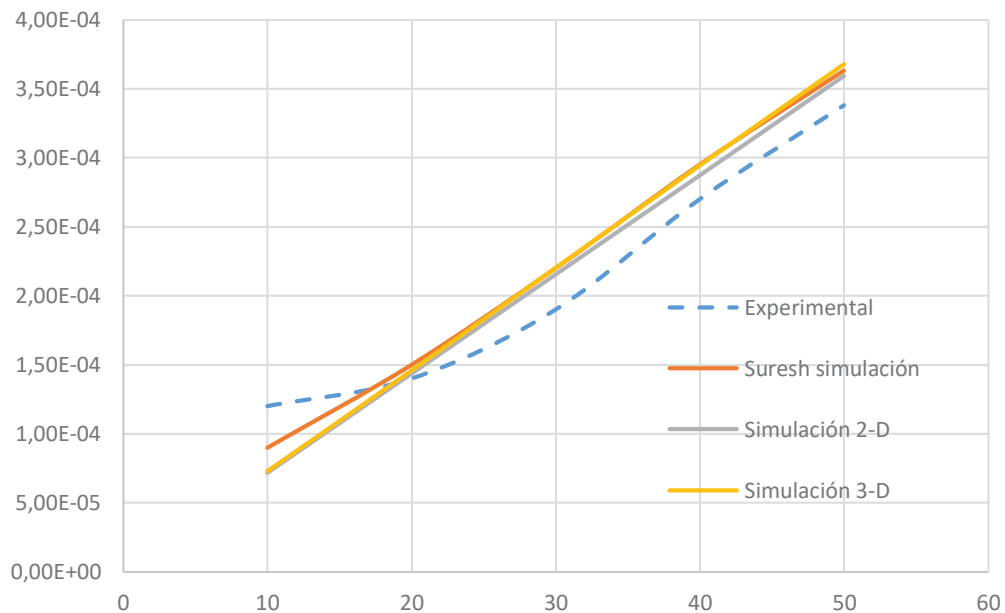


Figura 3.20. Desgaste lineal en modelos analizados.

(Fuente: Propia)

Tabla 3.11. Desgaste lineal presente en cojinetes de fricción bajo las condiciones de simulación.

Carga aplicada (N)	Presión de contacto [Mpa] Simulación 2-D	Dureza [MPa]	f1	f2	K	Desgaste lineal [m]
10	0,3947	588,4	[1,3-1,8]	1	5,44E-05	[9,34E-05 - 1,29E-04]
20	0,7892					[1,87E-04 - 2,59E-04]
30	1,1914					[2,80E-04 - 3,88E-04]
40	1,5928					[3,73E-04 - 5,17E-04]
50	1,9895					[4,67E-04 - 6,46E-04]

(Fuente: Propia)

Debido a que el coeficiente de desgaste adhesivo varía en función de la temperatura se puede encontrar una ecuación para describir el comportamiento (ecuación 3.1.). Se presenta en la Figura 3.21. el coeficiente de desgaste adhesivo en función de la temperatura, mientras en la Tabla 3.12. se indica el desgaste lineal en cojinetes de fricción.

Tabla 3.12. Desgaste lineal presente en cojinetes de fricción considerando un coeficiente de desgaste adhesivo variable.

Carga aplicada (N)	Presión de contacto [Mpa] Simulación 2-D	Dureza [MPa]	f1	f2	K	Desgaste lineal [m]
10	0,3947	588,4	[1,3-1,8]	1	0,000084	[1,44E-04 - 2E-04]
20	0,7892				0,000048	[1,66E-04 - 2,30E-04]
30	1,1914				0,000044	[2,3E-04 - 3,19E-04]
40	1,5928				0,000047	[3,23E-04 - 4,47E-04]
50	1,9895				0,000048	[4,09E-04 - 5,66E-04]

(Fuente: Propia)

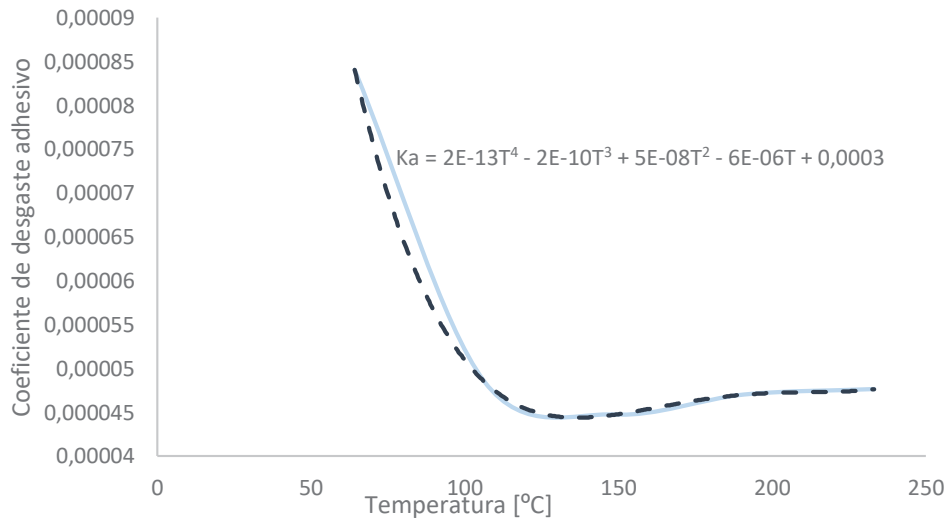


Figura 3.21. Coeficiente de desgaste adhesivo en función de la temperatura.

(Fuente: Propia)

$$Ka = 2E-13T^4 - 2E-10T^3 + 5E-08T^2 - 6E-06T + 0,0003$$

Ecuación 3.1. Coeficiente de desgaste adhesivo para el contacto Al-6063 y acero estructural.

3.2. Discusión

3.2.1. Validación del modelo Pin on block

El modelo Pin on block consiste en una modificación del modelo Pin on disc. Como se menciona en el estudio realizado por Begelinger, A & De Gee [34], la configuración Pin on disc presenta excelentes aproximaciones para predicción de desgaste en cojinetes de fricción.

El modelo Pin on block se mantuvo en lugar del modelo estricto Pin on disc debido a limitaciones relacionadas al módulo Ansys estructural. El modelo Pin on disc al utilizar juntas rotacionales para lograr el movimiento del disco, requiere de pasos de tiempo sumamente pequeños debido a la elevada velocidad del modelo [26]. Implicando por lo tanto un alto costo computacional y mayor dificultad para la convergencia del modelo. Se debe considerar que el uso de juntas implica en ANSYS Structural la definición automática de condiciones térmicas al modelo [30].

El modelo Pin on block presenta ciertas desventajas en relación al modelo Pin on disc a ser consideradas:

- No permite un análisis prolongado en el tiempo dentro de la simulación.
- A medida que el tiempo de simulación aumenta se requiere realizar modificaciones en el bosquejo del modelo, reingreso de condiciones de borde y el costo computacional aumenta.

De igual manera el modelo Pin on block presenta varias ventajas al modelo Pin on disc:

- Permite la simulación de movimientos continuos sin requerimientos de pasos de tiempo demasiado finos.
- Facilita la identificación de variables térmicas al no utilizar juntas para el modelado.
- Presenta un menor número de elementos de malla debido a la simplificación de la geometría.

Teniendo como fundamento lo expuesto anteriormente, se utiliza el modelo Pin on block dentro de la simulación para la validación de temperatura y presión.

Como se observa en la Tabla 3.3, los errores obtenidos con la configuración propuesta en el presente trabajo son menores al 10% validándose entonces éste modelo.

3.2.1.1. Validación presión de contacto

Dentro del presente trabajo se realizan dos simulaciones, una simulación Pin on disc 2-D que permite obtener las presiones máximas en el contacto al igual que facilita identificar las variables de configuración dentro de Ansys, sin implicar un alto costo computacional.

Simulación Pin on block 3-D presenta una distribución de presiones de contacto influenciadas también por el efecto térmico, siendo por lo tanto la de mayor aproximación al fenómeno real.

La Figura 3.22 (a) muestra la distribución de presiones en la superficie de contacto del pin obtenida del modelo Pin on block sin consideración de cargas térmicas dentro de Ansys Transitorio Estructural (Transient Structural).

En la Figura 3.22 (b) se muestra la distribución de presiones obtenida en la simulación planteada en el estudio de Suresh [35]. Comparando ambas gráficas se observa que los valores de presiones y áreas, presentan relación de proporcionalidad geométrica al igual que numérica.

Se puede entender la similitud pues en ambos casos se trabajó en el módulo Transitorio Estructural aplicando las mismas condiciones de borde sin tomar en cuenta variables térmicas.

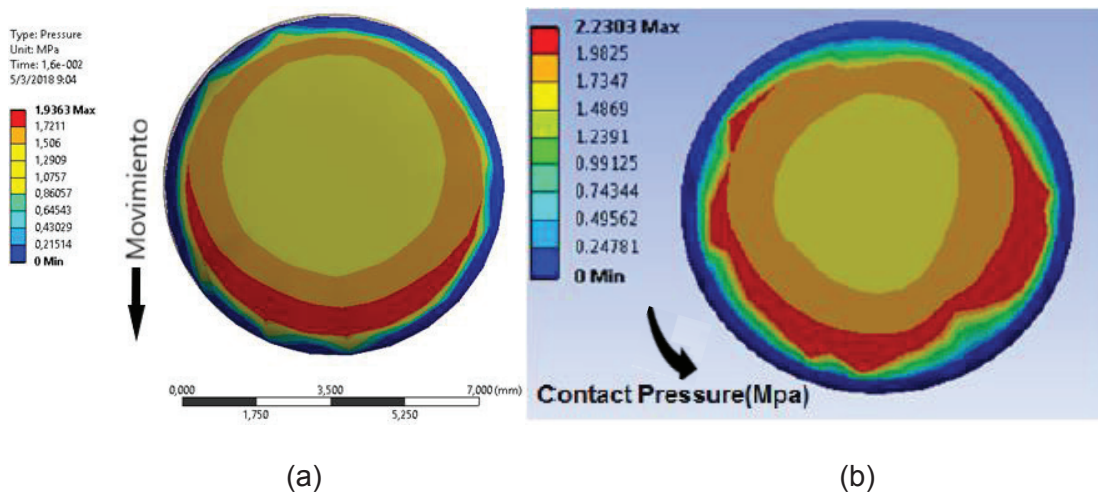


Figura 3.22. Distribuciones de presiones en la superficie de contacto sin consideraciones térmicas. (a) Simulación Pin on block. (b) Simulación Suresh. (Fuente: Propia)

Al realizar el análisis acoplado (Estructural-Térmico) se presenta una variación en la distribución de presiones debido al cambio de elementos de simulación del 228 al 227, es decir con la inclusión de variables térmicas. Como se observa en la Figura 3.3 la distribución de presiones presenta una disminución en magnitud en la zona media del contacto, mientras la zona de alta presión disminuye. Esto se justifica debido a la variación de propiedades en ambos materiales, que al aumentar la temperatura produce un aumento del área de contacto de menor presión. También se debe considerar que Suresh utiliza el modelo pin on disc. Esto genera que la zona de presiones altas se ensanche por la rotación,

a diferencia del modelo pin on block donde se observa que la zona de presiones altas está en la dirección del movimiento.

Se evalúa la presión máxima alcanzada en cada modelo con respecto a las presiones máximas obtenidas por Suresh [35] y se determina en la Tabla 3.3 los errores asociados a cada carga siendo todos ellos menores al 10%. El porcentaje de error en ambas simulaciones permite considerar que los modelos numéricos se asemejan en gran medida al comportamiento real.

3.2.1.2. Validación perfil de temperaturas estado transitorio

La importancia del análisis del estado transitorio dentro de la simulación, consiste en alcanzar un punto de partida exitoso para el análisis térmico. Es decir controlar adecuadamente las variables térmicas de la simulación.

La validación del perfil de temperaturas dentro de la simulación Pin on block 3-D se lo realiza en base al modelo analítico “sólido semi-infinito”. Cómo se observa en la tabla 3.6 el error absoluto máximo alcanzado es menor al 7%. Durante los segundos iniciales de simulación. El error aumenta progresivamente a medida que el tiempo aumenta (ver Tabla 3.6.) tal como se indica en la literatura especializada [23]. En base a la tendencia de ambos modelos durante los segundos iniciales, se identificó que las condiciones de borde térmicas se ingresaron de manera correcta.

3.2.1.3. Validación perfil de temperaturas estado estable

La distribución de temperatura en estado estable se puede validar en base al modelo realizado en Matlab donde se discretizan las ecuaciones que gobiernan el fenómeno. Para acelerar la velocidad a la que se alcanza el estado estable dentro de Ansys se disminuye el calor específico a 0,0886 tendiendo a cero la energía de almacenamiento como lo realiza Deshpande en su estudio [24]. La evolución de la temperatura hasta alcanzar el estado estable no será fiel en el tiempo, mas se puede considerar como una escala relacionada a la reducción del calor específico.

3.2.1.4. Validación desgaste lineal

El desgaste lineal calculado indica ser una buena aproximación a los resultados obtenidos por Suresh en su simulación, encontrándose el error en un rango entre el 2% al 9% [35]. Sin embargo existe un conflicto al evaluar los resultados obtenidos por Suresh en su simulación y los resultados experimentales a una carga de 10 [N]. En ese punto el error

absoluto es del 25%. Esto se justifica debido a que experimentalmente el coeficiente de desgaste adhesivo a esta carga presenta una gran variación con el resto de coeficientes a distintas cargas. La razón es que el coeficiente de desgaste adhesivo varía en función de la temperatura de manera inversamente proporcional. Siendo por lo tanto que a mayor temperatura el coeficiente de desgaste adhesivo disminuye. Se presenta en la ecuación 3.1 al coeficiente de desgaste adhesivo en una función polinómica de sexto grado con respecto a la temperatura.

Considerando la variación del coeficiente de desgaste adhesivo y manipulándolo con los valores máximos de presiones de contacto obtenidos de la simulación 2-D y 3-D se presenta en la Tabla 3.13 el desgaste lineal plano junto con el error absoluto asociado y en la Figura 3.23 las curvas de desgaste resultantes.

Tabla 3.13. Desgaste lineal en configuración de contacto plana considerando un coeficiente de desgaste adhesivo en función de la temperatura.

Carga aplicada [N]	Desgaste lineal experimental [m]	Desgaste lineal Simulación 2-D		Desgaste lineal Simulación 3-D	
		[m]	Error [%]	[m]	Error [%]
10	1,20E-04	1,11E-04	7%	1,13E-04	6%
20	1,40E-04	1,28E-04	9%	1,30E-04	7%
30	1,90E-04	1,77E-04	7%	1,81E-04	5%
40	2,70E-04	2,48E-04	8%	2,54E-04	6%
50	3,38E-04	3,15E-04	7%	3,22E-04	5%

(Fuente: Propia)

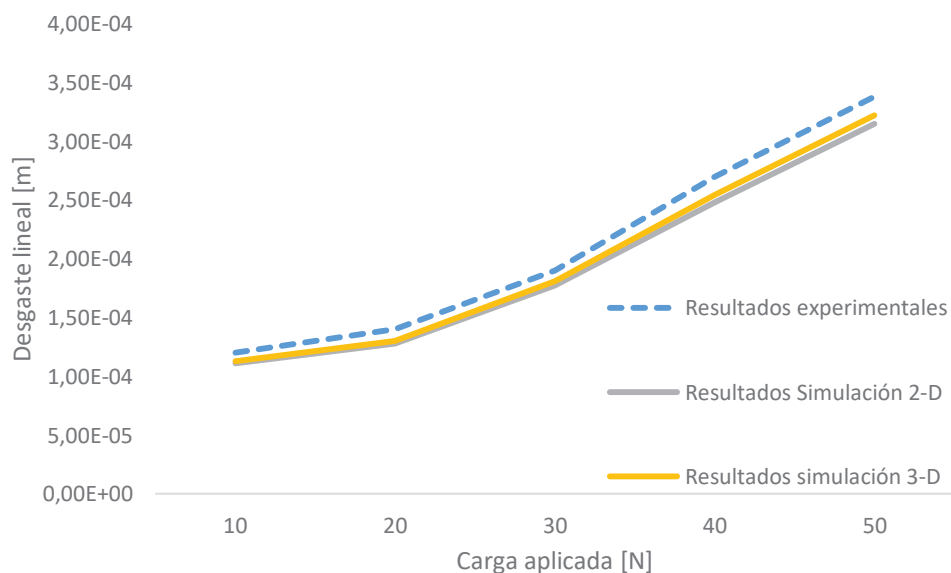


Figura 3.23. Desgaste lineal en los modelos de simulación considerando un K_a variable

(Fuente: Propia)

En base a la Tabla 3.13. se puede considerar cómo válidos los resultados obtenidos para el desgaste lineal tanto con los modelos 2-D y 3-D.

3.2.2. Análisis de resultados

Los resultados obtenidos en el presente trabajo requieren ser analizados en tres partes: un análisis de presiones, un análisis térmico y el desgaste lineal.

3.2.2.1. Análisis de presiones

La primera parte estará limitada al análisis de presiones. Para ello se debe guiar en la Figura 3.2., en la misma se encuentran las presiones de contacto máximas alcanzadas de manera experimental, de la simulación realizada por Suresh y de los modelos mediante elementos finitos realizados en el presente trabajo. Se observa en dicha figura que las presiones de contacto obtenidas de la simulación 2-D y Pin on block 3-D presentan una pendiente muy semejante a las obtenidas por Suresh. Se presentan como errores máximos 8,55% y 7,15% en la simulaciones 2-D y 3-D respectivamente para una carga de 20 [N] (ver Tabla 3.3.). La diferencia entre las pendientes señala que el error asociado a cargas mayores en las simulaciones no superará el 20%, mas el problema de modelado podría hallarse en la rigidez del pin, pues a mayores cargas el elemento podría fallar o fracturarse antes de finalizar la simulación. Cabe mencionar que al no considerar directamente el desgaste del pin en las simulaciones, el pin únicamente experimentará una mayor deformación al incrementar la carga aplicada pero no una pérdida en su volumen.

Del análisis de presiones a distintas cargas se puede señalar que la simulación Pin on block presenta la mayor aproximación con respecto a los resultados experimentales, con un error máximo de 7,153% bajo una carga de 20 N. A diferencia de la simulación realizada por Suresh las presiones obtenidas en las simulaciones del presente proyecto son menores a las experimentales. Este comportamiento se justifica debido a las consideraciones térmicas realizadas durante este estudio a diferencia de Suresh, quien en su simulación no considera variables térmicas pero sí consideraciones de desgaste, que en su lugar aumenta la presión máxima de contacto.

3.2.2.2. Análisis térmico

Dentro del análisis térmico se debe considerar tanto el estado estable cómo el transitorio.

Para el estado transitorio en la simulación, tanto el tiempo como la carga intervienen directamente en el error absoluto.

A medida que el tiempo aumenta de igual manera lo hace el error absoluto (ver Tabla 3.6). La razón es que el modelo del sólido semi-infinito es un método analítico válido para tiempos iniciales. Es decir a medida que transcurre el tiempo el modelo analítico del sólido semi-infinito presenta mayor discrepancia con el fenómeno. Así pues el fenómeno térmico con el paso del tiempo presenta un gradiente de temperaturas que disminuye hasta llegar a cero (estado estable). Mientras que en el modelo del sólido semi-infinito el gradiente de temperaturas tiende a mantenerse constante y diferente de cero.

De igual manera en la Figura 3.10. se puede observar que a medida que la carga aumenta se acentúa la diferencia entre el perfil de temperaturas del sólido semi-infinito y el perfil de temperaturas obtenido de ANSYS. Esto se justifica porque al aumentar la carga también aumenta la transferencia de calor requiriendo ANSYS un menor paso de iteración para mejorar la precisión y exactitud.

Para el análisis del estado estable se debe considerar como un factor relevante la disminución del calor específico. Esto produce que la energía de almacenamiento tienda a cero produciendo variaciones en el perfil de temperaturas del pin tal como lo indica Desphande en su estudio [24].

En la simulación realizada se utiliza un $C = 0,0886$ lo que produce una rápida estabilidad térmica del modelo. En base a los errores absolutos presentados en la Tabla 3.7 se puede considerar que la aproximación resulta satisfactoria excepto bajo cargas de 20 N, donde el error presenta un valor de 3,1%, valor que excede al 1% establecido como base en el estudio de Desphande. Se justifica este error a problemas asociados con la mecánica de cálculo de ANSYS, que al registrar un calor específico cercano a cero puede encerrar valores dentro de las matrices de cálculo [24].

Cabe recalcar que con la disminución del calor específico la estabilidad térmica fue alcanzada en alrededor de 0,003 segundos, cuando la estabilidad real con un calor específico de 880 se alcanzaba en alrededor de 60 segundos cómo se indica en la Figura 3.17.

3.2.2.3. Análisis desgaste lineal

Finalmente en base a las presiones y temperaturas obtenidas en la simulación se puede procesar la información para obtener el desgaste lineal en cojinetes de fricción. Esto se realiza en base a las ecuaciones 1.15 y 1.16 extraídas de la literatura especializada [12].

Tal como indica Shigley [12], realizar configuraciones de contacto lineales para generalizar a cualquier modelo de contacto facilita el uso de variables y el procesamiento de información.

Los resultados de desgaste lineal a cada carga se presentan en la Tabla 3.8. Se deben considerar estos resultados como una aproximación debido a las consideraciones realizadas para el cálculo. Entre éstas consideraciones se encuentran; la velocidad lineal del caso de estudio era superior a las tabuladas [12], implicando con ello que el factor f_1 pueda ser mayor a los utilizados en el presente trabajo.

Los resultados de la Tabla 3.12 y Tabla 3.133 indican que a medida que la carga aumenta, el desgaste lineal aumenta de igual manera. Evento perfectamente justificable debido a la dependencia de las fuerzas de rozamiento con la carga.

En general se debe considerar que las simulaciones realizadas en ANSYS presentan errores absolutos menores a 10% siendo por lo tanto una aproximación aceptable al fenómeno físico real. De igual manera el desgaste lineal plano calculado presenta un error con respecto a los resultados experimentales menores al 10%.

La linealización del fenómeno de contacto permite un análisis sin alto costo computacional de variabilidad de materiales y configuraciones de contacto. Al utilizar las ecuaciones de desgaste [12], el presente estudio plantea el uso de las variables para la predicción del mismo en todo tipo de configuraciones de contacto.

Por tales motivos el modelo Pin on disc 2-D facilita el análisis estructural de contacto sin consideraciones térmicas, sin altos costos computacionales y pequeños tiempos de simulación. Mientras el modelo Pin on block 3-D permite tanto consideraciones térmicas como estructurales para análisis de contacto de mayor detalle no solo de cojinetes de fricción sino de cualquier tipo de configuración de contacto.

En base a lo mencionado en la parte superior se puede afirmar que el presente estudio permite y tiene campos de aplicación diversos en la tribología.

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se han cumplido los objetivos planteados, logrando simular correctamente las distribuciones de variables termo-mecánicas en el contacto entre superficies en cojinetes de fricción de aleación de aluminio en el código comercial ANSYS y validando satisfactoriamente los modelos planteados.

Los errores tanto de presiones de contacto como del análisis térmico presentaron un error menor al 10%, de tal manera que se puede considerar como válido la distribución de variables termo-mecánicas para la simulación.

Las presiones de contacto obtenidas en el modelo Pin on disc 2-D presentan un error absoluto entre 6,72% al 8,55% y el modelo Pin on block 3-D un error entre el 4,68 al 7,15% en relación al modelo experimental bajo cargas de 10N a 50N.

La pendiente aproximada de presiones de contacto en función de la carga obtenida de manera experimental es de 0,041 mientras las de las simulaciones Pin on disc 2-D y Pin on block son 0,038 y 0,039 respectivamente validándose entonces dichas configuraciones.

La temperatura de estabilidad térmica bajo cargas de 40 N, 30 N y 10 N presentan la máxima aproximación a los resultados nominales con una variación entre 0,17 a 0,42 [°C] con un error absoluto de 0,089% y 0,0649% respectivamente. Estos valores son los más exactos y se encuentran inferiores al 1% señalado por Desphande [24]. Esto se justifica debido a que la referencia de estabilidad térmica fue obtenida mediante iteración explícita, por lo tanto ambos métodos tanto por análisis numérico y MEF deben ser aproximados.

La temperatura de estabilidad bajo una carga de 20 N presenta una variación de 3,31 [°C] respecto a la temperatura nominal. Presentando el mayor error absoluto en el análisis de estabilidad térmica con un valor de 3,1%. Como se mencionó se puede relacionar a la mecánica de cálculo de ANSYS.

La estabilización bajo las condiciones reales del material se alcanza en alrededor de 60 segundos. Resultando imposible para las computadoras de capacidad media y baja del país la simulación de fenómenos de contacto.

El modelo del sólido semi-infinito únicamente es válido para tiempos iniciales bajos y presenta en el fenómeno de contacto un mayor tiempo de validez a medida que la carga disminuye.

El desgaste lineal calculado para una configuración tipo cojinete de fricción presenta un valor máximo de $5,66E-04$ [m] a una carga de 50 N y un valor mínimo de $1,44E-04$ [m] a una carga de 10 N.

ANSYS structural tiene como limitación el definir un coeficiente de desgaste adhesivo en función de la temperatura por tal motivo una simulación que considere desgaste presentará errores altos mientras la diferencia entre cargas de análisis sean mayores.

El desgaste lineal plano calculado en base a los resultados de las simulaciones y a un coeficiente de desgaste adhesivo variable presenta un error máximo de 9% para el modelo Pin on disc 2-D y 7% para el modelo Pin on block 3-D.

Dentro del análisis de sensibilidad de malla se determinó que la configuración de malla que presenta un refinamiento bajo es la más aceptable no solo por la disminución de los errores absolutos asociados al error por redondeo sino por la disminución del tiempo computacional.

Consideraciones de contacto lineales permiten una aplicación en un mayor número de configuraciones de contacto, resultando de suma practicidad tanto en la industria como en el campo de la investigación científica.

Referencias Bibliográficas

- [1] Saxena, A., Schaffer, J., Antolovic, S., & Sanders, T. "Ciencia y diseño de materiales para ingeniería". México: Continental, 2000.
- [2] Dowson, D. "History of tribology". Addison-Wesley Longman Limited, 1979.
- [3] Jaeger, J. G. "Moving sources of heat and the temperature at sliding contacts". In *J. Proc. Roy. Soc. NSW*, Vol. 76, pp. 203-224, 1942.
- [4] Voronkov, B. D. "Dry Friction Bearings "(No. FTD-HC-23-458-70). FOREIGN TECHNOLOGY DIV WRIGHT-PATTERSON AFB OHIO, 1970.
- [5] Hertz, H. "On the contact of elastic solids". *J. Reine Angew Math.*, 92, 156-171, 1881.
- [6] Bowden, F. P., & Ridler, K. E. W. "Physical properties of surfaces. III. The surface temperature of sliding metals the temperature of lubricated surfaces". In *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 154, No. 883, pp. 640-656. 1936
- [7] Archard, J. F. "Elastic deformation and the laws of friction". In *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Vol. 243, No. 1233, pp. 190-205, 1957.
- [8] Bush, A. W., Gibson, R. D., & Thomas, T. R. "The elastic contact of a rough surface". *Wear*, 35(1), 87-111. 1975.
- [9] Persson, B. N. J., "Bucher, F., & Chiaia, B. Elastic contact between randomly rough surfaces: comparison of theory with numerical results". *Physical Review B*, 65(18), 184106, 2002.
- [10] Kogut, L., & Etsion, I. "A finite element based elastic-plastic model for the contact of rough surfaces". *Tribology transactions*, 46(3), 383-390, 2003.
- [11] Jackson, R. L., & Green, I. "A statistical model of elasto-plastic asperity contact between rough surfaces". *Tribology International*, 39(9), 906-914, 2006.
- [12] Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. "Diseño en ingeniería mecánica de Shigley", 9na edición. McGraw Hill Mexico, 2012.
- [13] Weichsel, Dick. "Plane bearings", *ESC Report*, 5 (1): 1-2, archived from the original (PDF) on 2009-12-10. 1994
- [14] Kopeliovich, D. "Aluminum based bearing materials". SubstTech: Substances & Technologies. Disponible en: http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=aluminum_based_bearing_materials. [Consultado: 19-dic-2017]
- [15] Maffia, E. G., & González, A. C. "Estructuras y propiedades de las aleaciones". In *Jornadas de Investigación y Transferencia de la Facultad de Ingeniería*. La plata. 2013
- [16] Mathavan, J. J., & Patnaik, A. "Analysis of wear properties of aluminium based journal bearing alloys with and without lubrication". In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 149, No. 1, p. 012052, septiembre, 2016.

- [17] Smart, E. "Tri-metal Journal bearings: materials and construction. hpm: high power media". Disponible en: <https://www.highpowermedia.com/blog/3572/tri-metal-journal-bearings-materials-and-construction>. [Consultado: 19-dic-2017]
- [18] Lancaster, J. K. "Dry bearings: a survey of materials and factors affecting their performance". *Tribology*, 6(6), 219-251. 1973
- [19] Çengel, Y. A., Cimbala, J. M., & Sknarina, S. F. "Mecánica de fluidos: fundamentos y aplicaciones". McGraw-Hill, Vol 1, 2006.
- [20] Hibbeler, R. C. "Mecánica de materiales". Pearson educación, 2006.
- [21] Laraqi, N., Alilat, N., de Maria, J. G., & Baïri, A. "Temperature and division of heat in a pin-on-disc frictional device—exact analytical solution". *Wear*, 266(7), 765-770, 2009.
- [22] Bergman, T. L., & Incropera, F. P. "Fundamentals of heat and mass transfer". John Wiley & Sons, 2011.
- [23] Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. "Fundamentos de transferencia de calor". Pearson Educación. 1999
- [24] Deshpande, A., & Madhavan, V. "A novel approach to accelerate attainment of thermal steady state in coupled thermomechanical analysis of machining". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(13-14), 3869-3884, 2012.
- [25] Meriam, J. L., & Kraige, L. G. "Dinámica", Reverté, Vol. 2, 1998.
- [26] Rabinowids, E. "Fricción y desgaste de materiales". *Editorial Wiley Inc., New York*. 1965.
- [27] Vanegas, L. "Diseño 1: Esfuerzos de Contacto". Disponible en: <http://blog.utp.edu.co/lvanegas/files/2011/08/Cap6.pdf>. [Consultado: 10-ene-2018].
- [28] Lee, H. H. "Finite element simulations with ANSYS workbench 16". SDC publications, 2015.
- [29] EESS. (2016). Método de elementos finitos. Obtenido el 22-11-2017, de <https://www.esss.co/blog/es/metodo-de-elementos-finitos-que-es/>
- [30] Ansys Inc. Ansys Help Guide Release 17.0, 2017.
- [31] Frei, W. "Meshing Your Geometry: When to Use the Various Element Types". COMSOL Blog Sitio Web. Disponible en: <https://www.comsol.com/blogs/meshing-your-geometry-various-element-types>. [Consultado: 22-11-2017]
- [32] Yang, W. Y., Cao, W., Chung, T. S., & Morris, J. "Applied numerical methods using MATLAB". John Wiley & Sons, 2005.
- [33] Dhatt, G., Lefran, E., & Touzot, G. "Finite element method". John Wiley & Sons, 2012.
- [34] Begelinger, A., & De Gee, A. W. J. 1st Int. Syrup on Plain Bearings, Czechoslovakia, 100(1), 104-109, 1972.
- [35] Suresh, R., Kumar, M. P., Basavarajappa, S., Kiran, T. S., Yeole, M., & Katare, N. "Numerical Simulation & Experimental study of wear depth and Contact pressure distribution Of Aluminum MMC Pin on Disc Tribometer". *Materials Today: Proceedings*, 4(10), 11218-11228. 2017

[36] Azo materials. "AISI 1050 Carbon steel UNS G10500". Disponible en: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6526>. [Consultado: 26-dic-2017]

Anexos

Anexo I. Programación en Matlab

```
clc;
clear;
D=0.008;
K_p=209;
rho_p=2796;
C_p=880;
K_d=60.5;
rho_d=7850;
C_d=434;
A=pi*(D^2)/4;
W=50;
miu=0.6;
v=3.76;
T_amb=22;
q_total=miu*W*v/A;
alfa_p=K_p/(rho_p*C_p);
gamma=(1/(1+sqrt((K_p*rho_p*C_p)/(K_d*rho_d*C_d))));
FWGT=1-gamma;
q_pin=FWGT*q_total;
x=80; %Parámetro geométrica (puede colocar cualquier otro número)
L=3;
Delta_x=L/x;
Fo=0.4;
Delta_t=Fo*(Delta_x)^2/alfa_p;
Delta_t=round(Delta_t,3);
s=10000/Delta_t;
s1=ceil(s);
Ti=22;
h=200;
C_l=(2*alfa_p*q_pin*Delta_t)/(K_p*Delta_x);
A=zeros(x);%Matriz A de coeficientes de las temperaturas adelantadas
C=zeros(x,1);%Matriz Z de coeficientes de las temperaturas encontradas
T_i=zeros(x,1);%Matriz de temperatura inicial
posicion=0:(L/(x-1))*1000:(L*1000);%Vector posición
Ta=zeros(x,1);%Matriz de temperatura en t=0
%Programación
%Cálculo de la matriz solución de temperaturas en el tiempo de 50
segundos
%Introducción de valores a la matriz de temperatura en t=0
for i=1:x
    T_i(i)=Ti;
end
T_i;
for i=1:x
    Ta(i)=Ti;
end
Ta;
%Introducción de valores a la matriz A de coeficientes de las
temperaturas
%adelantadas y a la matriz Z de coeficientes de las temperaturas
%encontradas
for i=1:x
    if i==1
        A(i,i)=1+2*Fo+((2*h*Fo*Delta_x)/K_p);
        A(i,i+1)=-2*Fo;
```

```

C(i) = ((2*Fo*q_pin*Delta_x)/K_p) + ((2*Fo*h*T_amb*Delta_x)/K_p) + T_i(i);
elseif i==x
    A(i,i) = ((2*h*Fo*Delta_x)/K_p) + 2*Fo + 1;
    A(i,i-1) = -2*Fo;
    C(i) = ((2*h*Delta_x*T_amb*Fo)/K_p) + T_i(i);
else
    A(i,i-1) = -Fo;
    A(i,i) = 1 + 2*Fo + ((Fo*Delta_x*h)/K_p);
    A(i,i+1) = -Fo;
    C(i) = T_i(i) - ((Fo*h*T_amb*Delta_x)/K_p);
end
end
A;
C;
A_inv = inv(A);
T = A_inv*C;
T1 = T;
for i = 1:s1/20
    T_i = T;
    for i = 1:x
        if i == 1
            A(i,i) = 1 + 2*Fo + ((2*h*Fo*Delta_x)/K_p);
            A(i,i+1) = -2*Fo;

C(i) = ((2*Fo*q_pin*Delta_x)/K_p) + ((2*Fo*h*T_amb*Delta_x)/K_p) + T_i(i);
elseif i==x
    A(i,i) = ((2*h*Fo*Delta_x)/K_p) + 2*Fo + 1;
    A(i,i-1) = -2*Fo;
    C(i) = ((2*h*Delta_x*T_amb*Fo)/K_p) + T_i(i);
else
    A(i,i-1) = -Fo;
    A(i,i) = 1 + 2*Fo + ((Fo*Delta_x*h)/K_p);
    A(i,i+1) = -Fo;
    C(i) = T_i(i) + ((Fo*h*T_amb*Delta_x)/K_p);
end
end
A;
C;
T = A_inv*C;
end
T2 = T;
T = T1;
for i = 1:s1/10
    T_i = T;
    for i = 1:x
        if i == 1
            A(i,i) = 1 + 2*Fo + ((2*h*Fo*Delta_x)/K_p);
            A(i,i+1) = -2*Fo;

C(i) = ((2*Fo*q_pin*Delta_x)/K_p) + ((2*Fo*h*T_amb*Delta_x)/K_p) + T_i(i);
elseif i==x
    A(i,i) = ((2*h*Fo*Delta_x)/K_p) + 2*Fo + 1;
    A(i,i-1) = -2*Fo;
    C(i) = ((2*h*Delta_x*T_amb*Fo)/K_p) + T_i(i);
else
    A(i,i-1) = -Fo;
    A(i,i) = 1 + 2*Fo + ((Fo*Delta_x*h)/K_p);
    A(i,i+1) = -Fo;
    C(i) = T_i(i) + ((Fo*h*T_amb*Delta_x)/K_p);
end
end

```



```

    end
end
A;
    C;
    T=A_inv*C;
end
T3=T;
T=T1;
for i=1:s1/5
    T_i=T;
    for i=1:x
        if i==1
            A(i,i)=1+2*Fo+(2*h*Fo*Delta_x)/K_p;
            A(i,i+1)=-2*Fo;

C(i)=((2*Fo*q_pin*Delta_x)/K_p)+((2*Fo*h*T_amb*Delta_x)/K_p)+T_i(i);
        elseif i==x
            A(i,i)=((2*h*Fo*Delta_x)/K_p)+2*Fo+1;
            A(i,i-1)=-2*Fo;
            C(i)=((2*h*Delta_x*T_amb*Fo)/K_p)+T_i(i);
        else
            A(i,i-1)=-Fo;
            A(i,i)=1+2*Fo+(Fo*Delta_x*h)/K_p;
            A(i,i+1)=-Fo;
            C(i)=T_i(i)+((Fo*h*T_amb*Delta_x)/K_p);
        end
    end
end
A;
    C;
    T=A_inv*C;
end
T4=T;
T=T1;
for i=1:s1/2
    T_i=T;
    for i=1:x
        if i==1
            A(i,i)=1+2*Fo+(2*h*Fo*Delta_x)/K_p;
            A(i,i+1)=-2*Fo;

C(i)=((2*Fo*q_pin*Delta_x)/K_p)+((2*Fo*h*T_amb*Delta_x)/K_p)+T_i(i);
        elseif i==x
            A(i,i)=((2*h*Fo*Delta_x)/K_p)+2*Fo+1;
            A(i,i-1)=-2*Fo;
            C(i)=((2*h*Delta_x*T_amb*Fo)/K_p)+T_i(i);
        else
            A(i,i-1)=-Fo;
            A(i,i)=1+2*Fo+(Fo*Delta_x*h)/K_p;
            A(i,i+1)=-Fo;
            C(i)=T_i(i)+((Fo*h*T_amb*Delta_x)/K_p);
        end
    end
end
A;
    C;
    T=A_inv*C;
end
T5=T;
T=T1;
for i=1:(s1*0.6)
    T_i=T;

```

```

for i=1:x
    if i==1
        A(i,i)=1+2*Fo+((2*h*Fo*Delta_x)/K_p);
        A(i,i+1)=-2*Fo;

C(i)=((2*Fo*q_pin*Delta_x)/K_p)+((2*Fo*h*T_amb*Delta_x)/K_p)+T_i(i);
        elseif i==x
            A(i,i)=((2*h*Fo*Delta_x)/K_p)+2*Fo+1;
            A(i,i-1)=-2*Fo;
            C(i)=((2*h*Delta_x*T_amb*Fo)/K_p)+T_i(i);
        else
            A(i,i-1)=-Fo;
            A(i,i)=1+2*Fo+((Fo*Delta_x*h)/K_p);
            A(i,i+1)=-Fo;
            C(i)=T_i(i)+((Fo*h*T_amb*Delta_x)/K_p);
        end
    end
end
A;
    C;
    T=A_inv*C;
end
T6=T;
T=T1;
for i=1:(s1*0.75)
    T_i=T;
    for i=1:x
        if i==1
            A(i,i)=1+2*Fo+((2*h*Fo*Delta_x)/K_p);
            A(i,i+1)=-2*Fo;

C(i)=((2*Fo*q_pin*Delta_x)/K_p)+((2*Fo*h*T_amb*Delta_x)/K_p)+T_i(i);
            elseif i==x
                A(i,i)=((2*h*Fo*Delta_x)/K_p)+2*Fo+1;
                A(i,i-1)=-2*Fo;
                C(i)=((2*h*Delta_x*T_amb*Fo)/K_p)+T_i(i);
            else
                A(i,i-1)=-Fo;
                A(i,i)=1+2*Fo+((Fo*Delta_x*h)/K_p);
                A(i,i+1)=-Fo;
                C(i)=T_i(i)+((Fo*h*T_amb*Delta_x)/K_p);
            end
        end
    end
end
A;
    C;
    T=A_inv*C;
end
T7=T;
T=T1;
for i=1:(s1*0.9)
    T_i=T;
    for i=1:x
        if i==1
            A(i,i)=1+2*Fo+((2*h*Fo*Delta_x)/K_p);
            A(i,i+1)=-2*Fo;

C(i)=((2*Fo*q_pin*Delta_x)/K_p)+((2*Fo*h*T_amb*Delta_x)/K_p)+T_i(i);
            elseif i==x
                A(i,i)=((2*h*Fo*Delta_x)/K_p)+2*Fo+1;
                A(i,i-1)=-2*Fo;
                C(i)=((2*h*Delta_x*T_amb*Fo)/K_p)+T_i(i);
            else
                A(i,i-1)=-Fo;
                A(i,i)=1+2*Fo+((Fo*Delta_x*h)/K_p);
                A(i,i+1)=-Fo;
                C(i)=T_i(i)+((Fo*h*T_amb*Delta_x)/K_p);
            end
        end
    end
end

```

```

else
    A(i,i-1)=-Fo;
    A(i,i)=1+2*Fo+((Fo*Delta_x*h)/K_p);
    A(i,i+1)=-Fo;
    C(i)=T_i(i)+((Fo*h*T_amb*Delta_x)/K_p);
end
end
A;
    C;
    T=A_inv*C;
end
T8=T;
T=T1;
for i=1:(s1*0.95)
    T_i=T;
    for i=1:x
        if i==1
            A(i,i)=1+2*Fo+((2*h*Fo*Delta_x)/K_p);
            A(i,i+1)=-2*Fo;

C(i)=((2*Fo*q_pin*Delta_x)/K_p)+((2*Fo*h*T_amb*Delta_x)/K_p)+T_i(i);
            elseif i==x
                A(i,i)=((2*h*Fo*Delta_x)/K_p)+2*Fo+1;
                A(i,i-1)=-2*Fo;
                C(i)=((2*h*Delta_x*T_amb*Fo)/K_p)+T_i(i);
            else
                A(i,i-1)=-Fo;
                A(i,i)=1+2*Fo+((Fo*Delta_x*h)/K_p);
                A(i,i+1)=-Fo;
                C(i)=T_i(i)+((Fo*h*T_amb*Delta_x)/K_p);
            end
        end
    end
end
A;
    C;
    T=A_inv*C;
end
T9=T;
T=T1;
for i=1:s1
    T_i=T;
    for i=1:x
        if i==1
            A(i,i)=1+2*Fo+((2*h*Fo*Delta_x)/K_p);
            A(i,i+1)=-2*Fo;

C(i)=((2*Fo*q_pin*Delta_x)/K_p)+((2*Fo*h*T_amb*Delta_x)/K_p)+T_i(i);
            elseif i==x
                A(i,i)=((2*h*Fo*Delta_x)/K_p)+2*Fo+1;
                A(i,i-1)=-2*Fo;
                C(i)=((2*h*Delta_x*T_amb*Fo)/K_p)+T_i(i);
            else
                A(i,i-1)=-Fo;
                A(i,i)=1+2*Fo+((Fo*Delta_x*h)/K_p);
                A(i,i+1)=-Fo;
                C(i)=T_i(i)+((Fo*h*T_amb*Delta_x)/K_p);
            end
        end
    end
end
A;
    C;
    T=A_inv*C;

```

```

end
T10=T;
T=T1;
s2=[0 0.006 s/20 s/10 s/5 s/2 s*0.6 s*0.75 s*0.9 s*0.95 s];
T_total=[Ta T1 T2 T3 T4 T5 T6 T7 T8 T9 T10];%Matriz solución de
temperaturas en los diferentes tiempos
tiempo=s2*Delta_t;
figure(1)
hold on
plot (tiempo,T_total)
xlabel('tiempo [s]')
ylabel('Temperatura [C]')
legend ('Superficie de contacto','1 [mm]','2 [mm]','3 [mm]','4 [mm]')
title('Temperatura vs tiempo a una carga de 50 N')
grid on

figure(2)
hold on
xlabel('posición [mm]')
ylabel('Temperatura [C]')
title('Temperatura vs posición a una carga de 50 N')
%Gráficas de resultados
plot(posicion,T_total)%Gráfica de la temperatura al tiempo 0 segundos
legend ('Superficie de contacto','1 [mm]','2 [mm]','3 [mm]','4 [mm]')
grid on

```