

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



**SIMULACIÓN DE DESGASTE EN ACEROS AISI 1020  
SIN Y CON TRATAMIENTO TERMOQUÍMICO DE  
CEMENTACIÓN**

PRESENTADO POR:

**OCIAS ADELIO CRUZ GARCIA**

**ALEX FRANCISCO ROSA CHAVEZ**

PARA OPTAR AL TITULO DE:

**INGENIERO MECÁNICO**

CIUDAD UNIVERSITARIA, MAYO 2021

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

RECTOR:

**MSC. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO**

SECRETARIO GENERAL:

**ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCON SANDOVAL**

**FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA**

DECANO:

**DOCTOR EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA**

SECRETARIO:

**ING. JULIO ALBERTO PORTILLO**

**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

DIRECTOR:

**ING. FRANCISCO ALFREDO DE LEÓN TORRES**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERO MECÁNICO**

Título:

**SIMULACIÓN DE DESGASTE EN ACEROS AISI 1020  
SIN Y CON TRATAMIENTO TERMOQUÍMICO DE  
CEMENTACIÓN**

Presentado por:

**OCIAS ADELIO CRUZ GARCIA**

**ALEX FRANCISCO ROSA CHÁVEZ**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

**Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ**

SAN SALVADOR, MAYO 2021

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

**Dr. y M.Sc. JONATHAN ANTONIO BERRÍOS ORTIZ**

## **DEDICATORIA**

Este trabajo de graduación está dedicado a:

Mi Padre:

Felipe (QEPD)

Mi Madre:

Nely.

Mi hermano:

Bernabé.

Mi hermana:

Rosario.

Mi Esposa:

Yamileth.

Mi tía:

Priscila.

Ocias Adelio Cruz García

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por siempre darme la sabiduría, inteligencia y serenidad para poder superar cada etapa de mi vida.

A mi padre: Felipe Cruz, por darme siempre el apoyo y confianza para poder superarme.

A mi madre: Nely García, porque siempre ha estado a mi lado y darme todo cuanto podía para que no me faltara nada.

A mi hermano: Bernabé Cruz, por siempre confiar en mí y darme su apoyo cuando menos él podía.

A mi hermana Rosario: por nunca dejarme en los momentos más difíciles.

A mi esposa: Yamileth Meza, por siempre estar conmigo y apoyarme en las buenas y malas.

A mis demás hermanos y hermanas: Flor, Fermín, Natalia, Felipe. Por su apoyo incondicional.

A mi tía: Priscila porque me tendió la mano para ayudarme en lo que pudiera.

A mi prima: Lourdes y familia porque siempre me ayudaron.

A mi asesor Dr. y M. Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz, por su ayuda y asesoría que ni aunque por motivos de pandemia siempre veló porque concluyéramos el Trabajo de Graduación.

A todos los docentes de la escuela de Ingeniería Mecánica, porque fueron claves en el proceso de aprendizaje para lograr ser Ingeniero Mecánico.

A la Unidad Productiva Metal Mecánica, en especial a Lic. Julio, por siempre darme el asesoramiento necesario cada vez que se necesitaba.

A la Escuela de Ingeniería Mecánica, por permitirme ser parte de tan gloriosa escuela.

A todos mis compañeros y amigos de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, por compartir momentos de estudio y hacer de la carrera un proceso menos estresante.

A todas aquellas personas que de una u otra manera contribuyeron al apoyo y desarrollo de éste Trabajo de Graduación.

Ocias Adelio Cruz García

# **SIMULACION DE DESGASTE EN ACEROS AISI 1020 SIN Y CON TRATAMIENTO TERMOQUÍMICO DE CEMENTACIÓN**

Estudiantes: Br. Ocias Adelio Cruz García<sup>1</sup>

Br. Alex Francisco Rosa Chávez<sup>2</sup>

Docente asesor: Dr. y M.Sc. Jonathan Antonio Berríos Ortiz<sup>3</sup>

Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería y Arquitectura,  
Universidad de El Salvador

## **RESUMEN**

Se ha realizado una simulación de desgaste utilizando el software ANSYS 2020 versión estudiantil, mediante la técnica de elementos finitos, la ejecución se ha realizado por medio de ensayo espiga sobre disco, se ha utilizado un acero AISI 1020 el cual fue sometido a un proceso de tratamiento termoquímico de cementación y un acero O1 material de la espiga con tratamiento térmico de temple y revenido. El proceso de simulación se realizó bajo diferentes condiciones: variando la carga entre 5, 10 y 15 Newton, diferentes distancias de deslizamiento tanto con material base y material sometido a cementación. Los resultados obtenidos del proceso de simulación han sido comparados con los resultados obtenidos de un proceso experimental el cual estuvo sometido a las mismas condiciones, dichos resultados no difieren significativamente entre los diferentes procesos. Se ha realizado una guía de laboratorio de simulación de desgaste en el programa ANSYS 2020.

Palabras claves: Simulación, desgaste y elementos finitos.

---

1 E-mail: adeliocruz23@gmail.com

2 E-mail: alex.rosac09@gmail.com

3 E-mail: jaberriosortiz@gmail.com

## CONTENIDO

	Pág.
1. MARCO TEÓRICO .....	3
1.1. Tratamiento termoquímico de cementación.....	3
1.1.1. Proceso de cementación .....	4
1.1.2. Capa cementada .....	5
1.1.3. Cementantes sólidos .....	6
1.1.4. Cementantes líquidos.....	8
1.1.5. Cementantes gaseosos .....	11
1.1.6. Post tratamientos térmicos .....	11
1.2. Desgaste.....	13
1.2.1. Tipos de desgaste.....	13
1.2.2. Topografía de las superficies .....	15
1.2.3. Contacto de sólidos .....	19
1.2.4. Fricción .....	22
1.2.5. Teoría molecular de la fricción y del desgaste .....	24
1.2.6. Desgaste por fricción.....	26
1.2.7. Desgaste por adherencia.....	28
1.2.8. Transferencia de metales durante el desgaste .....	33
1.2.9. Efecto de la temperatura y la velocidad .....	34
1.2.10. Efecto de la carga y la distancia de deslizamiento.....	38
1.2.11. CAPA PROTECTORA.....	40
1.3. Método de elementos finitos y software de simulación.....	40
1.4. Estudio de casos de simulación.....	43
1.4.1. Evaluación del comportamiento a desgaste en aceros de herramienta .....	43
1.4.2. Simulación de desgaste de prótesis de cadera de alúmina sobre alúmina .....	44
1.4.3. Simulación numérica de mapas de mecanismos de desgaste.....	45
1.5. Modelo matemático de elementos finitos para un acero aisi 1020 de espiga sobre disco.....	45
2. DISEÑO Y EJECUCIÓN DEL PROCESO DE SIMULACIÓN .....	48
2.1. Ensayo de desgaste tipo espiga sobre disco.....	49

2.2. Dimensionamiento de los discos y espigas para los ensayos de desgaste.....	52
2.3. Elaboración del modelo 3d.....	52
2.4. Mallado del modelo.....	55
2.5. Condiciones de frontera.....	56
2.5.1. Condiciones de frontera de apoyo.....	56
2.5.2. Condiciones de contorno de carga.....	57
2.6. Condiciones del proceso.....	58
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	60
3.1. Resultados de los ensayos de desgaste.....	60
3.2. Análisis de resultados.....	65
CONCLUSIONES .....	69
RECOMENDACIONES.....	70
BIBLIOGRAFÍA.....	71
ANEXO A.....	72

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1.1. Composiciones de las sales empleadas para la cementación de los aceros.....	9
Tabla 2.1. Condiciones y variables bajo las que se realiza los ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco.....	50
Tabla 2.2. Propiedades del disco de acero AISI 1020 no cementado.....	54
Tabla 2.3. Propiedades del disco de acero AISI 1020 cementado.....	54
Tabla 2.4. Propiedades de la espiga de acero O1 templada y revenida.....	54
Tabla 3.1. Valores de desgaste de los discos de acero SAE 1020 sin cementación utilizando espiga de acero SAE 4340, obtenidos experimentalmente.....	61
Tabla 3.2. Valores de desgaste de los discos de acero SAE 1020 cementados utilizando espiga de acero SAE 4340, obtenidos experimentalmente.....	61
Tabla 3.3. Valores de desgaste de los discos de acero SAE 1020 sin cementación utilizando espiga de acero SAE 4340, obtenidos mediante simulación por ANSYS.....	62
Tabla 3.4. Valores de desgaste de los discos de acero SAE 1020 cementados utilizando espiga de acero SAE 4340, obtenidos mediante simulación por ANSYS.....	62
Tabla 3.5. Valores de desgaste de las espigas de acero SAE 4340 utilizando discos de acero SAE 1020 sin cementación, obtenidos experimentalmente.....	63
Tabla 3.6. Valores de desgaste de las espigas de acero SAE 4340 utilizando discos de acero SAE 1020 con cementación, obtenidos experimentalmente.....	63
Tabla 3.7. Valores de desgaste de las espigas de acero SAE 4340 utilizando discos de acero SAE 1020 sin cementación, obtenidos mediante simulación por ANSYS.....	64
Tabla 3.8. Valores de desgaste de las espigas de acero SAE 4340 utilizando discos de acero SAE 1020 con cementación, obtenidos mediante simulación por ANSYS.....	64

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Fig. 1.1. Diferentes tipos de asperezas de una superficie que presenta la misma altura entre cresta y valles, pero diferentes longitudes de onda: (a) Superficie lisa, (b) Superficie lisa pero no plana, (c) Superficie plana rugosa, (d) Superficie plana rugosa de longitud de onda macrogeométrica, y (e) Superficie plana rugosa de longitud microgeométrica [4].....	..16
Fig. 1.2. Principios de un medidor de rugosidad [4].....	..17
Fig. 1.3. Asperezas superficiales. $R_t$ es la altura máxima entre crestas y valles [4].....	..17
Fig. 1.4. Pendientes de asperezas de una superficie erosionada [5].....	..18
Fig. 1.5. Cuerpo hemisférico que presiona sobre una superficie plana [4].....	..20
Fig. 1.6. Esfera con microasperezas [4].....	..20
Fig. 1.7. Superficie rugosa idealizada penetrada por una superficie plana [4].....	..21
Fig. 1.8. Una superficie real penetrada por una superficie plana [4].....	..21
Fig. 1.9. Una espiga hemisférica se desliza sobre una superficie suave bajo la acción de una carga: (a) Espiga estacionaria; y (b) Espiga en movimiento, produciendo una huella en forma de ranura [4].....	..22
Fig. 1.10. Curva característica de desgaste contra distancia de deslizamiento [4]..	..27
Fig. 1.11. Razón de desgaste en función de la presión de contacto aparente [4]....	..29
Fig. 1.12. Variación entre el tiempo de desgaste y la transferencia de metal de una espiga de latón que se desliza sobre un anillo de estelita [4].....	..33
Fig. 1.13. Variación de la razón del desgaste con la temperatura para un latón (60/40), sobre acero para herramientas [4].....	..36
Fig. 1.14. Grafica de la razón de desgaste en relación con el recíproco de la dureza [4].....	..37
Fig. 1.15. Variación de la razón de desgaste y la transferencia de metal con la velocidad. Carga 22.5 kg [4].....	..38
Fig. 1.16. Variación de la razón de desgaste y la temperatura superficial con velocidad para espigas aisladas térmicamente y enfriadas. Carga 3 kg [4].....	..38
Fig. 1.17. Desgaste del acero vs acero a 100 kg/cm <sup>2</sup> y con lubricante líquido parafínico [4].....	..39
Fig. 2.1. Módulos para estudios tribológicos marca GUNT: a) Modulo básico modelo TM 260.3; y b) Modulo de control modelo TM 260.....	..49
Fig. 2.2. Balanza analítica marca Ohaus.....	..49
Fig. 2.3. Dimensiones de los especímenes utilizados en el ensayo tipo espiga sobre disco. Cotas en mm.....	..52
Fig. 2.4. Modelo en 3D del disco elaborado en Ansys 2019(Versión estudiantil)...	..53
Fig. 2.5. Modelo en 3D de la espiga elaborada en Ansys 2019 (Versión estudiantil).....	..53
Fig. 2.6. Modelo en 3D del ensamble espiga sobre disco elaborado en Ansys 2019 (Versión Estudiantil).....	..53
Fig. 2.7. Modelo en 3D del disco representando mallas, elaborado en Ansys 2019 (Versión Estudiantil).....	..55
Fig. 2.8. Modelo en 3D de la espiga representando mallas, elaborado en Ansys 2019 (versión estudiantil).....	..56
Fig. 2.9. Modelo en 3D del disco representando el soporte fijo, elaborado en Ansys 2019 (versión estudiantil).....	..57
Fig. 2.10. Modelo en 3D de la espiga representando desplazamiento, elaborado en Ansys 2019 (versión estudiantil).....	..57

Fig. 2.11.	Modelo en 3D de la espiga representando carga aplicada, elaborado en Ansys 2019 (versión estudiantil).....	..58
Fig. 2.12.	Modelo en 3D del disco representando velocidad rotacional, elaborado en Ansys 2019 (versión estudiantil).....	..58
Fig. 3.1.	Módulo para ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco marca GUNT, TM260.3 [20].....	..60
Fig. 3.2.	Gráfica de curvas de desgaste experimental de discos respecto a la distancia de deslizamiento.....	..61
Fig. 3.3.	Gráfica de curvas de desgaste ANSYS de discos respecto a la distancia de deslizamiento.....	..62
Fig. 3.4.	Gráfica de curvas de desgaste experimental de espigas respecto a la distancia de deslizamiento.....	..63
Fig. 3.5.	Gráfica de curvas de desgaste ANSYS de espigas respecto a la distancia de deslizamiento.....	..65
Fig. 3.6.	Gráfica de Curvas de desgaste de discos cementados.....	..66
Fig. 3.7.	Gráfica de Curvas de desgaste de discos no cementados.....	..67
Fig. 3.8.	Gráfica de Curvas de desgaste de espigas con discos cementados.....	..67
Fig. 3.9.	Gráfica de Curvas de desgaste de espigas con discos no cementados..	..68

## SÍMBOLOS Y SIGLAS

$R_t$	Altura máxima de una cresta a un valle
$R_a$	Línea central media
$R_s$	Raíz media cuadrática
$F$	Carga normal a una superficie
$A_e$	Área de contacto elástico
$r$	Radio de curvatura
$E$	Módulo de Young
$n$	Número de asperezas por unidad de área
$f_f$	Resistencia a la fricción
$S$	Fuerza cortante en la superficie
$\tau$	Esfuerzo cortante
$A_t$	Superficie en flujo plástico
$P$	Factor de compresión
$\sigma$	Esfuerzo de compresión
$\mu$	Coefficiente de fricción
$V$	Volumen de material eliminado
$s$	Distancia de deslizamiento
$\sigma_y$	Esfuerzo de fluencia
TTQC	Tratamiento Termoquímico de Cementación
$\lambda$	Longitud de onda
$\alpha$	Factor de probabilidad
$e$	Número de hileras de átomos
$p_0$	Valor medio aritmético de las fuerzas individuales de repulsión
$E_t$	Energía total disipada
$\rho$	Densidad del material
$A_0$	Constante de Arrhenius
$R$	Constante universal de los gases
$T$	Temperatura
$v$	Velocidad de deslizamiento
$\xi$	Espesor crítico de óxido
$k$	Coefficiente de desgaste
$H$	Dureza del material
$V_{rel}$	Velocidad de deslizamiento relativa

## INTRODUCCIÓN

El desgaste de las partes implica reposición y esto en sí es costoso. Más aun, las superficies desgastadas hacen que se pierda la precisión con la resultante merma de la eficiencia. Por lo tanto, debe hacerse todo lo posible para diseñar partes con una cantidad de desgaste mínima.

Se tiene suficientes datos para demostrar que, con una carga característica, aunque dependiendo de las propiedades del metal, se produce una rápida transición que da lugar a un desgaste severo a partir del régimen precedente de desgaste moderado. Es indispensable que las partes móviles de la maquinaria sean diseñadas de tal manera que la carga de contacto no exceda las condiciones que determina el régimen de desgaste moderado. A la larga no es más costoso utilizar materiales con alta tensión de fluencia para permitir cargas pesadas en el servicio.

Si bien se hace todo intento por disminuir el desgaste en el estado estacionario, durante el arranque inicial de las máquinas nuevas se deben eliminar las capas superficiales. El proceso de arranque inicial probablemente implica la creación de una capa subcutánea deformada que será lo bastante dura para resistir el estado estable del desgaste, pero los picos superficiales deben desgastarse y deformarse para mejorar el ajuste de las partes en interacción. Sin embargo, es difícil pronosticar la razón de desgaste porque depende no sólo de la carga y la velocidad de la superficie sino también de otros factores que no siempre es posible evitar. Siempre se tiene la presencia de abrasivos extraños o de residuos que se forman por interacción y como se sabe, los abrasivos incrementan la razón de desgaste. La elevada velocidad superficial es benéfica porque eleva la temperatura interfacial lo que facilita la formación de películas de óxidos.

Una razón importante es que, en común con muchos sistemas tecnológicos, la mayoría de las situaciones tribológicas actúan bajo la acción combinada de diversas variables. Por ejemplo, la abrasión puede estar superpuesta a una situación que se diseñó en primer término para el desgaste por adherencia y el problema se agrava si el sistema funciona en un entorno hostil. Por lo tanto, es indispensable que, al diseñar partes a prueba de desgaste, se identifiquen las condiciones de servicio de los componentes. Sin

embargo, para predecir las razones de desgaste, debe existir una continua inversión en investigación encaminada a obtener información sobre los mecanismos de los diversos tipos de desgaste en superficies que interactúan al estar sujetas a movimiento relativo.

## **1. MARCO TEÓRICO**

La cementación es un proceso que se ha venido empleando desde hace mucho tiempo, para producir una capa superficial dura y resistente, principalmente en aceros. La cementación es un proceso en el cual el acero se pone en contacto con una atmósfera de potencial de carbono, de manera que induzca la absorción de carbono en la superficie y por difusión, se genere un gradiente de concentración entre la superficie y el interior del metal.

Como lo indica la definición existen dos factores que controlan el proceso: la absorción de carbono en la superficie y la velocidad de difusión hacia el metal. El proceso de cementación se efectúa a temperaturas del orden de 850 - 950 °C, pudiéndose realizar a temperaturas mayores o menores, dependiendo de la factibilidad y propósitos del proceso.

Al analizar el desgaste como un problema que involucra toda parte mecánica en movimiento y como tal es considerado uno de los problemas principales que conlleva a la reducción de la vida útil de los mecanismos, por lo cual es muy necesario apoyarse de software diseñados para analizar este problema. Pero para lograr hacer un análisis se tiene que entender que es el desgaste.

A continuación se describen los métodos de cementación gaseosa, líquida y sólida, así como las bases del estudio al problema sobre desgaste.

### **1.1. TRATAMIENTO TERMOQUÍMICO DE CEMENTACIÓN**

En la actualidad los materiales ferrosos están sometidos a mayores exigencias en todas sus áreas de aplicación por lo cual se está investigando nuevas y mejores formas de lograr alargar la vida útil e incrementar su resistencia al desgaste de los elementos de máquinas sometidos a trabajos con mayor responsabilidad. Se pueden mejorar los siguientes aspectos como por ejemplo; trabajar a una carga de contacto baja o se puede utilizar uno de los métodos preferidos en la industria; el cual es producir componentes con la profundidad optima de la capa endurecida junto con un buen acabado superficial. El propósito de esta capa externa dura que se obtiene por

cementación, carbonitruración, nitruración, entre otros; es proporcionar una superficie con un alto límite de resistencia en una región vulnerable a la iniciación de grietas; en el presente apartado se hará énfasis al tratamiento termoquímico de cementación [1].

### **1.1.1. PROCESO DE CEMENTACIÓN**

Reciben el nombre de aceros para cementación, un grupo de aceros de bajo contenido de carbono (variable generalmente de 0.05 a 0.25%) que se utilizarán para la fabricación de ciertas piezas de máquinas y motores que deben tener gran dureza superficial y buena tenacidad o resistencia al choque en el núcleo. Estas características al parecer opuestas entre sí, pueden obtenerse cementando la superficie de las piezas; es decir, carburando su zona periférica y dándoles a continuación un correspondiente tratamiento térmico [2].

Se denomina cementación (carburación) el TQT que consiste en la saturación por difusión de la capa superficial del acero con carbono durante un calentamiento (comúnmente, entre 900 - 950 °C) en un medio que contiene carbono (carburante). Las piezas cementadas adquieren las propiedades definitivas después de un temple y revenido a baja temperatura. La cementación y el tratamiento térmico posterior tienen como objetivo conferir a la capa superficial una alta dureza y resistencia al desgaste, elevar el límite de resistencia al desgaste y el límite de fatiga por flexión pura o rotativa, conservando dúctil el núcleo de la pieza [3].

La cementación se emplea frecuentemente para endurecer ruedas dentadas de dimensiones medias, ejes de caja de velocidades de los automóviles, algunas piezas de dirección, árboles de máquinas de marcha rápida, husillos y muchas otras piezas de máquinas [3].

### 1.1.2. CAPA CEMENTADA

Se da el nombre de capa cementada a la zona que después de la cementación queda con un contenido de carbono superior a la del acero. Generalmente, recibe el nombre de capa dura, al área superficial que después del último tratamiento queda con una dureza superior a 700 Vickers, y que suele corresponder a la zona cuyo porcentaje de carbono es superior a ~0.50 % [2].

A veces se suelen presentar dudas en la determinación de la capa dura, porque al emplearse diferentes máquinas para el ensayo de dureza y diferentes cargas de ensayo se obtienen también diferentes resultados. Más adelante se explicará con detalle los mejores métodos para determinar el espesor de la capa dura. Los espesores de las capas cementadas que normalmente se emplean en las piezas de máquinas y motores, se pueden clasificar en tres grupos:

- 1) Capas delgadas con menos de 0.50 mm.- Estas profundidades de cementación se utilizan para pequeñas piezas de acero al carbono, endurecidas generalmente con sales de cianuro y templadas directamente desde la temperatura de cementación. Estas piezas deben utilizarse siempre sin rectificado posterior.
- 2) Capas medias de 0.50 a 1.50 mm.- Estos espesores son los más corrientes para la mayoría de las piezas que se utilizan en la fabricación de máquinas y motores. Se pueden obtener empleando cementantes sólidos, líquidos o gaseosos, con aceros al carbono, débilmente aleados o de alta aleación.
- 3) Capas de gran espesor, superiores a 1.50 mm.- Son obtenidas generalmente por cementación con materias sólidas y con cementantes gaseosos y algunas veces, aunque más raramente, con cementantes líquidos. Las chapas de blindaje, que suelen fabricarse con capas cementadas superiores a 3 mm, suelen ser cementadas con gases [2].

Cualquiera que sea el proceso que se emplee, no conviene en general que el contenido de carbono de la capa cementada pase de 1 % y debe procurarse que la parte periférica de la pieza, después de rectificada, quede con ~0.80 a 0.90 % de carbono, con lo que se obtienen en el temple durezas

de 62 a 65 Rockwell-C. Siempre conviene obtener durezas superiores a 60 Rockwell-C, que es aproximadamente el límite de dureza en que la lima ya no marca al acero. Cuando el contenido de carbono de la zona periférica es superior a la composición eutectoide de 0.80 % de carbono, suelen aparecer redes de cementita o de carburos muy marcadas, que pueden hacer frágil la capa cementada y con tendencia a descascarse. En estos casos conviene dar a las piezas después de la cementación un recocido de difusión a 800-900 °C en una atmósfera o baño apropiado para disminuir el porcentaje de carbono de la periferia. Con este tratamiento se uniformiza bastante el contenido de carbono de la capa periférica y se evitan posibles desconchamientos en las piezas cementadas [2].

### **1.1.3. CEMENTANTES SÓLIDOS**

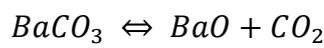
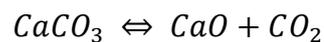
Se utilizan diversas materias para suministrar el carbono que ha de absorber el acero durante la cementación. Las más empleadas suelen ser el carbón vegetal, negro animal, huesos calcinados, cuero, coque, entre otros. Mezclados con carbonatos de bario, calcio o sodio [2].

El carbón vegetal sólo no se emplea porque con éste no se puede conseguir concentraciones de carbono en las periferias del acero, superiores a 0.65% de C. Así, mezclando el carbón vegetal con carbonatos alcalinos o alcalinotérreos, en la capa periférica se alcanzan fácilmente contenidos de hasta 1.20% de C [2].

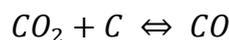
Durante muchos años, uno de los cementantes más utilizados fue la mezcla de Carón preparado con el 60% de carbón vegetal y 40% de carbonato de bario. El Carbón se tritura en trozos de 3 a 6 mm de diámetro y luego se mezcla con el carbonato de bario en polvo. Experimentalmente se ha comprobado que se puede disminuir el porcentaje de carbonato de bario, que se empleaban antiguamente, obteniéndose muy buenos resultados con porcentaje de 10 a 15% sin que pierda efecto sensible la acción carburante de la mezcla; bajando en cambio a 8%, el rendimiento disminuye ya notablemente. Se suele añadir un 20% de coque como diluyente, porque

facilita la penetración del calor a través del compuesto carburante, permite obtener rápidamente temperaturas uniformes en el interior de las cajas y disminuye el coste de la mezcla. Como activadores también se suelen emplear, aunque menos frecuentemente, el carbonato de calcio y carbonato de sodio. Es importante que el carbón y los demás materiales que se utilizan para preparar los cementantes sólidos estén bien secos, porque pequeñas trazas de humedad pueden dar lugar a descarburaciones locales y luego puntos blandos en las piezas después del último temple [2].

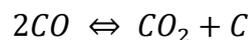
La acción activadora de los carbonatos de calcio, bario y sodio se suele explicar de diferentes formas. La teoría más antigua y más generalizada explica el fenómeno en la siguiente forma: primero se realiza la descomposición de los carbonatos a elevada temperatura de acuerdo con las siguientes reacciones:



Luego, el  $CO_2$  producido, reacciona con el carbono y produce óxido de carbono:



Finalmente, el óxido de carbono se descompone en la superficie del acero según la siguiente reacción:



Produciendo, carbono naciente que pasa el acero [2].

En la actualidad, sin embargo, cada día es más admitida otra hipótesis en cierto modo similar a la anterior, pero que no señala la formación de  $CO_2$  y atribuye principalmente la acción activadora de los carbonatos a la reacción que se produce a alta temperatura con el carbono formándose óxido de carbono de acuerdo con las reacciones:





Y luego el  $CO$  producido es el que al descomponerse da lugar al carbono naciente, que es el que produce la carburación [2].

Los óxidos  $BaO$  y  $Na_2O$  que se producen en esas reacciones tienden luego a reaccionar con el  $CO_2$  producido en la descomposición del  $CO$ , obteniéndose así los carbonatos correspondientes y con ellos se realiza la regeneración de los carbonatos que no se consumen sino que al ser elementos productores de  $CO$  actúan como activadores del proceso de carburación. La presencia de estos óxidos tiende, por lo tanto, a bajar el contenido en  $CO_2$  de los gases y aumentar el porcentaje de  $CO$ , favoreciéndose con todo ello la cementación [2].

Los principales inconvenientes de los cementantes sólidos son:

- 1) La gran duración de la operación,
- 2) Elevado consumo de carbón,
- 3) Necesidad de mucha mano de obra,
- 4) Dificultad de templar las piezas directamente, e
- 5) Irregularidad de temperaturas en las cajas de cementación [2].

#### **1.1.4. CEMENTANTES LÍQUIDOS**

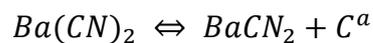
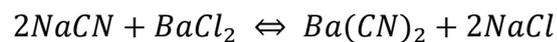
En este proceso, la gran dureza superficial que adquiere el acero, puede considerarse debida exclusivamente a la acción del carbono. La influencia del pequeño porcentaje de nitrógeno existente en la capa periférica es muy pequeña y puede ser casi despreciada [2].

Los baños de sales que se utilizan en este procedimiento se preparan generalmente a base de cianuro sódico, con porcentajes variables de cloruro y carbonato sódicos a los que se añade uno o más cloruros o fluoruros de bario, potasio, calcio o estroncio, que actúan como agentes catalíticos, aumentando notablemente la penetración del carbono, y con ello la profundidad de la capa dura que puede variar desde 0.2 a 3 mm [2].

Las sales que se utilizan para la cementación de los aceros, se pueden clasificar en dos grupos, de acuerdo con la penetración que con ellas se consigue. Unas con 17 a 23 % de cianuro que se emplean a temperaturas variables de 850 a 900 °C para capas de espesor medio de 0.2 a 1.5 mm de profundidad, y otras de 7.5 a 12 % de cianuro que se emplean a temperaturas de 875 a 950 °C para espesores variables de 1 a 3 mm. En la Tabla 1.1 se presentan las composiciones de las sales de cementar más usadas en la actualidad [2].

Los baños de cementar se deben cubrir siempre la superficie de las sales con escamas de grafito para evitar una pérdida grande de cianuro [2].

En los baños de sales activados con cloruro de bario, la actividad carburadora es debida principalmente a las siguientes reacciones:



En la cual el carbono activo (C<sup>a</sup>) representa el carbono que se deposita sobre la superficie del acero y luego difunde al interior del mismo [2].

Tabla 1.1. Composiciones de las sales empleadas para la cementación de los aceros.

	Capa cementada de 0.2 a 1.5 mm, %	Capa cementada de 1 a 3 mm, %
Cianuro de sodio	17 a 23	7.5 a 12
Cloruro de bario	14 a 40	45 a 55
Otras sales alcalinas	0 a 3.5	2 a 10
Cloruro de potasio	- - -	5.5 a 20
Cloruro de sodio	20 a 30	0 a 15
Carbonato de sodio	< 30	< 30
Cianato de sodio	< 1	< 0.30

La intensidad de esta reacción se acentúa con la temperatura y con ella aumenta la liberación de carbón activo, y disminuye la formación de nitrógeno cuya influencia es perjudicial en este tratamiento porque dificulta la penetración del carbono en el acero. Como el porcentaje de cianato en el baño es un índice de la cantidad de nitrógeno que absorbe el acero, para asegurar una buena penetración de carbono se debe evitar que pase de ciertos límites,

debiendo mantenerse en los baños de penetración media, porcentajes de cianato inferiores a 1.0 % y en los de gran penetración menores que 0.3 % [2].

Las irregularidades que se pueden presentar en estos procesos deben atribuirse a alguna de las siguientes circunstancias [2]:

- 1) Contenido insuficiente de cianuro para generar el carbono activo,
- 2) Aumento exagerado del contenido de carbonato sódico,
- 3) Cantidad excesiva de cianato de sodio, y
- 4) Selección errónea de la temperatura de cementación.

El fin que se persigue siempre es mantener el baño durante toda la operación dentro de unos límites de composición que en la mayoría de los casos son los señalados en la Tabla 1.1. Así, para conseguirlo, los fabricantes suelen preparar varios tipos de sales que mezcladas en proporciones convenientes, dan esas composiciones. Como con el uso suele disminuir el porcentaje de cianuro y se alteran también los porcentajes de otros elementos, es necesario añadir periódicamente ciertas sales para mantener una composición conveniente [2].

Según los casos se suelen usar:

- ✓ Una sola sal, que contiene todos los elementos necesarios para cementar el acero y que a medida que se va consumiendo el baño sirve también para reponerlo. Esta sal suele contener  $\text{CNNa} = 25 \%$ ,  $(\text{CN})_2\text{Ca} = 0.55 \%$  y  $\text{Cl}_2\text{Ca} = 70 \%$ , es muy barata, pero es higroscópica y es necesario lavar muy bien las piezas para evitar su corrosión. No es necesario hacer análisis del baño y observando el aspecto de su superficie se conoce su grado de actividad [2].
- ✓ Dos sales, una de las cuales suele ser una sal neutra o una mezcla de sales neutras, y la otra una sal de cianuro con cloruros activadores ( $\text{CNNa} = 30 \%$ ,  $\text{Cl}_2\text{Ba} = 50 \%$  y  $\text{ClNa} = 20 \%$ , aproximadamente) [2].
- ✓ También se suelen usar tres sales. Una de bajo punto de fusión neutra, compuesta generalmente por cloruro o carbonato sódico que sirve para iniciar la fusión de una pequeña parte del baño de sales. Otra sal de cianurar con  $\sim 80$  a  $90 \%$  de cianuro sódico y  $10$  a  $20 \%$  de carbonato sódico, y la tercera, que es la sal catalizadora, con  $70$  a  $85 \%$  de cloruro

de bario, 5 a 10 % de cianuro de sodio y aproximadamente 10 % de cloruro sódico y 10 % de carbonato sodio [2].

En los dos últimos casos durante el trabajo se añaden periódicamente pequeñas cantidades de las sales de elevado contenido en cianuro para que el contenido en cianuro sea el adecuado [2].

### **1.1.5. CEMENTANTES GASEOSOS**

En este proceso, manteniendo las piezas de 1 a 8 h en una atmósfera carburante, a temperaturas de 850 a 950 °C, se obtienen capas cementadas de 0.2 a 1.5 mm de profundidad. Únicamente en casos especiales, como la fabricación de blindajes, se emplean procesos más largos y se obtienen capas cementadas de mayor espesor. Aunque las instalaciones son bastante complicadas y costosas, la cementación de las piezas es muy sencilla y rápida. Se obtienen resultados muy regulares y se pueden cementar grandes cantidades de piezas en muy poco tiempo [2].

El empleo de este procedimiento, que está sustituyendo en muchos casos a la cementación en cajas, y a la cementación en sales, es de gran interés para las empresas que deban cementar muchas piezas y en cambio no es muy recomendable para talleres pequeños que trabajan sólo con pequeñas series. En la actualidad la cementación gaseosa es el método de endurecimiento superficial más empleado en grandes talleres, fábricas de automóviles, motocicletas, entre otros, donde se preparan cantidades muy importantes de piezas cementadas [2].

### **1.1.6. POST TRATAMIENTOS TÉRMICOS**

Los tratamientos de cementación que involucra temperatura, duración de calentamiento, método de enfriamiento, etc., y los temple posteriores que es necesario dar a las piezas, varían mucho de unos casos a otros, según sea la clase de acero y las características que se desean obtener [2].

En cada caso, la elección de uno u otro tratamiento dependerá de la forma y dimensiones de las piezas, de la composición del acero, de su tamaño de grano, o sea la tendencia del acero a adquirir una estructura gruesa durante la cementación y de las características que se quieran conseguir en el núcleo y las periferias de las piezas [2].

A continuación describiremos los más utilizados, señalando sus ventajas e inconvenientes y los casos en que conviene emplearlos.

- 1) *Cementación, temple directo desde la temperatura de cementación y revenido final.* Este tratamiento se da generalmente cuando se cementa en baño de sales o en atmosfera carburante, y raramente cuando se cementa en cajas [2].
- 2) *Cementación, enfriamiento lento, temple a temperatura intermedia entre  $A_{c1}$  y  $A_{c3}$  y revenido final.* Este tratamiento se puede emplear con éxito cuando se usan aceros de alta aleación, que son generalmente de grano fino y no necesitan regenerar el corazón. Así se obtiene la máxima tenacidad del corazón, cuya resistencia será un poco inferior a la máxima que se obtiene templando a más alta temperatura [2].
- 3) *Cementación, enfriamiento lento, temple a temperatura ligeramente superior a  $A_{c3}$  y revenido final.* Con este tratamiento se obtiene la máxima resistencia en el núcleo. Así, la tenacidad del núcleo será buena, pues aunque haya crecido el grano durante la cementación, se afinará por haber sido calentado el acero para el temple a temperatura ligeramente superior a  $A_{c3}$  [2].
- 4) *Cementación, enfriamiento, primer temple a temperatura ligeramente superior a  $A_{c3}$ , segundo temple a temperatura ligeramente superior a  $A_{c1}$  y revenido final.* Conviene emplear este tratamiento con los aceros al carbono y de media aleación y, en general, con todos los de grano grueso, en los que durante la cementación crece mucho el grano [2].
- 5) *Austempering y martempering.* Cuando se quiere reducir al mínimo las deformaciones de las piezas cementadas, el temple se hace enfriando en sales fundidas en lugar de agua o aceite [2].

## **1.2. DESGASTE**

Siempre que haya un movimiento relativo entre dos sólidos que soportan carga, existe una situación potencial de desgaste, dicho movimiento se puede considerar unidireccional o de vaivén, ya sea deslizante o de rodamiento. Para el caso de estos dos últimos, también se puede dar una combinación de estos o el desgaste se puede dar debido a un movimiento oscilatorio de pequeñas amplitudes [4]. Para comprender el desgaste, es necesario el estudio de la topografía y la naturaleza de las superficies. Es por ello que el grado de deformación superficial y subsuperficial de los sólidos representa una parte fundamental en el mecanismo de fricción y desgaste, por lo que, al analizar la naturaleza y cantidad de desgaste de dos superficies en contacto, se deben estudiar los esfuerzos de contacto y los tipos de movimiento [4].

Junto al concepto de desgaste, es importante definir el concepto de fricción, el cual se define cómo la resistencia al movimiento que se produce cuando dos objetos sólidos que se encuentran en contacto son puestos en movimiento relativo uno con respecto del otro.

### **1.2.1. TIPOS DE DESGASTE**

Un metal puede ser sometido a un movimiento relativo ya sea con un cuerpo sólido o no sólido, así como también puede existir interacción entre metal y líquidos (agua o aceites lubricantes). Los tipos de desgaste se clasifican según la naturaleza del movimiento o los medios involucrados en una interacción de metales bajo carga. Según el último criterio, la clasificación del tipo de desgaste es la siguiente:

- a) Metal contra metal,
- b) Metal contra sólido no-metálico, y
- c) Metal contra fluido.

No obstante, debido a que la naturaleza de las superficies en contacto puede cambiar de manera inesperada, y lo que antes era metal contra metal se puede volver metal contra no-metal, o bien una lubricación que en un

principio era adecuada podría fallar posteriormente; la clasificación anterior pierde validez al aplicarla en situaciones reales. Por lo tanto, se prefiere clasificar al desgaste en virtud de la naturaleza del movimiento o de los medios que intervienen en una interacción de metales bajo carga. Los tipos principales de desgaste son: por adhesión, por abrasión, por erosión, por cavitación y por vibración [4].

El desgaste por adhesión ocurre cuando dos superficies se deslizan una sobre la otra o existe una presión que mantiene unidas a dichas superficies. La tendencia de dos superficies en contacto a adherirse proviene de fuerzas de atracción que existe entre los átomos de la superficie de ambos materiales. Si estas dos superficies en contacto se separan mediante la aplicación de una fuerza normal o tangencial, las fuerzas de atracción entre los átomos generan un esfuerzo que causa el desprendimiento de material de una superficie hacia la otra. El material desprendido tiene forma de partículas pequeñas que normalmente se transfieren a la otra superficie o se encuentran como partículas sueltas fuera de dicha superficie. Para el caso del desgaste por adherencia el movimiento relativo puede ser deslizamiento unidireccional o de vaivén, o bien la interacción ocurre bajo carga en un contacto oscilatorio de pequeña amplitud [4].

El desgaste por abrasión tiene lugar siempre que estén presentes partículas extrañas duras entre las superficies en contacto. Las partículas abrasivas se incrustan en una de las superficies y actúan como herramienta de corte, removiendo material de la otra superficie. Estas partículas pueden proceder del ambiente (arena y/o polvo) o como consecuencia del desgaste por adhesión y/o por un proceso de corrosión [4].

El desgaste por erosión es causado por un fluido a alta presión con partículas sólidas en suspensión las cuales al impactar sobre una superficie arrancan material de ella debido a los efectos de momento de las partículas. La pérdida de material puede ser significativa, provocando roturas por fatiga. El grado de desgaste tiene relación con el ángulo de incidencia de la partícula con respecto a la superficie [4].

El desgaste por vibración se produce entre dos superficies que tienen movimiento oscilatorio relativo de pequeña amplitud, del cual se forman

partículas abrasivas que originan cavidades en la superficie a medida que la oscilación continúa [4].

El desgaste por cavitación se origina en superficies entre las que existe fluido, el cual da origen a la formación de burbujas de vapor cuando éste llega a una presión menor que la presión de vapor. Estas burbujas son transportadas por el fluido hasta una región de mayor presión, donde el vapor regresa al estado líquido de forma súbita aplastándose bruscamente las burbujas. Si las burbujas de vapor se encuentran cerca o en contacto con una de las superficies cuando cambian de estado se producen presiones localizadas muy altas, ocasionando picaduras en dicha superficie [4].

El desgaste por fatiga surge como resultado de las cargas cíclicas, el cual probablemente es el mecanismo predominante de la mayoría de los tipos de desgaste. Sin embargo, se tiene que considerar que un tipo particular de falla ha sido originado por fatiga resulta un tanto confuso, por lo que se reserva el uso del término solamente a la falla entre contactos lubricados, como en el caso de los rodamientos de bolas o rodillo, engranes, levas y entre otros mecanismos, donde la pérdida de material se produce debido al desbaste de capas superficiales o por picaduras, como en el caso de los engranes. Las grietas por fatiga aparecen debajo de la superficie en un punto en que el esfuerzo cortante es máximo [4].

### **1.2.2. TOPOGRAFÍA DE LAS SUPERFICIES**

Con el fin de comprender la interacción entre las superficies de las partes móviles de una maquinaria, es importante conocer la naturaleza original de dichas superficies. Para ello es necesario conocer aspectos importantes como si éstas se encuentran libres de contaminantes u óxidos y si es mecánicamente suave. Pero lo más importante que se tiene que comprender sobre los mecanismos de fricción y desgaste es conocer que no existe una superficie perfectamente plana a escala microscópica [4].

Mediante los métodos conocidos de preparación de superficies como maquinado, pulido, cepillado, entre otros; no se puede llegar a obtener una

superficie perfectamente lisa, ya que éstas presentan asperezas, es decir ondulaciones en forma de colinas y valles. En la Fig. 1.1 se presenta diferentes tipos de asperezas de una superficie, en el caso de la Fig. 1.1a se observa una superficie perfectamente lisa, para el caso de las Fig. 1.1b-e todas las protuberancias poseen la misma profundidad, aunque la longitud de onda es macrogeométrica como en la Fig. 1.1b; por lo tanto, esta superficie se define como lisa, pero no plana. La longitud de onda también puede ser microgeométrica, como en el caso de la Fig. 1.1e la longitud de onda es corta o microgeométrica, a esta superficie se le define plana pero rugosa. En las Fig. 1.1c-d se ilustran superficies cuya rugosidad están entre la Fig. 1.1b y d.

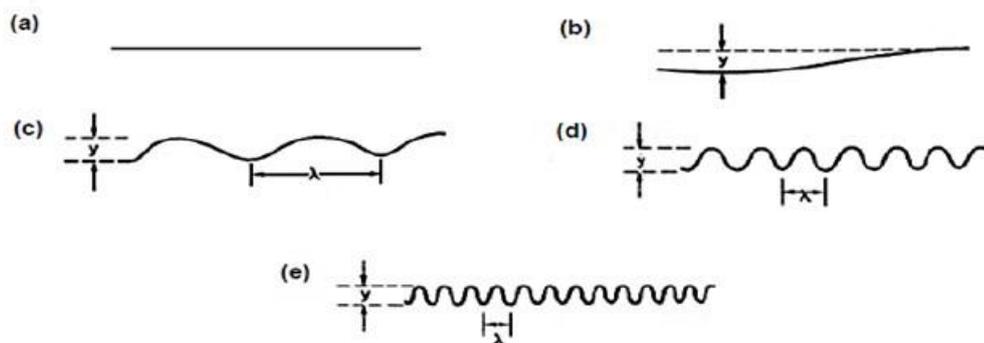


Fig. 1.1. Diferentes tipos de asperezas de una superficie que presenta la misma altura entre cresta y valles, pero diferentes longitudes de onda: (a) Superficie lisa, (b) Superficie lisa pero no plana, (c) Superficie plana rugosa, (d) Superficie plana rugosa de longitud de onda macrogeométrica, y (e) Superficie plana rugosa de longitud microgeométrica [4].

El medidor de Taylor Hobson es un instrumento ampliamente usado debido a que permite registrar con rapidez la microtextura de una superficie. El principio de funcionamiento consiste en mover un estilete sobre una longitud representativa de la superficie rugosa, como se observa en la Fig. 1.2a, el movimiento oscilatorio del estilete inclina la armadura sobre la cual están enrolladas las bobinas  $I_1$  e  $I_2$ , cada una alimentada con una corriente de alta frecuencia mediante un oscilador de válvula "O", tal como se presenta en el esquema del circuito eléctrico representado en la Fig. 1.2b. El movimiento de la armadura produce una variación en la impedancia de las bobinas y modifica la magnitud de la corriente de alta frecuencia, donde dicha variación en la magnitud de la corriente es amplificada por "A". Un desmodulador "B" modifica la corriente de salida y alimenta al registrador del estilete, de modo

que en éste se refleje la variación en la corriente de alta frecuencia a causa del movimiento de la armadura. Como las crestas y el espaciamiento entre ellos es pequeño, los trazos se amplifican de 400 a 75000 veces [4].

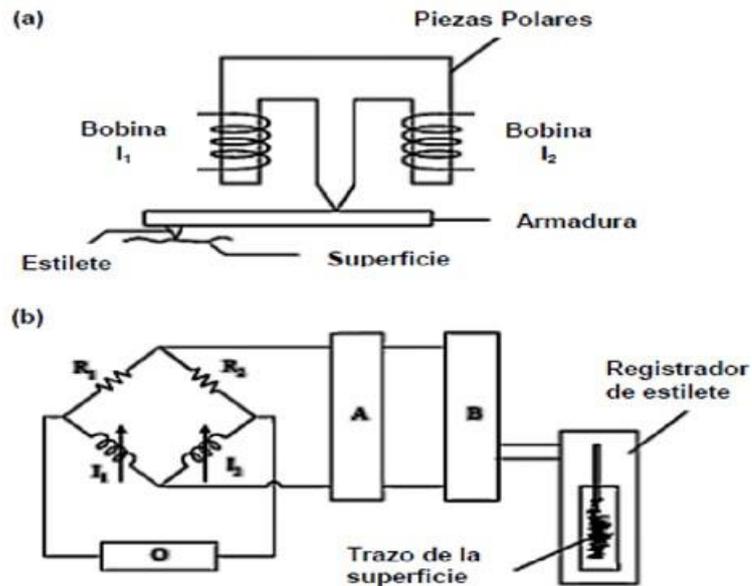


Fig. 1.2. Principios de un medidor de rugosidad [4].

Las superficies con diversos grados de rugosidad pueden tener el mismo valor de altura máxima de una cresta a un valle  $R_t$  (ver, Fig. 1.3), así que la medición de la altura entre cresta y valle no describe totalmente una superficie [4].

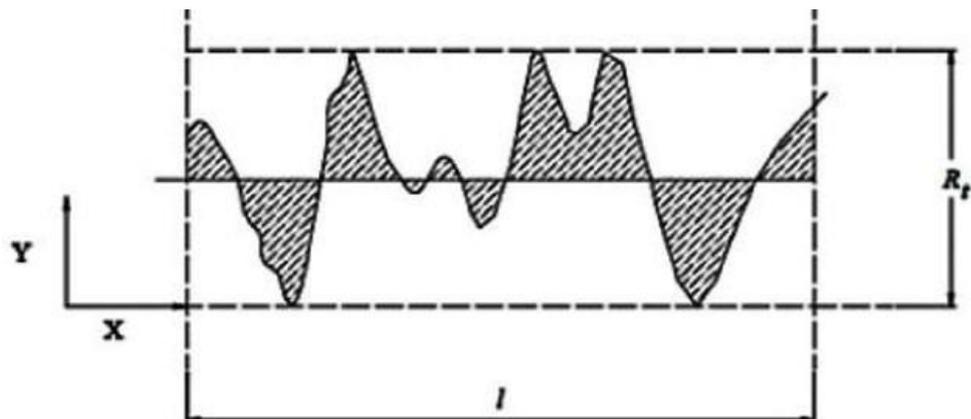


Fig. 1.3. Asperezas superficiales.  $R_t$  es la altura máxima entre crestas y valles [4].

Halliday midió los ángulos de aspereza de la superficie con ayuda de un microscopio de reflexión electrónica, para lo cual, utilizó la superficie colocada en una posición oblicua exagerada de manera que se pudiera

observar el perfil de las asperezas. Las asperezas que han estado sujetas a abrasión, con frecuencia presentan una pendiente a distintos ángulos en relación con la superficie y en dos direcciones. En la Fig. 1.4 se presenta la naturaleza de las pendientes de las asperezas donde el ángulo  $\alpha$  anterior a la partícula abrasiva siempre es mayor que  $\beta$ . Los ángulos de aspereza tienen una función positiva en el modo de deformación de los metales cuando se inicia el movimiento relativo de las superficies bajo la acción de una carga [5].

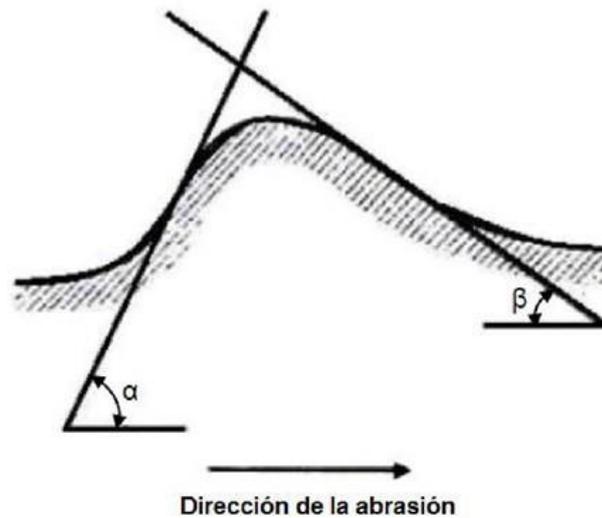


Fig. 1.4. Pendientes de las asperezas de una superficie erosionada [5].

La rugosidad de las superficies se ha descrito de la siguiente forma:

- a) La altura máxima de una cresta a un valle,  $R_t$  (ver, Fig. 1.3) en mm;
- b) La línea central media,  $l$  en cm o  $R_a$ , y la raíz media cuadrática,  $R_s$ ; y
- c) La curva de apoyo.

Además, es importante hacer una estimación de la longitud de onda y especificar el espaciamiento entre asperezas, para ello es necesario determinar el número de crestas para una determinada longitud. Un método común es expresar la altura promedio de las ondulaciones superficiales calculando la línea central media  $R_a$  o la raíz media cuadrática  $R_s$ . El valor de  $R_a$  y  $R_s$  para una longitud están dados por las Ecs. 1.1 y 1.2, respectivamente [4].

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Y| dx \quad (1.1)$$

$$R_s = \left( \frac{1}{l} \int_0^l y^2 dx \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1.2)$$

### 1.2.3. CONTACTO DE SÓLIDOS

Si se presiona una superficie sobre otra, la carga se soporta por los bordes de unas cuantas crestas en la superficie inferior, suponiendo que el miembro superior del par metálico sea perfectamente plano. Así pues, existe un área de contacto aparente en la intercara de ambas superficies, aunque en las puntas de las asperezas el área real de contacto sólo es de unos cuantos puntos [4].

Si se considera que un cuerpo hemisférico duro se desliza sobre una superficie blanda y lisa bajo la acción de una carga ( $F$ ) como se presenta en la Fig. 1.5, y se supone que la espiga y la superficie son perfectamente lisas, entonces se puede demostrar que el área real de contacto es proporcional a la raíz cúbica de la carga al cuadrado si el contacto es de naturaleza elástica (ver, Ec. 1.3), esto significa que la carga es baja y ninguno de los dos materiales alcanza el esfuerzo de fluencia [4].

$$A_e = \pi \left[ \frac{3Fr}{4E} \right]^{\frac{2}{3}} \quad (1.3)$$

donde:

$F$  es la carga normal aplicada en N,

$r$  es el radio de la curvatura en mm,

$E$  es el módulo de Young en MPa, y

$A_e$  es el área de contacto elástico en mm<sup>2</sup>.

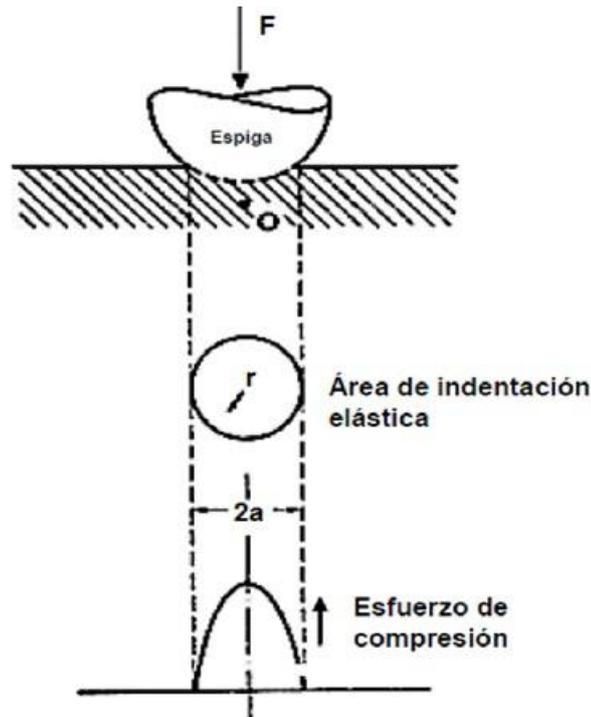


Fig. 1.5. Cuerpo hemisférico que presiona sobre una superficie plana [4].

Sin embargo, las superficies ingenieriles, nunca son perfectamente lisas ya que además de tener asperezas, éstas a su vez estarán cubiertas de microasperezas tal como se presenta en la Fig. 1.6. Archard demostró que el área real de contacto elástico es casi proporcional a la carga cuando en el análisis se consideran las asperezas y se toma en consideración su rugosidad (microasperezas) [6].

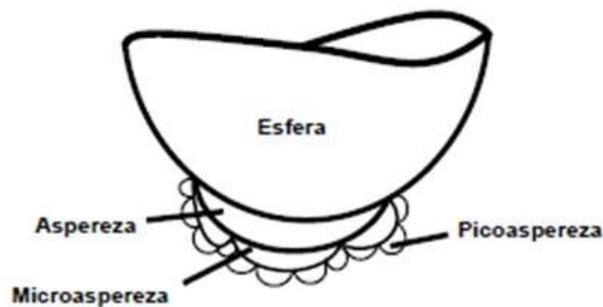
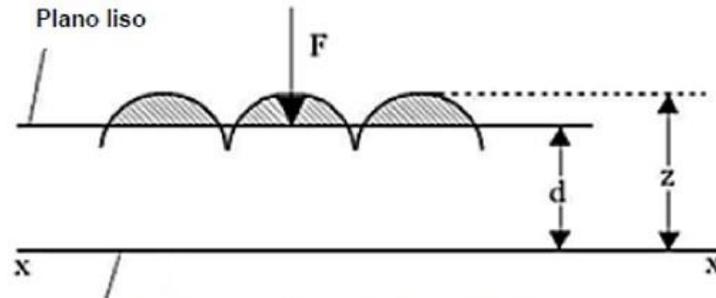


Fig. 1.6. Esfera con microasperezas [4].

Dejando de lado la presencia de microasperezas, Halling idealizó una superficie rugosa con asperezas perfectamente esféricas, cada una de radio  $R$  [7]. Otra asunción que se hizo en lo que a la superficie lisa respecta es la penetración de estas protuberancias y la carga normal aplicada ( $F$ ) es tal que

la deformación es totalmente elástica. Así, estas suposiciones le sirvieron para demostrar que, si el contacto es elástico, el área real de contacto no es directamente proporcional a la carga normal aplicada, lo cual se presenta en la Fig. 1.7.



Plano de referencia sobre la superficie rugosa  
Fig. 1.7. Superficie rugosa idealizada penetrada por una superficie plana [4].

A partir de lo cual se dedujo la Ec. 1.4:

$$F_e = \frac{4E}{3\pi^2 n^2 r} A_e^{\frac{3}{2}} \quad (1.4)$$

donde:

$F_e$  es la carga normal aplicada en N, y

$n$  es el número de aspereza por unidad de área en  $\text{mm}^2$ .

En el mismo sentido de la Ec. 1.4 se puede deducir que:

$$A_e = \alpha F_e^{\frac{2}{3}} \quad (1.5)$$

El análisis anterior se basó en una distribución de aspereza idealizada, ya que las superficies reales tienen asperezas de altura variable y distribución aleatoria, tal como se presenta en la Fig. 1.8.



Fig. 1.8. Una superficie real penetrada por una superficie plana [4].

Greenwood y Williamson encontraron que el área real de contacto es directamente proporcional a la carga normal aplicada, aunque el contacto sea elástico, este resultado fue obtenido al realizar estudios en superficies rugosas reales [8].

Si a la superficie de la Fig. 1.7 se le aplica una carga normal que provoque el flujo plástico en dicha superficie, ésta presentará endurecimiento por trabajado en frío. En este sentido, los contactos posteriores con esta superficie serán de naturaleza elástica [4].

#### 1.2.4. FRICCIÓN

Bodwen y Tabor consideran la resistencia a la fricción entre dos superficies como la suma de dos componentes: una a cortante y otra de hundimiento [9]. Así, si nuevamente se considera que una espiga hemisférica se apoya sobre una superficie plana bajo la acción de una carga normal  $F$ , esto ocasionará que en la superficie plana se forme una curva cóncava  $AOB$  cuya altura máxima es  $OC$  ( $h$ ) y un aplastamiento de cuerda  $d$  (diámetro de contacto), tal como se presenta en la Fig. 1.9a. Sea  $f_f$  la resistencia a la fricción, que es la fuerza tangencial necesaria para iniciar el deslizamiento como se observa en la Fig. 1.9b.

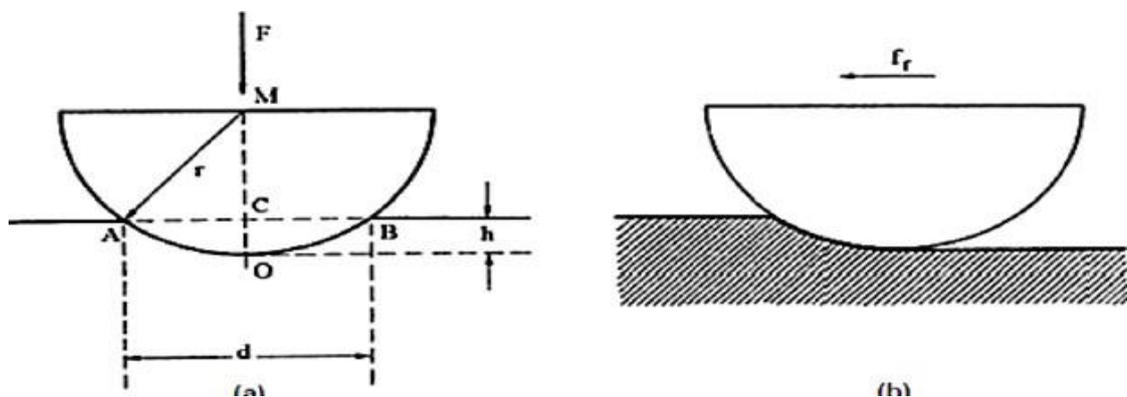


Fig. 1.9. Una espiga hemisférica se desliza sobre una superficie suave bajo la acción de una carga: (a) Espiga estacionaria; y (b) Espiga en movimiento, produciendo una huella en forma de ranura [4].

El efecto de la carga  $F$  es provocar la deformación de aquellas asperezas de la superficie plana que han hecho contacto con la espiga. Esto es, las superficies de los dos cuerpos se adhieren donde existe contacto.

Esto provoca que el esfuerzo cortante que hace que las uniones formadas por deformación plástica se rompan completamente antes de que la espiga se pueda mover sobre la superficie. Si  $\tau$  es el esfuerzo cortante del metal de la superficie que ha fluido plásticamente y  $A_t$  es el área de contacto real entre caras, la fuerza cortante en la superficie (S) se define por la Ec. 1.6:

$$S = A_t \tau \quad (1.6)$$

Es evidente que, para mover horizontalmente la espiga en la misma dirección, se requiere de una fuerza adicional para desplazar la pared de metal delante de ella, a medida que se hunde en el metal de la superficie. Esta fuerza adicional es llamada factor de compresión  $P$ , la cual está dado por la Ec. 1.7:

$$P = A' \sigma_y \quad (1.7)$$

donde:

$A'$  es el área de la trayectoria correspondiente al segmento  $AOBC$  (área de contacto), ver Fig. 1.9a y está dada por la ecuación 1.8:

$$A' = \frac{d^3}{12r} \quad (1.8)$$

Sustituyendo la Ec. 1.8 en la Ec. 1.9 se obtiene:

$$P = \frac{d^3}{12r} \sigma \quad (1.9)$$

Puesto que la resistencia a la fricción total,  $f_f$ , está dada por la suma de los factores de cortante y compresión, la Ec. 1.10 se expresa:

$$f_f = A_t \tau + \frac{d^3}{12r} \sigma \quad (1.10)$$

Para la mayoría de los metales duros apoyados sobre superficies blandas, o posiblemente para la mayoría de las combinaciones con cargas ligeras, la profundidad de la indentación es pequeña, de manera que el término  $d$  en la Ec. 1.9 se puede despreciar y el factor de compresión se hace insignificante. En este caso se tiene la Ec. 1.11:

$$f_f = A_t \tau \quad (1.11)$$

Por otro lado, el coeficiente de fricción,  $\mu$ , es la resistencia a la fricción por unidad de carga, y está dado por la siguiente ecuación:

$$\mu = \frac{\tau}{\sigma} \quad (1.12)$$

Amontons en 1699 postuló dos leyes sobre la fricción, confirmados por los resultados anteriores, las cuales son:

- a) Primera ley: la fuerza a la fricción es independiente del área aparente de contacto y es sólo proporcional a la fuerza aplicada.
- b) Segunda ley: el coeficiente de fricción es independiente de la carga aplicada.

### 1.2.5. TEORÍA MOLECULAR DE LA FRICCIÓN Y DEL DESGASTE

La teoría molecular de la fricción y del desgaste fue propuesta por Tomlinson. Este investigador estudió detalladamente la naturaleza de las fuerzas atómicas en un retículo cristalino y dedujo expresiones para la fricción seca y el desgaste de sólidos [4].

La hipótesis de Tomlinson consiste fundamentalmente en que en condiciones de equilibrio las fuerzas de repulsión entre los átomos de un

sólido contrarrestan las fuerzas de cohesión. Sin embargo, cuando dos superficies se encuentran en contacto, un átomo de uno de ellos llegará a estar lo bastante cerca de otro átomo del segundo cuerpo como para entrar al campo de repulsión. Cuando esto sucede, las dos superficies se separan causando una pérdida de energía que se manifiesta como la resistencia debida a la fricción [4].

Cuando un átomo se desplaza de su estado natural de equilibrio, tiende a regresar a su posición original. Sin embargo, durante una separación puede entrar al campo de atracción de algún átomo vecino, así el átomo en tránsito queda sujeto a una atracción dictada por una distancia de separación  $l$  en ese instante y considerando la fuerza interatómica de cohesión,  $F_0$ , entre dos átomos en el cristal. La energía media,  $E$ , para un contacto atómico puede expresarse como  $E=F_0l$  y considerando que la energía total perdida es  $nE$ , la cual es igual al trabajo mecánico que viene expresado por  $\mu Px$ , por lo tanto, la Ec. 1.13 dicta que:

$$\mu = \alpha \frac{F_0 l}{ep_0} \quad (1.13)$$

donde:

$\mu$  es el coeficiente de fricción,

$\alpha$  es el factor de probabilidad,

$e$  es el número de hileras de átomos, y

$p_0$  es el valor medio aritmético de las fuerzas individuales de repulsión.

Los términos  $F_0$  y  $p_0$  están asociados con las constantes elásticas del material. Además, la Ec. 1.13 demuestra que el coeficiente de fricción es independiente de la carga aplicada [10].

El grado de proximidad o de deformación entre dos superficies depende de la probabilidad estadística a medida que las superficies se separan en el plano horizontal durante el deslizamiento y tratan de acoplarse debido a las fuerzas de atracción entre sus átomos. Cuando se encuentran suficientemente cerca, los átomos se repelen y su tendencia natural es regresar a su posición original. Una hipótesis acertada para determinar el

grado de proximidad entre dos superficies consiste en que un átomo se puede desprender y moverse a una distancia lo suficientemente dentro del campo de otro átomo en la superficie opuesta, donde encuentra una nueva posición de equilibrio. Esto significa que los átomos de un cuerpo pueden ser extraídos por los otros átomos en la superficie opuesta. Según Tomlinson, éste es el mecanismo del desgaste, la Ec. 1.14 la cual expresa la masa total de metal eliminado bajo los efectos del desgaste:

$$M = \frac{2\alpha E_t \rho}{\mu \sigma_y} \quad (1.14)$$

donde:

$M$  es la masa total de metal eliminado en g,

$\rho$  es la densidad del metal que se desgasta  $\text{g/mm}^3$ ,

$\sigma_y$  es el esfuerzo de fluencia en MPa,

$\mu$  es el coeficiente de fricción,

$\alpha$  es el factor de probabilidad, y

$E_t$  es la energía total disipada en kJ.

Así, en la Ec. 1.14 se demuestra que la masa total de material eliminado es inversamente proporcional al esfuerzo de fluencia [4].

### 1.2.6. DESGASTE POR FRICCIÓN

Los procesos de desgaste en metales se clasifican según el tipo de mecanismo que cause la eliminación del material de las superficies. Si la pérdida de volumen o peso se grafica en forma continua relacionándola con la distancia de deslizamiento, se obtiene una curva característica como la que se presenta en la Fig. 1.10. El punto O corresponde al encendido de la máquina; es decir, cuando la distancia de deslizamiento es cero.

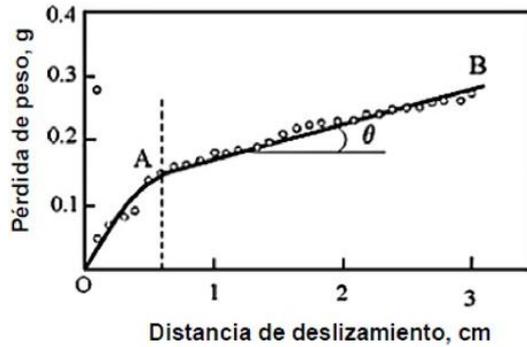


Fig. 1.10. Curva característica de desgaste contra distancia de deslizamiento [4].

En la Fig. 1.10 se puede observar el patrón de una curva de desgaste típica, el segmento  $AO$  es el desgaste inicial de acoplamiento y  $AB$  es el estado estacionario y tiene una tendencia lineal. La pendiente del régimen estacionario se utiliza para expresar la razón de desgaste de un material por unidad de distancia de deslizamiento a una carga y velocidad determinada, la cual será una constante para cada material, dependiendo de la naturaleza de la otra superficie; dicha pendiente se define como  $\tan \theta$ .

Se puede establecer una ecuación matemática (Ec. 1.15) para el desgaste inicial de acoplamiento, también conocida como estado inestable o transitorio, durante los primeros instantes del desgaste, la proporción de volumen eliminado por unidad de distancia deslizada debe ser función del volumen de metal disponible en las uniones, en términos matemáticos se expresa por medio de la Ec. 1.5:

$$\frac{dV}{dS} = -nV \quad (1.15)$$

donde:

$V$  es el volumen de material eliminado,

$n$  es la constante que depende de la carga aplicada, y

$dV/dS$  es la razón de volumen de desgastado.

El signo negativo representa el caso en que el volumen original en las uniones disminuye con la distancia de deslizamiento [4].

### 1.2.7. DESGASTE POR ADHERENCIA

Dos superficies que interactúan no sólo tienen contacto en unos puntos aislados, sino que hace que aparezcan esfuerzos elevados en estas áreas, lo cual produce una deformación plástica entre las superficies. Hasta ahora, no existe una ecuación general que permita relacionar todos los elementos involucrados en el desgaste y que pueda ser utilizada por los ingenieros de diseño, posiblemente porque el desgaste es un proceso complejo que depende, entre otras variables de la carga normal, la estructura cristalina y las propiedades mecánicas de los materiales. Sin embargo, se han formulado ecuaciones para el desgaste y se ha estudiado el desgaste por adherencia que se define como el proceso que produce pérdida de metal entre superficies que interactúan como resultado de la adherencia entre asperezas [4].

Como se ha establecido anteriormente, Tomlinson dedujo que el desgaste es inversamente proporcional al esfuerzo de fluencia del metal. De esta deducción tomó base R. Holm y propuso una ecuación que establece que a medida comienza el deslizamiento, el contacto entre átomos elimina a los átomos superficiales en los encuentros favorables, de manera que la pérdida de volumen  $V$  para una distancia de deslizamiento  $S$  viene dado por [11]:

$$\frac{V}{S} = \beta \frac{F}{\sigma_y} \quad (1.16)$$
$$\frac{V}{S} = \beta A_t$$

donde:

$S/V$  es la razón de volumen desgastado,

$\beta$  es el número de átomos que se eliminan por encuentro, y

$A_t$  es el área real de contacto.

El término  $S/V$  es la razón del volumen desgastado por unidad de distancia deslizada y se observa que es inversamente proporcional al esfuerzo de fluencia, se puede observar una similitud a la Ec. 1.14. [4]

La Ec. 1.16 se establece que el volumen total de material eliminado por deslizamiento es proporcional a la carga normal aplicada y a la distancia de deslizamiento e inversamente proporcional al esfuerzo de fluencia [4].

La supuesta remoción de metal por extracción de átomos ha sido rebatida por muchos investigadores en base a que los residuos del desgaste invariablemente son agregados de partículas metálicas más pequeñas. Esto indica que, en un encuentro, se elimina una fracción de los límites de las superficies que es mucho mayor que el tamaño de un átomo [4].

Se han realizado ensayos para determinar la razón de desgaste, haciendo correr espigas cónicas de latón y de acero sobre discos de acero, al graficar diferentes puntos del volumen de metal eliminado contra distancia de deslizamiento, se observa un período inicial de acoplamiento seguido por un estado estacionario de desgaste, como se puede observar en la Fig. 1.11 [4].

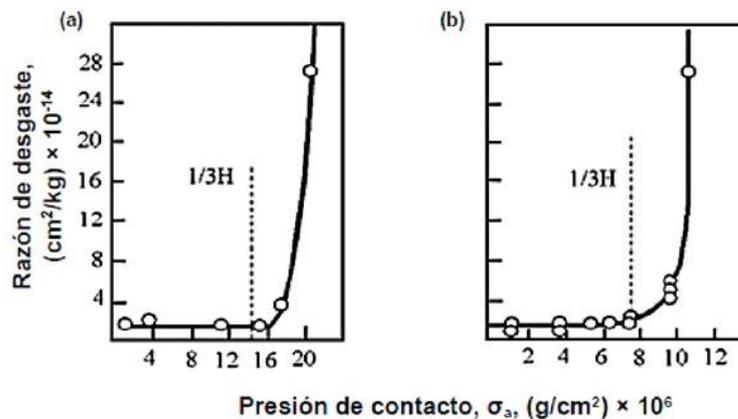


Fig. 1.11. Razón de desgaste en función de la presión de contacto aparente [4].

En base a la Fig. 1.11 Burwell y Strang dedujeron la Ec. 1.17:

$$h = \beta \frac{\sigma_a}{\sigma_y} S \quad (1.17)$$

donde:

$h$  es la altura perdida debido al desgaste,

$\sigma_a$  es la presión de contacto aparente ejercida por la espiga sobre el disco,

$\beta$  es la probabilidad de producir un fragmento por desgaste en un encuentro,

$\sigma_y$  es el esfuerzo de fluencia, y  
 $S$  es la distancia de deslizamiento.

En la Ec. 1.17 se representa la pérdida de altura de la espiga debido al desgaste. Burwell y Strang graficaron la razón de desgaste expresada como  $h\sigma_a / S$  vs  $\sigma_a$ , registrando que para una presión de contacto  $\sigma_a$ , ésta es equivalente a la tercera parte de la dureza de la espiga; por lo tanto, se obtiene un considerable aumento en el valor de la razón de desgaste [4].

Dos superficies planas hacen contacto con las periferias superiores que fluyen plásticamente a causa de los esfuerzos localizados que se concentran en ciertos puntos de la superficie. Cuando la carga es muy baja, el contacto sólo ocurre en tres puntos y, a medida que aumenta el esfuerzo externo, el área inicial de contacto se incrementa, cuando esto sucede, se da una mejor adherencia entre los dos metales; esto es, el espacio entre las dos superficies disminuye, lo que da como resultado que más protuberancias hagan contacto en otras partes. Se descarta la idea de que se eliminen átomos aislados de las superficies; es decir, se supone que el desgaste se produce por eliminación de fragmentos de metal de la superficie [4].

No todas las uniones que se rompen forman residuos de desgaste, esto es importante ya que se sabe que una fricción alta no necesariamente corresponde a un desgaste proporcionalmente alto; por otro lado, mientras que la ruptura de cada unión da como resultado una componente de resistencia al deslizamiento, no siempre se produce un desprendimiento de la superficie metálica que produzca la formación de residuos, lo que puede significar simplemente que a medida que se rompa la unión, permanece unida a la superficie metálica en forma de áreas rugosas microscópicas o bien si es plástica puede extenderse sobre la superficie metálica [4].

Las superficies reales no se encuentran en una distribución regular de protuberancias hemisféricas, sino que tienen formas probablemente entre cono y hemisferio. Un factor importante de las superficies tribológicas es que pronto se endurecen por trabajado en frío hasta cierta profundidad y es probable que la interacción sea principalmente elástica, ya que el esfuerzo cortante hertziano máximo se haya por debajo de la superficie, es probable

que un agrietamiento por fatiga empiece por un punto y se propague a la superficie para producir residuos de desgaste [4].

Si la adhesión entre los metales es más fuerte que uno de los metales, o que ambos, el metal más débil sufrirá fractura, en este caso, parte del metal de menor dureza se adhiere al otro. La aspereza a la que se adhiere el metal será más grande y probablemente encontrará más asperezas que antes, además, en algunas áreas se desarrollará una condición de metales semejantes en contacto, ambos resultados tenderán a promover aún más adhesiones y más transferencia de metal [4].

La transferencia de metal de una parte a otra ocasionará que una de las partes parezca más desgastada, este desgaste se presentará únicamente en las áreas de las asperezas y tenderá a ocurrir en forma lineal, a esto se le caracteriza por la condición de rayado. Si se desarrollan suficientes adhesiones, la fuerza requerida para romperlas será superior a la fuerza aplicada en la operación, y los metales quedarán imposibilitados para deslizarse entre ellos, esto es lo que se le conoce como condición de desbastado [4].

El desgaste por adherencia se ha analizado y como resultado se han obtenido ecuaciones, pero tomando en consideración que las superficies que se encuentran en contacto estén perfectamente limpias; es decir, que se encuentren libres de contaminantes, pero en la realidad esto no puede ocurrir, debido a que no se cuenta con condiciones de limpieza química ya que esto se encuentra al vacío y en las atmósferas naturales [4].

Para el desgaste mecánico se requieren  $1/\beta$  encuentros para que se acumule un espesor crítico de óxido ( $\xi$ ) antes de que éste se separe para formar una partícula de desgaste. Es probable que la película se elimine por hundimiento causado por una aspereza de mayor dureza.

Al realizar las sustituciones requeridas a la Ec. 1.16 se tiene la Ec. 1.18:

$$\frac{V}{S} = \left[ A_0 \exp \exp \left( -\frac{E}{RT} \right) \frac{d}{v\xi^2\rho^2} \right] \frac{F}{\sigma_y} \quad (1.18)$$

$$\beta = A_0 \exp \exp \left( -\frac{E}{RT} \right) \frac{d}{v\xi^2\rho^2} \quad (1.19)$$

donde:

$A_0$  es la constante de Arrhenius;

$R$  es la constante universal de los gases;

$T$  es la temperatura absoluta de la superficie deslizante;

$d$  es el diámetro del área de contacto;

$v$  es la velocidad de deslizamiento;

$\xi$  es el espesor crítico de óxido;

$\rho$  es la densidad de la capa de óxido [4].

Debido a que el desgaste en volumen por unidad de distancia deslizada está directamente relacionada con  $\beta$ , un valor alto de este parámetro significa un incremento en el grado de desgaste y viceversa. Si la película de óxido es delgada permanecerá unida a la superficie y la pérdida de volumen estará restringida; sin embargo, se conoce bien el efecto protector de la película de óxido en relación con el daño y desgaste de la superficie [4].

C. N. Rowe realizó una modificación a la ecuación para el desgaste por adherencia que presentó Holm, en la cual dicha modificación fue incorporar un factor  $\alpha$  que toma en consideración la presencia de contaminantes superficiales, el cual se define matemáticamente como  $\alpha = A_t/A$  donde  $A_t$  es el área real y  $A$  es el área aparente de contacto. Esta relación tiene un valor entre cero y la unidad, por lo tanto, la ecuación modificada para el volumen de material eliminado  $V$  que corresponde a una distancia de deslizamiento  $S$  está dado por la Ec. 1.20:

$$V = \alpha\beta A_t S \quad (1.20)$$

De la Ec. 1.20 se puede deducir que cuando  $A_t$  es cero, no existirá desgaste, aunque para que  $\alpha$  sea la unidad, el área aparente debe ser igual al área total de las uniones [4].

### 1.2.8. TRANSFERENCIA DE METALES DURANTE EL DESGASTE

Es evidente que el proceso de desgaste en situaciones de deslizamiento se relaciona con la formación y el crecimiento de uniones nucleadas por las asperezas que entran en contacto. Es probable que el deslizamiento bajo una carga provoque un cambio en las propiedades metalúrgicas de los materiales en contacto y el efecto tiene una influencia significativa sobre el modo de desgaste [4].

Los estudios cuantitativos de la transferencia de metal se han llevado a cabo mediante técnicas de rastreo con un estilete radioactivo en las que una espiga radiada se desliza sobre una superficie no radiada y la cantidad de metal que se transfiere se registra por medio de un contador Géiger-Muller unido a la máquina de desgaste. En la Fig. 1.12 se presenta que el primer efecto del deslizamiento es que la espiga se desgaste con mayor rapidez, sin embargo, se llega a una etapa en que la cantidad de metal transferido alcanza un valor constante cuando la rapidez de desgaste llega al estado estacionario [4].

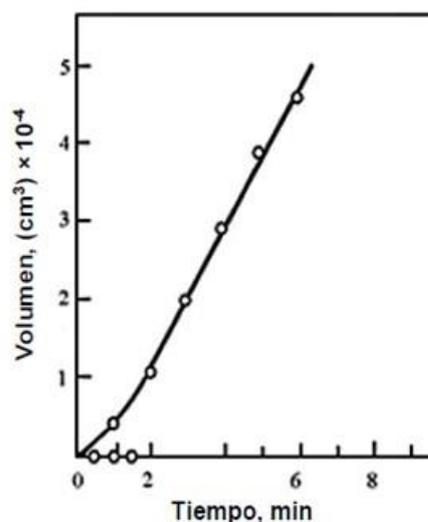


Fig. 1.12. Variación entre el tiempo de desgaste y la transferencia de metal de una espiga de latón que se desliza sobre un anillo de estelita [4].

El deslizamiento continuo resulta en un incremento del tamaño de los fragmentos y en la rugosidad de las superficies. El metal se transfiere en forma

de partículas discretas según Kerridge y Lancaster, quienes demostraron que un fragmento de desgaste que se desprende de las superficies es aproximadamente ocho veces el área de la partícula transferida y seis veces su espesor [4].

### **1.2.9. EFECTO DE LA TEMPERATURA Y LA VELOCIDAD**

Antes de establecer los efectos causados por los cambios de temperatura y velocidad se tiene que recordar que para la realización del estudio del desgaste se consideran diferentes factores necesarios para describirlo; por lo tanto, es ahí donde radica su complejidad. Los principales factores que intervienen en el desgaste pueden enumerarse de la forma siguiente:

- a) Variables relacionadas con los materiales en contacto: dureza, tenacidad, estructura y composición química.
- b) Variables relacionadas con el servicio: materiales en contacto, presión, velocidad, temperatura, acabado de la superficie, lubricación y corrosión.

Además, el desgaste que ocurre en la práctica es, en la mayoría de los casos, una combinación de los diferentes tipos de desgaste. Pequeñas partículas que se encuentran entre dos superficies en contacto pueden dar como resultado un desgaste por abrasión, o bien los productos resultantes del proceso de corrosión pueden dar como resultado el desgaste y un daño posterior [4].

Se ha demostrado que el desgaste de los metales depende principalmente de la interacción de asperezas entre dos superficies que deslizan. La energía disipada debido al trabajo mecánico inevitablemente ocasiona un incremento en la temperatura, aunque esto sucede de manera intermitente en lo que se refiere a los puntos de contacto real por la adherencia y posterior deslizamiento de las uniones. Estos incrementos momentáneos de temperatura tienen una duración del orden de  $10^{-4}$  s. El calor que se desprende en la fricción se disipa en el área circundante, lo que ocasiona que las puntas de las asperezas alcancen temperaturas elevadas, aunque el

cuerpo del componente permanezca relativamente frío. Un incremento en la carga o en la velocidad de deslizamiento aumenta la temperatura de las uniones y, en casos extremos, puede causar fusión incipiente [4].

No existe una forma simple de medir las temperaturas de las áreas reales de contacto, pero se puede obtener la temperatura general de un par de metales en interacción. Puesto que tanto la ley del desgaste por adherencia como la del desgaste por abrasión consideran que las propiedades mecánicas como esfuerzo de fluencia y dureza del metal se ven afectadas por el ambiente térmico, es por ello que es conveniente realizar un estudio de la fricción y del desgaste a temperaturas altas, lo cual resulta importante debido a que las partes rotatorias deben trabajar a altas temperaturas [4].

J. K. Lancaster realizó experimentos a diferentes temperaturas a espigas de latón 60/40 sobre discos de acero, los cuales lo llevaron a demostrar que a medida que se incrementa la temperatura se aumenta la razón de desgaste de la espiga, logrando así determinar un valor límite de temperatura, el cual depende de la carga normal aplicada, tal como se presenta en la Fig. 1.13, y al sobrepasar el valor máximo se tiene una caída en la razón de desgaste del latón [4].

En la Fig. 1.13 se presenta la razón de desgaste a una carga constante de 2 kg, con una rotación del disco a una velocidad de deslizamiento de 1.3 cm/s, se utilizó una velocidad de deslizamiento baja para mantener al mínimo el calor producido por fricción. El primer régimen de desgaste (Fig. 1.13) demuestra que la resistencia de contacto es casi constante, pero existe un pequeño incremento progresivo en la fricción. Esto demuestra que la dureza del latón en la espiga disminuye con la temperatura y la razón de desgaste aumenta por ser inversamente proporcional a esta propiedad mecánica.

A cualquier temperatura, existe una carga de transición bajo la cual los óxidos superficiales no se destruyen por completo y la razón de desgaste es baja. Por encima de la carga de transición el contacto metal a metal es amplio y el desgaste es alto. Se ha demostrado que, con cualquier carga o temperatura, el mecanismo de desgaste ocurre por transferencia del latón sobre el disco de acero y posteriormente se desprende la película depositada [4].

Hughes y Spurr han efectuado deslizamiento de espigas de acero sobre discos de hierro colado en un intervalo de velocidades de 100 – 500 cm/s y con cargas variables entre 0.8 – 3 kg. Al incrementar la carga y la velocidad, aumenta la temperatura disminuyendo en consecuencia la dureza de la espiga. Se logró medir la dureza de acero a la temperatura resultante determinada por una combinación particular de carga y velocidad. Si ahora la razón de desgaste se grafica contra el recíproco de la dureza medida, se obtiene una relación lineal, tal como se presenta en la Fig. 1.14 [4].

Puesto que al incrementar la velocidad de deslizamiento se produce un aumento de la temperatura de las superficies en contacto, lo cual favorece la formación de óxido. Un incremento en la temperatura significa también que la dureza del metal disminuye, produciendo un aumento en la razón de desgaste. Esto sucede, si la temperatura de las superficies en contacto es suficientemente elevada como para reducir la dureza provocada por los efectos residuales. Se sabe que a velocidades muy altas se produce la fusión de las superficies en contacto, efecto que se acentúa si el punto de fusión y la conductividad térmica del material son bajos [4].

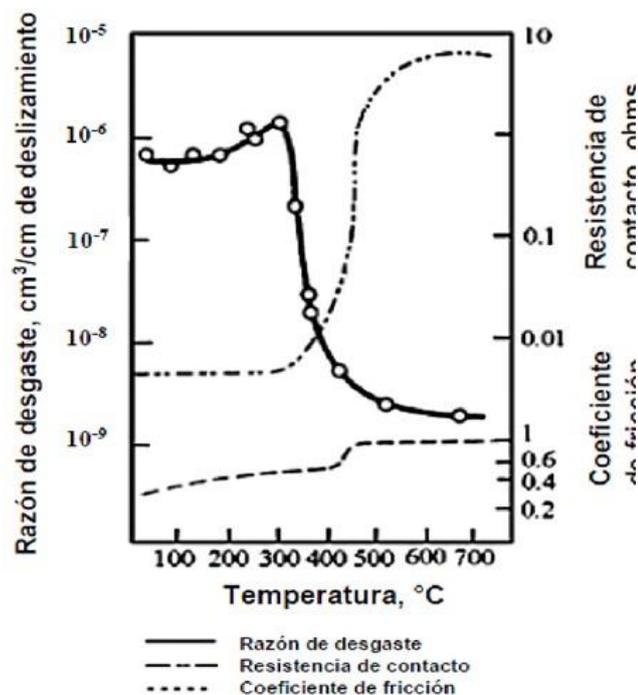


Fig. 1.13. Variación de la razón del desgaste con la temperatura para un latón (60/40), sobre acero para herramientas [4].

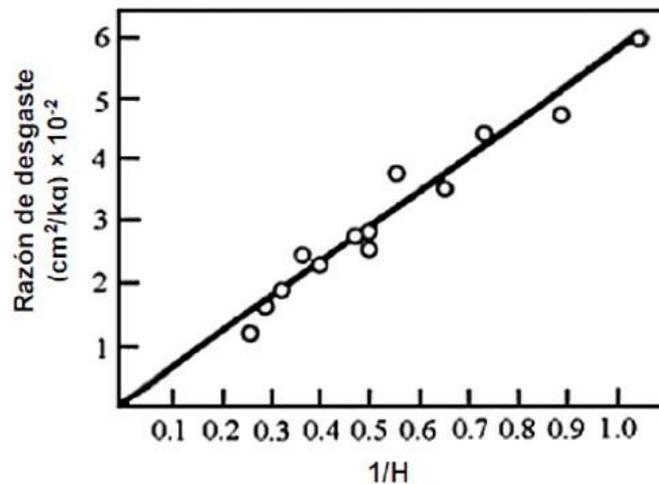


Fig. 1.14. Gráfica de la razón de desgaste en relación con el recíproco de la dureza [4].

Sin embargo, el efecto general de incrementar la velocidad de deslizamiento es causar una reducción en la razón de desgaste lo que se demuestra en un estudio detallado del desgaste de latón 60/40 sobre acero en un intervalo de velocidades de 0.01 a 500 cm/s utilizando una máquina de espiga sobre disco. En la Fig. 1.15, se presentan variaciones de razón de desgaste con una carga de 22.5 kg aplicándole velocidad y se aprecia un decremento seguido de un incremento en la razón de pérdida de metal cuando se sobrepasa una velocidad  $\sim 100$  cm/s. Hirts y Lancaster observaron la razón de transferencia de metal por medio de una técnica de trazadores radiactivos y en la Fig. 1.15 se presenta que ésta equivale a la razón de desgaste. En otras palabras, el mecanismo básico del desgaste no cambia cualquiera que sea la velocidad de deslizamiento; esto es, se transfiere metal de la espiga al disco y a partir de esta capa depositada se forman residuos de desgaste. Para determinar si esto es por el efecto de un incremento de temperatura, se realizó una serie de experimentos en los cuales la espiga se enfrió con agua [4].

Así, en la Fig. 1.16 se presenta que en ese caso la razón de desgaste continuó disminuyendo. A la inversa, si el latón se aislaba térmicamente del soporte de la espiga, el aumento del desgaste a alta velocidad fue mayor que el obtenido cuando la espiga no se encontraba aislada o se la enfriaba con agua [4].

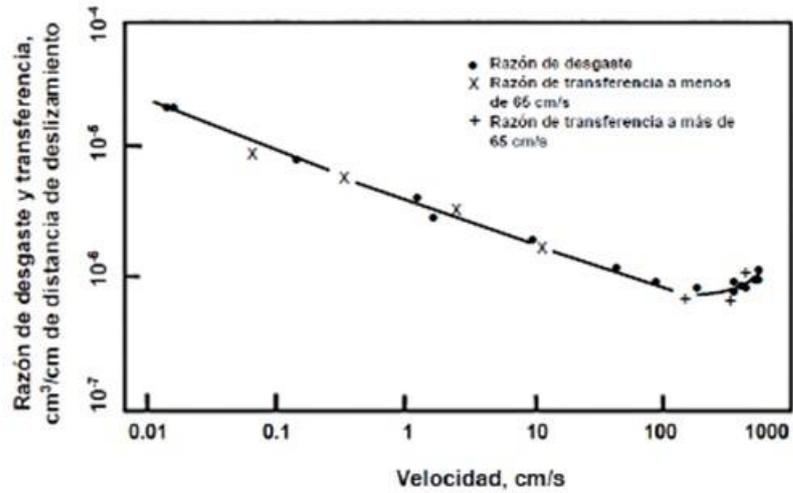


Fig. 1.15. Variación de la razón de desgaste y la transferencia de metal con la velocidad. Carga 22.5 kg [4].

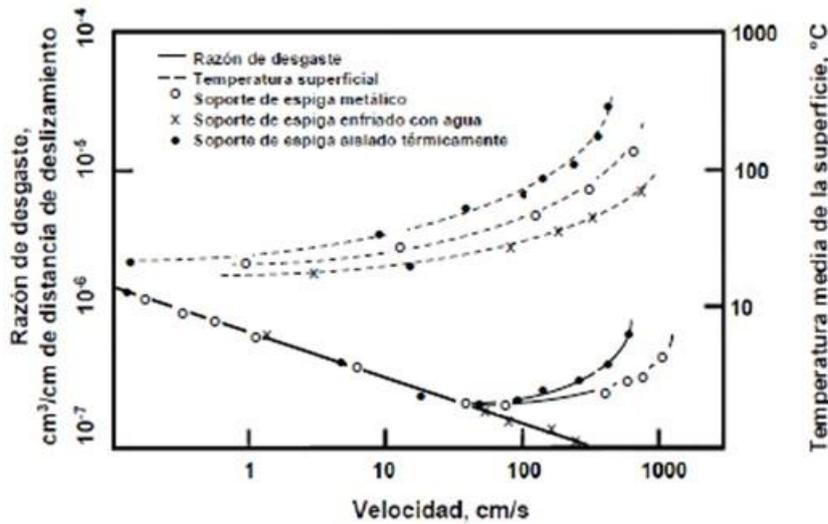


Fig. 1.16. Variación de la razón de desgaste y la temperatura superficial con velocidad para espigas aisladas térmicamente y enfriadas. Carga 3 kg [4].

### 1.2.10. EFECTO DE LA CARGA Y LA DISTANCIA DE DESLIZAMIENTO

Se ha descubierto que el desgaste se incrementa de forma casi proporcional a la carga. Sin embargo, esta relación se pierde con el calor de fricción. Si un metal como el cobre se presiona sobre el acero, cierta cantidad de cobre se transfiere al acero, de esa manera el área de la unión se podría estimar utilizando radiotrazadores. Rabinowicz demostró que la masa  $M$  de la fracción más grande de residuo se podría relacionar con la carga normal aplicada  $F$  por medio de la Ec. 1.21:

$$M = CF^\alpha \quad (1.21)$$

donde:

$C$  es una constante, y

$\alpha$  tiene un valor de 0.3 para el cobre sobre acero.

La naturaleza fraccionaria de  $\alpha$  en la Ec. 1.21 demuestra que la masa del fragmento de desgaste sólo se incrementa a medida aumenta la carga. El mismo estudio demostró que el efecto predominante de aumentar la carga aplicada fue que aumentara el número de uniones.

Lipson enunció como regla general que ante esfuerzos inferiores a 1/3 BHN (aproximadamente en el punto de fluencia), el desgaste será independiente de la carga.

Se ha determinado que la tasa de desgaste es linealmente proporcional a la distancia recorrida. Los resultados de experimentos realizados por Piggott y Wilman, graficados en la Fig. 1.17 presenta que el desgaste se inicia linealmente y después describe una curva exponencial.

En este tipo de experimentos cabe notar dos aspectos:

- Los resultados obtenidos presentan que la magnitud del desgaste en el arranque inicial no se puede determinar, y
- La pendiente del estado estacionario de desgaste por el contrario si se puede obtener.

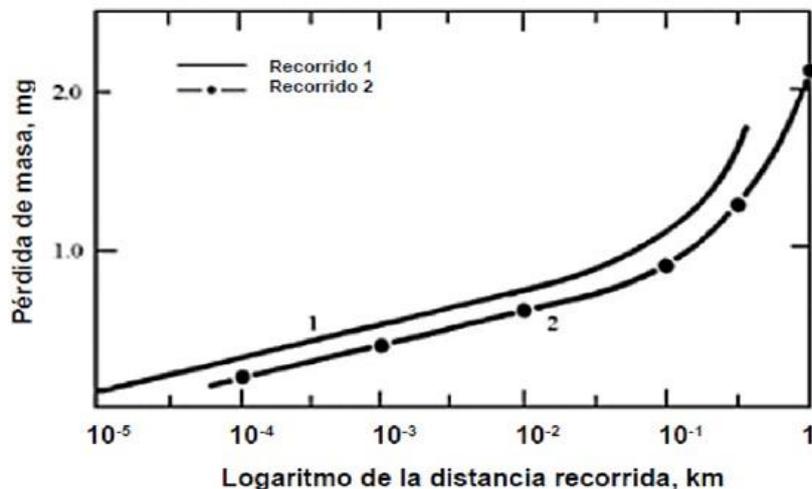


Fig. 1.17. Desgaste del acero vs acero a 100 kg/cm<sup>2</sup> y con lubricante líquido parafínico [4].

### **1.2.11. CAPA PROTECTORA**

Sobre todas las superficies se forma inevitablemente una capa de óxidos o gases sorbidos, pero sin ésta, muchos casos de deslizamiento en seco, como el caso de las vías de ferrocarril, no resistirían el servicio por un periodo aceptable. Invariablemente, en la mayoría de las situaciones se utilizan lubricantes líquidos o sólidos [4].

En la actualidad se tiene un renovado interés por evaluar los diversos tipos de tratamientos térmicos superficiales antes de poner en servicio los componentes, con el propósito de lograr resistencia al desgaste. Es decir, en forma general el tratamiento puede clasificarse en dos tipos, a saber, A) depósito de un metal o un no metal sobre otro componente, y B) Tratamiento de difusión como el carburizado o nitruración [4].

Como ejemplos de depósito están los fosfatos sobre hierro colado y acero o de estaño sobre aluminio. Estos tienen vidas limitadas y protegen las superficies del daño severo durante el arranque inicial. Otras formas de tratamiento por difusión son, la sulfurización, cromación y los recubrimientos electrolíticos. La metalización y aspersion del metal o las técnicas de recubrimientos con superficies duras, como el uso de revestimientos soldados, también proporcionan películas resistentes al desgaste. En muchos textos de metalurgia se encuentran descripciones detalladas de los materiales y procesos empleados en estas aplicaciones [4].

### **1.3. MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS Y SOFTWARE DE SIMULACIÓN**

Este es un método numérico para la solución de problemas de ingeniería, comúnmente utilizado para la resolución de problemas de alto grado de complejidad de matemáticas aplicadas, así como las fisicomatemáticas ya que la gran mayoría de problemas que se presentan en estas áreas, comúnmente involucran geometrías complejas, cargas no distribuidas y determinación de las propiedades de los materiales, por lo que generalmente no es posible obtener alguna solución analítica directamente de expresiones matemáticas [12].

El desarrollo de un algoritmo de elementos finitos para resolver un problema definido mediante ecuaciones diferenciales y condiciones de frontera requiere en general las siguientes etapas:

- 1) El problema debe reformularse en forma variacional, es decir se deben recopilar todos los parámetros que varían con la ubicación espacial del punto de análisis [12].
- 2) El dominio de variables independientes (usualmente un dominio espacial para problemas dependientes del tiempo) debe dividirse mediante una partición en subdominios, llamados elementos finitos. Asociada a la partición anterior se construye un espacio vectorial de dimensión finita, llamado espacio de elementos finitos. Siendo la solución numérica aproximada obtenida por elementos finitos una combinación lineal en dicho espacio vectorial [12].
- 3) Se obtiene la proyección del problema variacional original sobre el espacio de elementos finitos obtenido de la partición. Esto da lugar a un sistema con un número finito de ecuaciones, aunque en general con un número elevado de ecuaciones incógnitas. El número de incógnitas será igual a la dimensión del espacio vectorial de elementos finitos obtenido y, en general, cuanto mayor sea dicha dimensión tanto mejor será la aproximación numérica obtenida [12].
- 4) El último paso es el cálculo numérico de la solución del sistema de ecuaciones [12].

Los pasos anteriores permiten construir un problema de cálculo diferencial en un problema de álgebra lineal. Dicho problema en general se plantea sobre un espacio vectorial de dimensión no finita, pero que se puede resolver aproximadamente encontrando una proyección sobre un subespacio de dimensión finita, y por lo tanto con un número finito de ecuaciones (aunque en general el número de ecuaciones será elevado típicamente de miles o incluso centenares de miles). La discretización en elementos finitos ayuda a construir un algoritmo de proyección sencillo, logrando además que la solución por el método de elementos finitos sea generalmente exacta en un conjunto finito de puntos. Estos puntos coinciden usualmente con los vértices de los elementos finitos o puntos destacados de los mismos. Para la

resolución concreta del 15 enorme sistema de ecuaciones algebraicas en general pueden usarse los métodos convencionales del álgebra lineal en espacios de dimensión finita [12].

El desarrollo moderno del método de elementos finitos comenzó en la década de 1940 en el campo de la mecánica estructural con el trabajo de Hrennikoff, McHenry y Newmark, quienes emplearon una malla de elementos lineales (varillas y vigas) para solucionar problemas relacionados con el cálculo de esfuerzos en sólidos continuos. Básicamente el método de elementos finitos es una técnica numérica que convierte el dominio de una estructura continua en valores discretos [13].

Existen algunos errores que son inevitables del método de análisis por elementos finitos. Estos errores son:

- a) Errores Computacionales: Estos se deben a errores de redondeo provenientes de los cálculos de puntos flotantes de la computadora y de las formulaciones de los esquemas de integración numérica que se utilizan. La mayoría de los códigos comerciales de elemento finito se concentran en reducir estos errores y, en consecuencia, el analista por lo regular se interesa en los factores relacionados con los valores discretos [13].
- b) Errores de conversión directa: La geometría y distribución del desplazamiento de una estructura real varía continuamente. Mediante el uso de un número finito de elementos para modelar la estructura introduce errores al igualar la geometría y distribución del desplazamiento debido a las limitaciones matemáticas inherentes a los elementos [13].

Cada vez más ingenieros están usando Modeladores de sólidos con el Método de los elementos finitos para solucionar problemas cotidianos de estados de tensiones, deformaciones, transferencia de calor, flujo de fluidos, electromagnetismo, entre otros. El manejo básico de ANSYS Workbench, uno de los programas de modelaje de sólidos, simulación y optimización más integrales y extendidos [14].

Ansys es un software que utiliza la metodología de los elementos finitos para realizar análisis y cálculos de diferentes tipologías muy utilizados e incluso necesarios actualmente en el mundo de la ingeniería [15].

Ansys permite realizar ensayos mecánicos sobre modelos sólidos tridimensionales, placas, elementos simétricos, modelos simplificados de revolución en 2D, etc. Además, permite hacer ensayos dinámicos, en régimen transitorios, aplicando fuerzas y condiciones de contorno de entrada siguiendo multitud de ecuaciones. Por otro lado, Ansys permite realizar análisis con fluidos, el llamado CFD, también en régimen estático permanente o dinámico [15].

Ansys permite por si fuera poco, mezclar estos análisis entre sí y que se complementen de manera que pueda llevarse a cabo los análisis más complejos y fiables que puedas imaginar, Ansys Multifísico [15].

#### **1.4. ESTUDIO DE CASOS DE SIMULACIÓN**

Se presenta una breve descripción de estudios de casos de simulación de desgaste en aceros sin y/o con capas de recubrimiento basados en el método de Archard para ser tomados en consideración durante el diseño y ejecución del proceso de simulación.

##### **1.4.1. EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO A DESGASTE EN ACEROS DE HERRAMIENTA**

R. Hernández, M.R. Cruz, D. Casellas, M.D. Riera, J.M. Prado, evaluaron que en el sector automovilístico se ha incrementado el uso de aceros de alta y muy alta resistencia para conformar piezas de carrocería. La utilización de estos nuevos aceros lleva asociada una problemática específica en la construcción de los útiles de conformado. El elevado límite elástico de estos aceros obliga a utilizar elevadas presiones de conformado, lo que provoca la aparición de roturas y desgaste prematuro en el utillaje. En este marco, se pretende obtener herramientas que permitan evaluar criterios de selección y diseño en los procesos relacionados con el desarrollo y aplicación de nuevos aceros de herramientas, con una óptima relación tenacidad-resistencia al desgaste. Si bien la mecánica de fractura permite establecer

criterios de selección y diseño, no existen teorías fiables y universalmente aceptadas para la predicción del deterioro superficial de materiales (entre ellos el desgaste). En este sentido, la simulación por ordenador mediante el método de los elementos finitos de los fenómenos de fricción y desgaste se plantea como una interesante y escasamente reportada vía de aproximación al problema [16].

El objetivo de este trabajo fue ofrecer una primera aproximación a la compleja problemática asociada con la obtención de herramientas predictivas del fenómeno de desgaste empleando simulación numérica. Los resultados obtenidos se contrastan con ensayos experimentales de desgaste de pin sobre disco en aceros de trabajo en frío DIN W-1.2379 [16].

#### **1.4.2. SIMULACIÓN DE DESGASTE DE PRÓTESIS DE CADERA DE ALÚMINA SOBRE ALÚMINA**

Vesa Saikko, Jaakko Keränen, realizaron el ensayo de desgaste de un implante de alúmina de última generación contra sí mismo se estudió con un espiga sobre disco de traslación circular (CTPOD), un simulador de desgaste para materiales protésicos de articulación de cadera. La dirección de deslizamiento cambiaba continuamente con respecto a la espiga, lo que evitaba el ranurado uniaxial erróneo típico de dispositivos espiga sobre disco ordinario. El mecanismo de desgaste dominante fue una leve abrasión manifestada como una superficie en relieve, que coincidía con hallazgos clínicos. El factor de desgaste osciló entre  $1 \times 10^{-8}$  a  $6 \times 10^{-8}$   $\text{mm}^3/(\text{N}\cdot\text{m})$ . Se demostró que el dispositivo CTPOD, validado anteriormente para polietileno de peso molecular ultra alto, es el primer dispositivo de prueba de desgaste simple que produce un desgaste similar al que se sabe que ocurre clínicamente en las prótesis totales de cadera de alúmina sobre alúmina [17].

### **1.4.3. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE MAPAS DE MECANISMOS DE DESGASTE**

A. Cantizano, A. Carnicero, G. Zavarise. Se están modelando con FEM mapas de mecanismos de desgaste para diferentes materiales, en realidad acero sobre acero. Un microtermomecánico este enfoque se ha utilizado para modelar con precisión los fenómenos macroscópicos de desgaste. Una ley plástica para el contacto micromecánico normal de asperezas se ha implementado en FEAP y una ligera modificación, basada en resultados experimentales, se propone. Para los tres mecanismos modelados, buena correlación entre los resultados numéricos de desgaste y los que se encuentran en la literatura se han obtenido para una configuración pin-on-disk. Las temperaturas de flash alcanzadas en También se ha estudiado la interfaz de contacto y se ha logrado una buena concordancia con la literatura [18].

### **1.5. MODELO MATEMÁTICO DE ELEMENTOS FINITOS PARA UN ACERO AISI 1020 DE ESPIGA SOBRE DISCO**

El modelo de desgaste de Archard es un modelo de desgaste por deslizamiento popular con resultados bastante buenos para simular el desgaste. El modelo original propuesto por Archard asumió que la tasa de pérdida de volumen debido al desgaste es linealmente proporcional a la presión de contacto y la velocidad de deslizamiento en la superficie de contacto. En el programa se implementó una versión generalizada de este modelo que permite la dependencia adecuada de la ley de la presión y la velocidad de contacto. El modelo Archard se define mediante el comando TB con TBOPT = ARCD y Lab=WEAR [19].

Se supone que el desgaste ocurre en la dirección normal hacia adentro de la superficie, tomada como la dirección opuesta a la dirección normal de contacto. La tasa de desgaste en un nodo de contacto, viene dada por [19]:

$$\dot{w} = \frac{K}{H} P^m V_{rel}^n$$

donde:

K es el coeficiente de desgaste

H es la dureza del material

P es la presión de contacto

$V_{rel}$  es la velocidad de deslizamiento relativa

m es el exponente de presión

n es el exponente de velocidad

En la ecuación anterior, K, H, m, y n son valores especificados por el usuario del comando TBDATA. Si se ingresa un valor de 1 para la quinta constante (C5) en el comando TBDATA, el cálculo se basa en las tensiones nodales del elemento sólido subyacente en lugar de la presión de contacto. La tensión evaluada en el punto de gauss del elemento sólido se copia primero en su nodo más cercano. El elemento de contacto superpuesto al elemento sólido al que pertenece el punto de Gauss utiliza esta tensión,  $\sigma$ , y la normal de contacto,  $n$ , para calcular la componente del vector de tracción en la dirección de la normal de contacto:  $t_{cn} = (\{\sigma\}\{n\}) \cdot \{n\}$ . Este componente normal del vector de tracción se usa en lugar de la presión de contacto en la ecuación de la tasa de desgaste [19].

Si C5 en el comando TBDATA se establece en 10 u 11, el incremento de desgaste se promedia sobre el área de contacto del par de contactos de modo que el volumen total perdido debido al desgaste sea el mismo que el volumen total perdido debido al desgaste cuando cada nodo se desgasta con una cantidad diferente (C5 = 0 o 1). El incremento de desgaste promedio se calcula como [19]:

$$w_{av} = \frac{\sum wA}{\sum A}$$

donde:

A representa el área de contacto en el punto y la suma es sobre todos los puntos en contacto en un par de contactos [19].

Si el modelo de desgaste de Archard no se ajusta a sus necesidades, puede definir su propio modelo de desgaste programando la subrutina USERWEAR. La mayoría de las propiedades y resultados de contacto relevantes se pasan en la subrutina USERWEAR. Puede definir el incremento

de desgaste y la dirección del incremento de desgaste. El modelo de desgaste definido por el usuario se define mediante el comando TB con TBOPT = USER y Lab = WEAR [19].

## 2. DISEÑO Y EJECUCIÓN DEL PROCESO DE SIMULACIÓN

En este capítulo se presenta el planteamiento del problema para realizar la simulación mediante Ansys Mechanical, la selección del módulo a utilizar en Ansys para el análisis, la exposición de las consideraciones hechas durante el planteamiento de la simulación con respecto al proceso real, el diseño de la misma que es realizado mediante elementos finitos considerando: el sistema de unidades utilizado, creación del modelo 3D, propiedades de los materiales importantes en la simulación, condiciones de frontera, tipo y tamaño de la malla de elementos finitos y las condiciones del proceso.

Habiendo definido todas las consideraciones, variables y propiedades ha llegado el tiempo de entrar en la parte práctica de la investigación. Con el objetivo de obtener la información que se necesita para realizar la simulación y validar los resultados obtenidos durante la misma, se utilizarán resultados de pruebas de desgaste realizadas por Gonzalo García [20], con discos de acero AISI 1020 con y sin tratamiento termoquímico de cementación, además se hará uso de información disponible y cuya certeza ha sido comprobada por medio de trabajo experimental, con esto se podrá hacer una comparación entre los resultados experimentales, lo realizado en ensayos de desgaste y lo que se es capaz de obtener por medio de la simulación.

Debido a esto, antes de discutir la implementación del modelo se hará la descripción del proceso experimental del ensayo de desgaste tipo espiga sobre disco para la obtención los resultados, para definir los parámetros finales y necesarios con el fin de implementar la simulación del desgaste. En el capítulo 3 de esta investigación se dedicará el espacio suficiente para la validación del modelo, así como otros agregados que enriquezcan los resultados y conclusiones de este trabajo.

## 2.1. ENSAYO DE DESGASTE TIPO ESPIGA SOBRE DISCO

Los ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco se realizan en un módulo para ensayos marca GUNT, modelo TM 260.3, el cual se ocupa como complemento al módulo básico para estudios tribológicos de la misma marca, modelo TM 260, los cuales se encuentran ubicados en el laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Escuela de Ingeniería Mecánica (ver, Fig. 2.1).



Fig. 2.1. Módulos para estudios tribológicos marca GUNT: a) Módulo básico modelo TM 260.3; y b) Módulo de control modelo TM 260.

Los resultados de desgaste se reportan separadamente como la pérdida de masa en gramos para la espiga y el disco. La cantidad de desgaste es determinada pesando en una balanza analítica (ver, Fig. 2.2) ambos especímenes antes y después del ensayo.



Fig. 2.2. Balanza analítica marca Ohaus.

Los resultados de desgaste normalmente se obtienen realizando ensayos a distancias de deslizamiento, cargas y velocidades preestablecidas.

En la Tabla 2.1 se presenta las diferentes variables del experimento para las condiciones de los discos cementados y no cementados, se realizaron 3 experimentos por cada una de las 12 condiciones de ensayos.

Tabla 2.1. Condiciones y variables bajo las que se realiza los ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco.

Condición de material	Variables		
	Velocidad, m/s	Distancia de deslizamiento, m	Carga, N
Acero AISI 1020 cementado	0.05	1000	5
			10
			15
		1500	5
			10
			15
Acero AISI 1020 no cementado	0.05	1000	5
			10
			15
		1500	5
			10
			15

La velocidad a la que se realizaran todos los experimentos corresponde a 0.05 m/s, la cual es una velocidad recomendada para realizar los ensayos tipo espiga sobre disco [21], el módulo con que se cuenta para hacer dichos ensayos permite ajustar con el potenciómetro un número de revoluciones de salida entre 0 y 200 rpm, por lo tanto es necesario convertir la velocidad lineal a velocidad angular para determinar el número de revoluciones con el que se realizarán los experimentos. Para convertir la velocidad lineal a velocidad angular se ocupa la Ec. 2.1.

$$\omega = v/r \quad (2.1)$$

donde:  $\omega$  es la velocidad angular en rad/s,  $v$  es la velocidad lineal en m/s y  $r$  es el radio de la trayectoria de deslizamiento en m.

El diámetro de la trayectoria de deslizamiento se obtiene realizando una medición en el disco de prueba que incluye el módulo de ensayos tipo espiga sobre disco, en dicho espécimen se realizaron dos mediciones, la del diámetro interno de la huella y la del diámetro externo, cuyos valores fueron 4.06 y 4.26

cm, respectivamente; así a partir de ambos valores se obtuvo el diámetro central de la huella de desgaste, el cual es el valor medio correspondiente a 4.16 cm. Por lo tanto, sustituyendo en Ec. 2.1 se obtiene un valor de 2.40 rad/s, convertido a revoluciones por minuto se tiene 22.96 rpm.

Debido a que en el módulo para ensayos tipo espiga sobre disco no se puede determinar la distancia de deslizamiento directamente, durante la ejecución de los experimentos se llevó un registro de tiempos, en lugar de distancias. Para obtener el tiempo equivalente a una determinada distancia se procede a dividir la distancia de deslizamiento entre la velocidad lineal, así como se indica en la Ec. 2.2.

$$t = s/v \quad (2.2)$$

donde:

$t$  es el tiempo en segundos,

$s$  la distancia de deslizamiento en metros, y

$v$  velocidad lineal de deslizamiento.

Así, debido a que la velocidad de deslizamiento es la misma para todos los experimentos (0.05 m/s) y se trabajó con dos distancias de deslizamiento diferentes, el tiempo requerido tanto para 1000 y 1500 m es de 20000 y 30000 s, respectivamente; posteriormente, transformándolos a horas corresponden a 5:33 y 8:20 horas, respectivamente.

Una vez establecidas las variables de tiempo y cargas se procede a realizar los ensayos. Después de encender la caja de mando y el motor, se colocan tanto el disco como la espiga en sus respectivos soportes y se baja el brazo de carga de manera que la espiga se apoye en el disco, luego se colocan en el portacarga la combinación de pesas correspondiente a la carga bajo la que se realizará el experimento según la Tabla 2.1, posteriormente se coloca éste al brazo de carga. Finalmente, se ajusta el número de revoluciones en la caja de mando y se lee el valor de la fuerza de fricción y se anota el valor.

## 2.2. DIMENSIONAMIENTO DE LOS DISCOS Y ESPIGAS PARA LOS ENSAYOS DE DESGASTE

El dimensionamiento de las probetas se realiza en base al manual del módulo para ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco marca GUNT, modelo TM 260.3. El equipo de ensayo se utiliza con el módulo básico de estudios tribológicos de la misma marca, modelo TM 260.

En la Fig. 2.3 se presentan las dimensiones del disco de acero AISI 1020 así como de la espiga de acero AISI O1. El disco posee un diámetro de 50 mm y un espesor de 10 mm, cuenta con un agujero de 4.36 mm que permite la sujeción del disco al vaso portador del mismo. La espiga tiene un diámetro de 4 mm y una longitud de 25 mm.

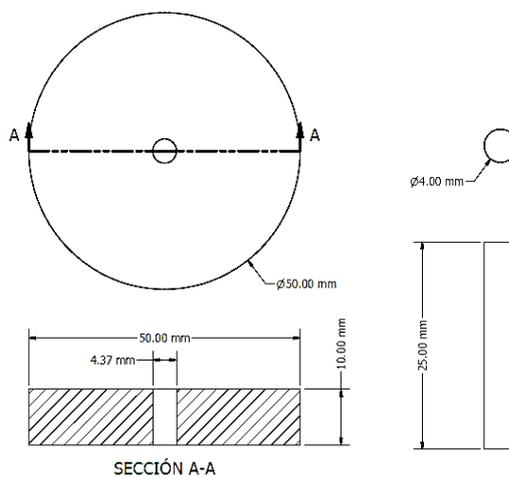


Fig. 2.3. Dimensiones de los especímenes utilizados en el ensayo tipo espiga sobre disco. Cotas en mm.

## 2.3. ELABORACIÓN DEL MODELO 3D

Para realizar la simulación del ensayo en Ansys se requiere la elaboración de un modelo 3D de la espiga y disco. El modelo puede ser elaborado en el mismo Ansys o en un programa externo para luego ser importado. En Ansys hay una función de boceto, que hace posible dibujar las partes. Debido a que las formas de las piezas son muy fáciles de dibujar, se utiliza esta función. El modelado se realiza en pulgadas, por lo que las demás unidades deben ser del mismo orden.

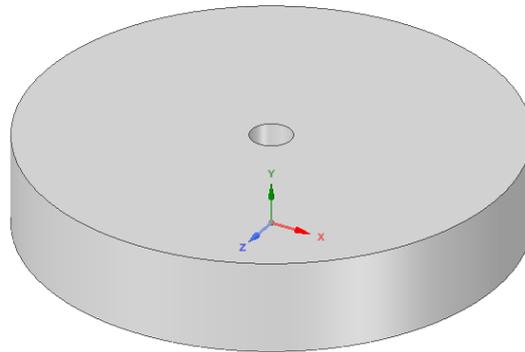


Fig. 2.4 Modelo en 3D del disco elaborado en Ansys 2019 (versión estudiantil).



Fig. 2.5 Modelo en 3D de la espiga elaborado en Ansys 2019 (versión estudiantil).

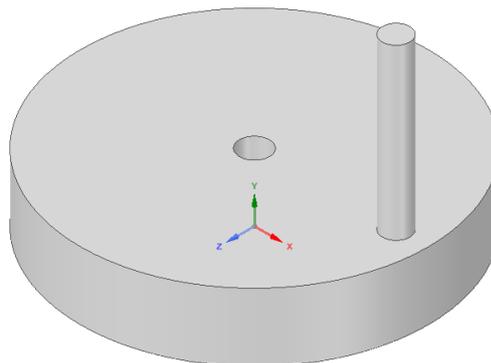


Fig. 2.6 Modelo en 3D del ensamble espiga sobre disco elaborado en Ansys 2019 (versión estudiantil)

Luego de que los modelos de la espiga y el disco han sido creados, se ha de ingresar las propiedades de los materiales que la componen, no se requiere una alta gama de propiedades para realizar la simulación sino únicamente un conjunto de propiedades útiles; para el caso dichas

propiedades tanto de la espiga como de los discos se presentan en las Tablas 2.2 - 2.4.

Tabla 2.2. Propiedades del disco de acero AISI 1020 no cementado.

Propiedad	Valor
Esfuerzo de fluencia	50800 psi
Resistencia a la tracción	60900 psi
Módulo de Young	27000 ksi
Densidad	0.284 lb/pulg <sup>3</sup>
Coefficiente de Poisson	0.29
Dureza	121 HB

Tabla 2.3. Propiedades del disco de acero AISI 1020 cementado.

Propiedad	Valor
Esfuerzo de fluencia	71800 psi
Resistencia a la tracción	129000 psi
Módulo de Young	27000 ksi
Densidad	0.284 lb/pulg <sup>3</sup>
Coefficiente de Poisson	0.29
Dureza	457 HB

Tabla 2.4. Propiedades de la espiga de acero O1 templada y revenida.

Propiedad	Valor
Esfuerzo de fluencia	218000 psi
Resistencia a la tracción	245000 psi
Módulo de Young	31000 ksi
Densidad	0.283 lb/pulg <sup>3</sup>
Coefficiente de Poisson	0.3
Dureza	485HB

Posteriormente se debe de asignar dichas propiedades, creando una sección del material y asignando el material correspondiente a ésta, antes de crear la malla y los elementos se debe de crear una instancia y especificar que la malla debe de crearse sobre la parte.

## 2.4. MALLADO DEL MODELO

Un parámetro de vital importancia para obtener resultados confiables durante la simulación es el mallado de elementos finitos del modelo, el mallado que se utiliza debe ser lo más uniforme y fino posible; es decir, la distancia entre cada uno de los nodos debe ser la menor posible; debido a que se está utilizando una versión estudiantil de Ansys, por lo cual solo se permite utilizar un máximo de 32000 nodos en cada uno de los modelos y por lo tanto, se ha adecuado el tamaño de cada uno de los elementos al modelo de tal manera que se utilice el máximo número de nodos permitidos y se obtengan buenos resultados de la simulación. Así, durante el modelo se han utilizado diferentes geometrías y tamaños de elementos de malla con tal de analizar con más detalle las zonas tanto de la espiga como de la zona de desgaste del disco. En las Figs. 2.7 y 2.8 se presentan los mallados que se han realizado para cada uno de los modelos que se simularán.

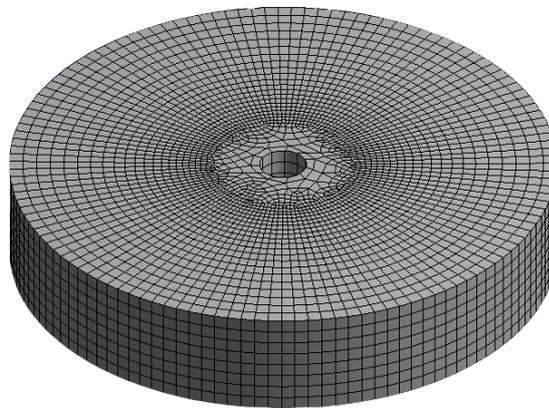


Fig. 2.7. Modelo en 3D del disco representando mallas, elaborado en Ansys 2019 (versión estudiantil).



Fig. 2.8. Modelo en 3D de la espiga representando mallas, elaborado en Ansys 2019 (versión estudiantil).

Además, dado que el tipo de mallado es importante durante la realización del análisis, se ha utilizado una malla adaptativa controlada por el programa, ya que por la remoción de material durante el desgaste, la geometría de los modelos varía con respecto al tiempo de simulación.

## **2.5. CONDICIONES DE FRONTERA**

En este trabajo, las condiciones de frontera se clasifican en dos tipos:(1) los apoyos o restricciones, y (2) las cargas aplicadas.

Un aspecto en la simulación es que existe la aplicación de una carga y una rotación que imponen un desgaste y por ende un deslizamiento entre el disco y la espiga. Es por ello que en lo que respecta a la condición de frontera de carga, se modela en cada caso un desplazamiento impuesto y una fuerza aplicada. Tales valores son correspondientes al desgaste en la curva desgaste-desplazamiento obtenida de los ensayos experimentales.

### **2.5.1. CONDICIONES DE FRONTERA DE APOYO**

La primera aproximación que se suele tomar en estos casos consiste en restringir completamente los desplazamientos de los nodos de la base del disco, como si esta estuviese fijada o empotrada al soporte de la máquina,

restringiendo los desplazamientos en dirección axial (ver, Fig. 2.9). También se restringe que el movimiento de la espiga es únicamente en dirección axial (ver, Fig. 2.10).

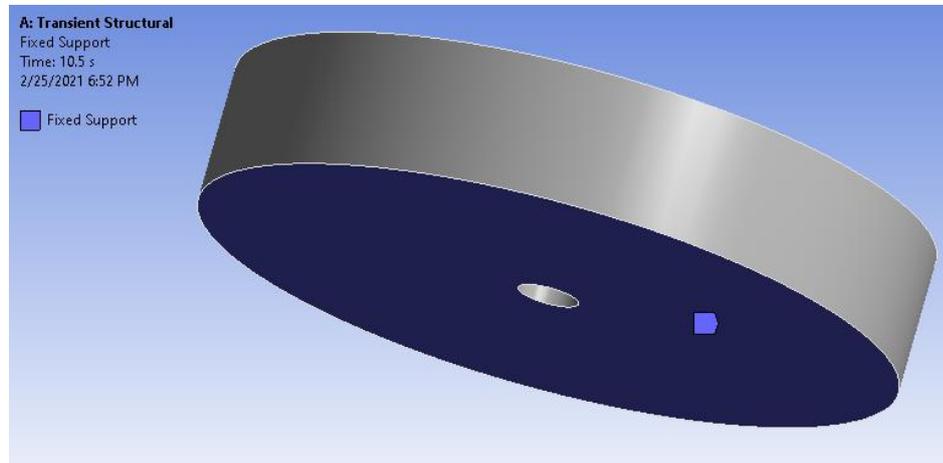


Fig. 2.9. Modelo en 3D del disco representando el soporte fijo, elaborado en Ansys 2019 (versión estudiantil).

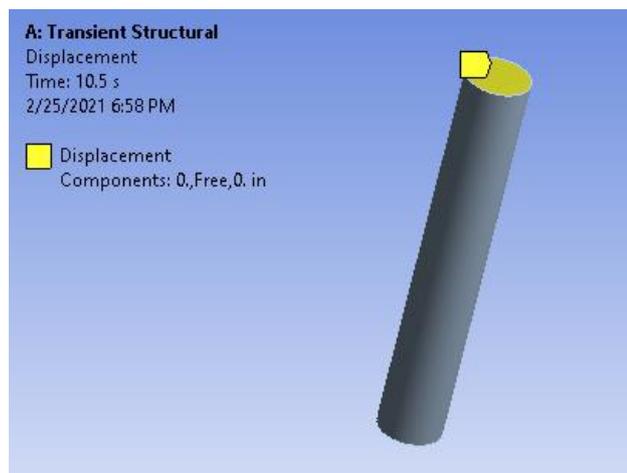


Fig. 2.10 Modelo en 3D de la espiga representando desplazamiento, elaborado en Ansys 2019 (versión estudiantil).

## 2.5.2. CONDICIONES DE CONTORNO DE CARGA

Las cargas pueden aplicarse mediante una fuerza o mediante la imposición de un desplazamiento. En el ensayo de desgaste ocurre bajo presión de contacto y el deslizamiento entre la espiga y el disco, por lo cual se define una fuerza sobre la espiga (ver, Fig. 2.11) y una velocidad angular

al disco con respecto a su centro en torno al eje Y, tal como se presenta en la Fig. 2.12.

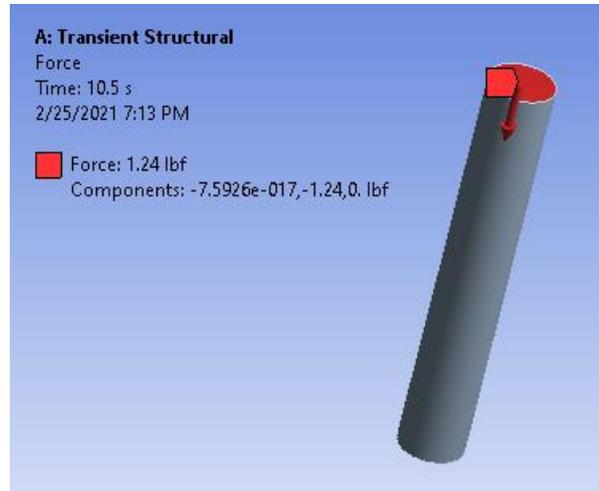


Fig. 2.11. Modelo en 3D de la espiga representando carga aplicada, elaborado en Ansys 2019 (versión estudiantil).

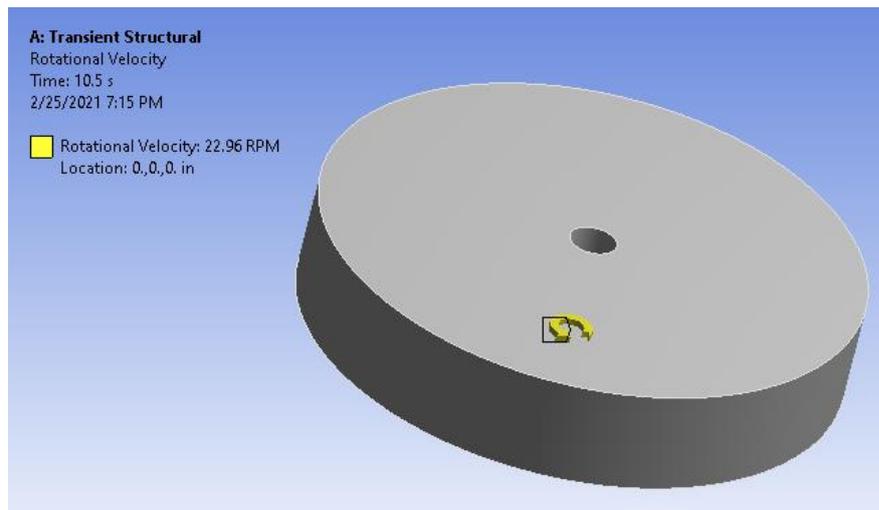


Fig. 2.12. Modelo en 3D del disco representando velocidad rotacional, elaborado en Ansys 2019 (versión estudiantil).

## 2.6. CONDICIONES DEL PROCESO

Luego de haber elaborado el mallado y definir las condiciones de frontera mecánicas del modelo, se deben configurar las condiciones del proceso de desgaste para iniciar la solución, para ello se utilizó la subrutina de desgaste basada en el modelo de Archard, en el cual se introducen las

condiciones de frontera del proceso, así como parámetros importantes como la dureza del material, el coeficiente de desgaste y el tiempo de ejecución de la subrutina, que para este caso según se registró durante el experimento para una distancia de deslizamiento de 1000 y 1500 metros fue de 20000 y 30000 s, respectivamente. Al terminar el ingreso de los parámetros de la subrutina, se ejecuta la simulación correspondiente al tipo de ensayo requerido el cual será analizado por el software.

Anexo a este documento se presentan una guía de laboratorio; en el Anexo A, Guía de laboratorio: Simulación del desgaste tipo espiga sobre disco utilizando Ansys Mechanical 19.2 Student Edition.

### 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se presenta el tratamiento de los resultados obtenidos de la simulación, así como los resultados obtenidos experimentalmente por Gonzalo [20]; se presenta un análisis de los resultados comparando los reportados por la simulación con las mediciones experimentales y la información teórica recopilada junto al estudio de casos.

La presentación de los resultados se realiza mediante tablas y figuras para los ensayos tipo espiga sobre disco, correspondientes a las diferentes condiciones de los discos a ensayar y a las diferentes combinaciones de parámetros de los ensayos, realizando un análisis estadístico de los datos y comparándolos entre sí.

#### 3.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE DESGASTE

A continuación, se presenta los resultados obtenidos después de realizar la simulación de los ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco, dichos resultados comprenden las cantidades de desgaste tanto de los discos de acero AISI 1020 sin y con cementación, como también de las espigas de acero AISI O1 con tratamiento térmico de temple y revenido.

En la Tabla 3.1 y 3.2 se presentan los valores de desgaste de los discos, obtenidos de forma experimental sin y con cementación, respectivamente.

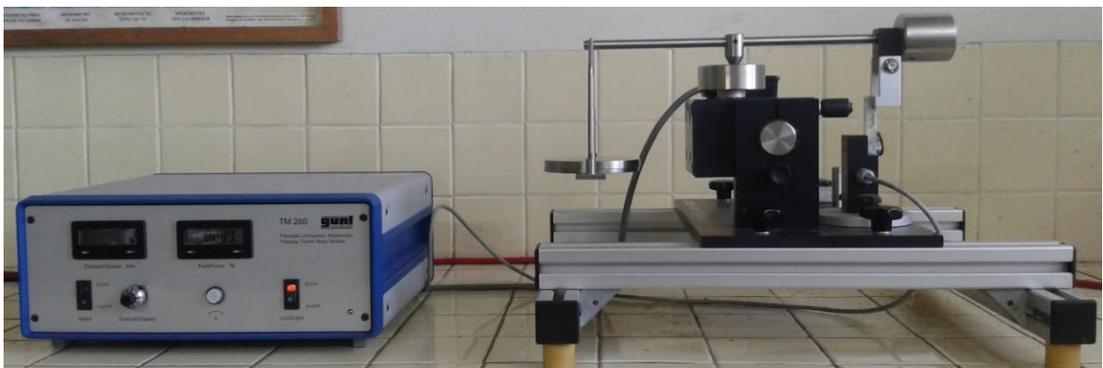


Fig. 3.1. Módulo para ensayos de desgaste tipo espiga sobre disco marca GUNT, TM260.3 [20].

Tabla 3.1. Valores de desgaste de los discos de acero SAE 1020 sin cementación utilizando espiga de acero SAE 4340, obtenidos experimentalmente.

Desgaste de disco			
Distancia de deslizamiento, m	5 N	10 N	15 N
1000	0.00103	0.00429	0.00735
1500	0.00155	0.00644	0.01103

Tabla 3.2. Valores de desgaste de los discos de acero SAE 1020 cementados utilizando espiga de acero SAE 4340, obtenidos experimentalmente.

Desgaste de disco			
Distancia de deslizamiento, m	5 N, C	10 N, C	15 N, C
1000	0.000723	0.003050	0.00526
1500	0.001085	0.004575	0.00789

En la Fig. 3.2 se presenta gráficamente los resultados experimentales de desgaste de los discos en función de la distancia de deslizamiento, para las condiciones de sin y con tratamiento termoquímico de cementación corresponden a las líneas discontinuas y continuas, respectivamente.

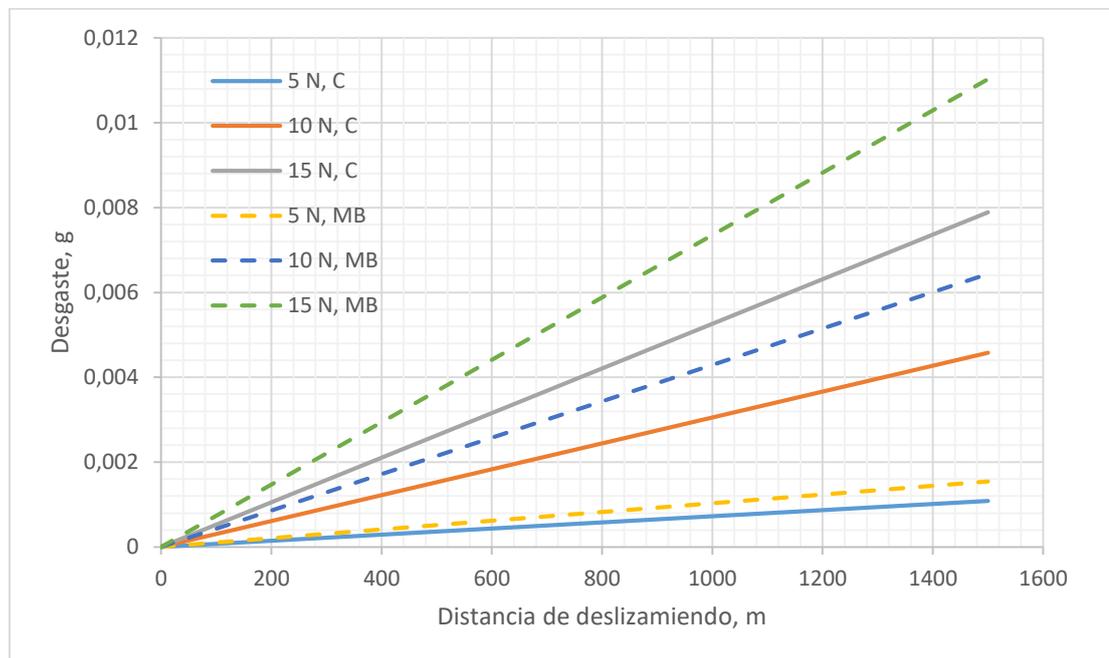


Fig. 3.2. Gráfica de curvas de desgaste experimental de discos respecto a la distancia de deslizamiento.

Además en las Tablas 3.3 y 3.4 se presentan los valores de desgaste de los discos obtenidos por medio de simulación sin y con cementación, respectivamente.

Tabla 3.3. Valores de desgaste de los discos de acero SAE 1020 sin cementación utilizando espiga de acero SAE 4340, obtenidos mediante simulación por ANSYS.

Desgaste de discos ANSYS			
Distancia de deslizamiento, m.	5 N	10 N	15 N
1000	0.0000935	0.000778	0.002
1500	0.0001403	0.001167	0.003

Tabla 3.4. Valores de desgaste de los discos de acero SAE 1020 cementados utilizando espiga de acero SAE 4340, obtenidos mediante simulación por ANSYS.

Desgaste de discos ANSYS			
Distancia de deslizamiento, m.	5 N	10 N	15 N
1000	0.0000093	0.0005	0.0013
1500	0.0000139	0.00075	0.00195

En la Fig. 3.3 se presenta gráficamente los resultados obtenidos mediante simulación por ANSYS de desgaste de los discos en función de la distancia de deslizamiento, para las condiciones de sin y con tratamiento termoquímico de cementación corresponden a las líneas discontinuas y continuas, respectivamente.

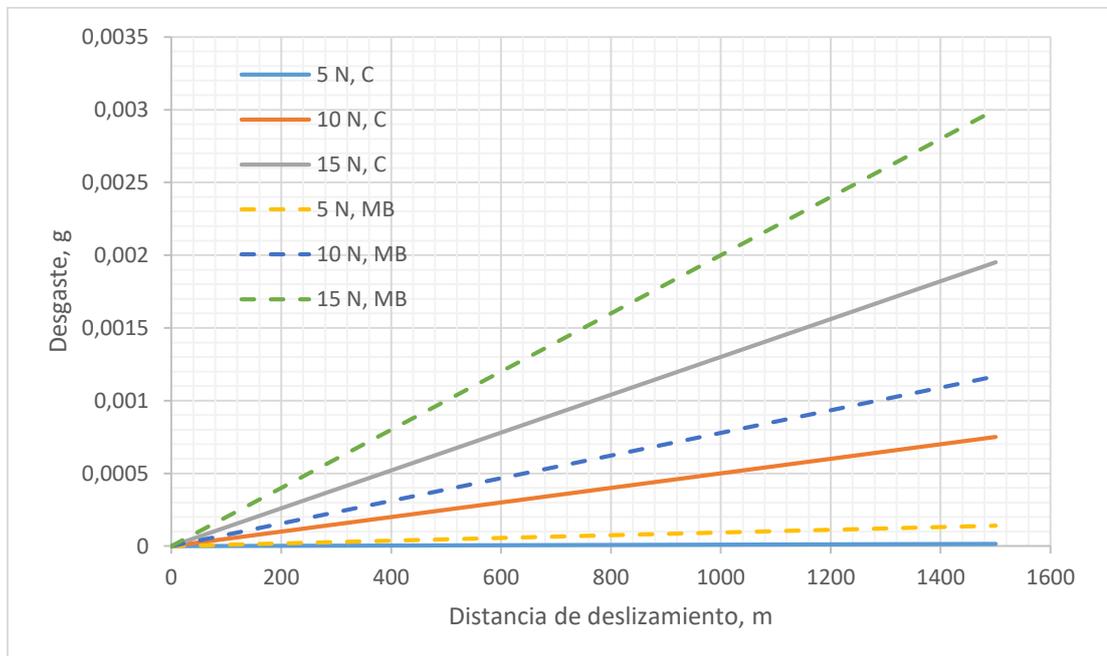


Fig. 3.3. Gráfica de Curvas de desgaste ANSYS de discos respecto a la distancia de deslizamiento.

En el mismo sentido, en la Tabla 3.5 y 3.6 se presentan los datos de desgaste correspondientes a la espiga de acero AISI O1 sobre aceros SAE 1020 sin y con cementación obtenidas experimentalmente, respectivamente.

Tabla 3.5. Valores de desgaste de las espigas de acero SAE 4340 utilizando disco de acero SAE 1020 sin cementación, obtenidos experimentalmente.

Desgaste para Espigas			
Distancia de deslizamiento, m.	5 N	10 N	15 N
1000	0.0009	0.00008	0.0007
1500	0.00135	0.00012	0.00105

Tabla 3.6. Valores de desgaste de las espigas de acero SAE 4340 utilizando disco de acero SAE 1020 con cementación, obtenidos experimentalmente.

Desgaste para Espigas			
Distancia de deslizamiento, m.	5 N	10 N	15 N
1000	0.0004	0.0009	0.001
1500	0.0006	0.00135	0.0015

En la Fig. 3.4 se presenta gráficamente los resultados experimentales de desgaste de las espigas de acero SAE 4140 en función de la distancia de deslizamiento, para las condiciones de los discos sin y con tratamiento termoquímico de cementación corresponden a las líneas discontinuas y continuas, respectivamente.

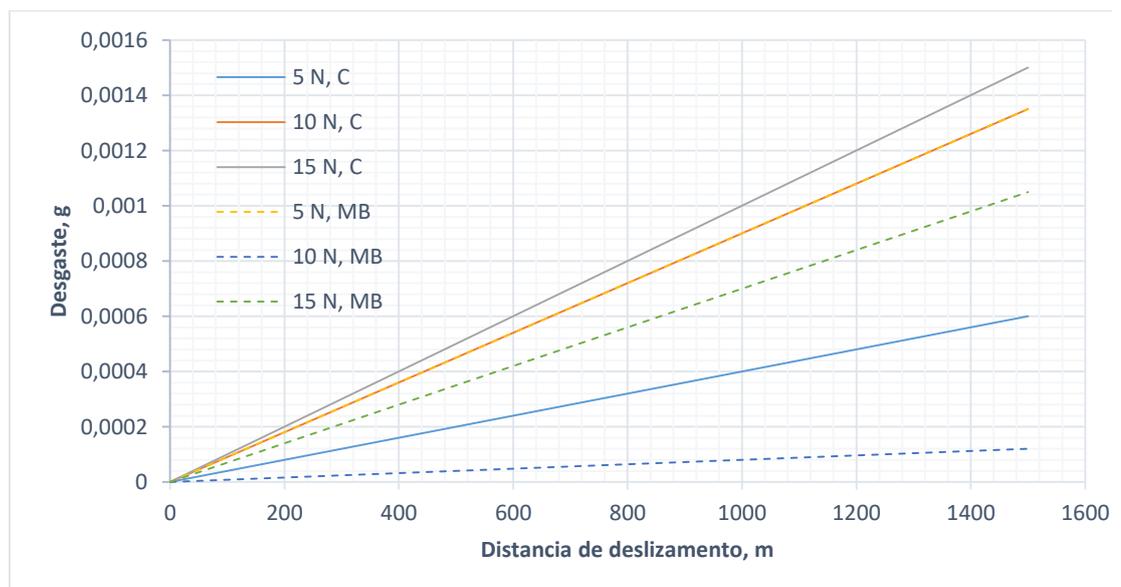


Fig. 3.4. Gráfica de Curvas de desgaste experimental de espigas respecto a la distancia de deslizamiento.

En la Tabla 3.7 y 3.8 se presentan los datos de desgaste correspondientes a la espiga de acero AISI O1 sobre aceros SAE 1020 sin y con cementación obtenidas por medio de simulación, respectivamente. Además, en estas tablas se especifican los parámetros de carga y distancia recorrida de cada ensayo.

Tabla 3.7. Valores de desgaste de las espigas de acero SAE 4340 utilizando disco de acero SAE 1020 sin cementación, obtenidos mediante simulación por ANSYS.

Desgaste para Espigas ANSYS			
Distancia de deslizamiento, m.	5 N	10 N	15 N
1000	0.00002	0.000004	0.00004
1500	0.00003	0.000006	0.00006

Tabla 3.8. Valores de desgaste de las espigas de acero SAE 4340 utilizando disco de acero SAE 1020 con cementación, obtenidos mediante simulación por ANSYS.

Desgaste para Espigas ANSYS			
Distancia de deslizamiento, m.	5 N	10 N	15 N
1000	0.000009	0.00004	0.00007
1500	0.0000135	0.00006	0.000105

En la Fig. 3.5 se presenta gráficamente los resultados obtenidos mediante simulación por ANSYS de desgaste de las espigas de acero SAE 4140 en función de la distancia de deslizamiento, para las condiciones de los discos sin y con tratamiento termoquímico de cementación corresponden a las líneas discontinuas y continuas, respectivamente.

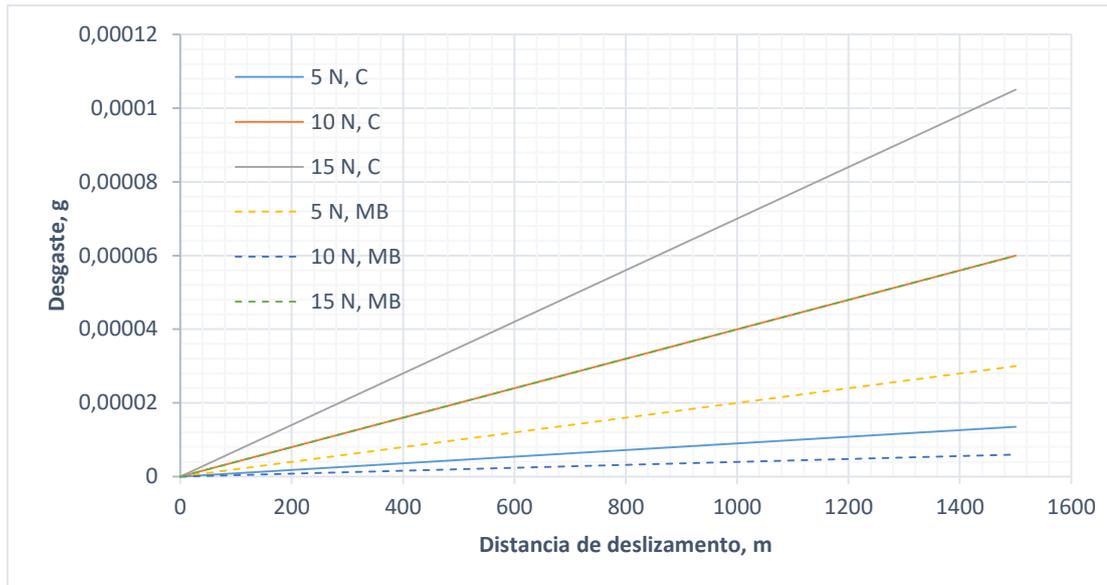


Fig. 3.5. Gráfica de Curvas de desgaste ANSYS de espigas respecto a la distancia de deslizamiento.

### 3.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Al obtener los resultados del proceso de simulación en el programa ANSYS se puede hacer la comparación con los resultados que se obtuvieron experimentalmente.

Se puede determinar que tanto experimentalmente como por medio del proceso de simulación el desgaste es mayor al incrementar la carga al igual que la distancia de deslizamiento. Los resultados tienen una similitud al tomar en cuenta que en el proceso experimental las condiciones ambientales varían y en el proceso de simulación se ingresan los parámetros a tomar en cuenta pero las condiciones ambientales no se modifican.

Es de fundamental importancia observar que el tratamiento termoquímico de cementación aumenta las propiedades superficiales del material lo cual ayuda a disminuir el desgaste en los discos que fueron sometidos a este tratamiento.

Se observa que en las espigas sucede lo mismo que en los discos al aumentar la carga las espigas sufren mayor desgaste manteniendo la linealidad, además se puede observar que las espigas tienen mayor tasa de

desgaste al ensayarse con los discos que fueron sometidos al tratamiento termoquímico de cementación que esto aumentaron la dureza.

Se puede observar en las siguientes gráficas en las que se presentan las gráficas superpuestas en las que se observa con mayor claridad los resultados obtenidos y lograr así mejor comprensión en la comparación de los datos obtenidos mediante simulación en el programa ANSYS (A) como los datos obtenidos experimentalmente (E). Así se presentan las gráficas en las cuales las líneas continuas representan los datos obtenidos experimentalmente y las líneas discontinuas representan los datos obtenidos en el programa ANSYS.

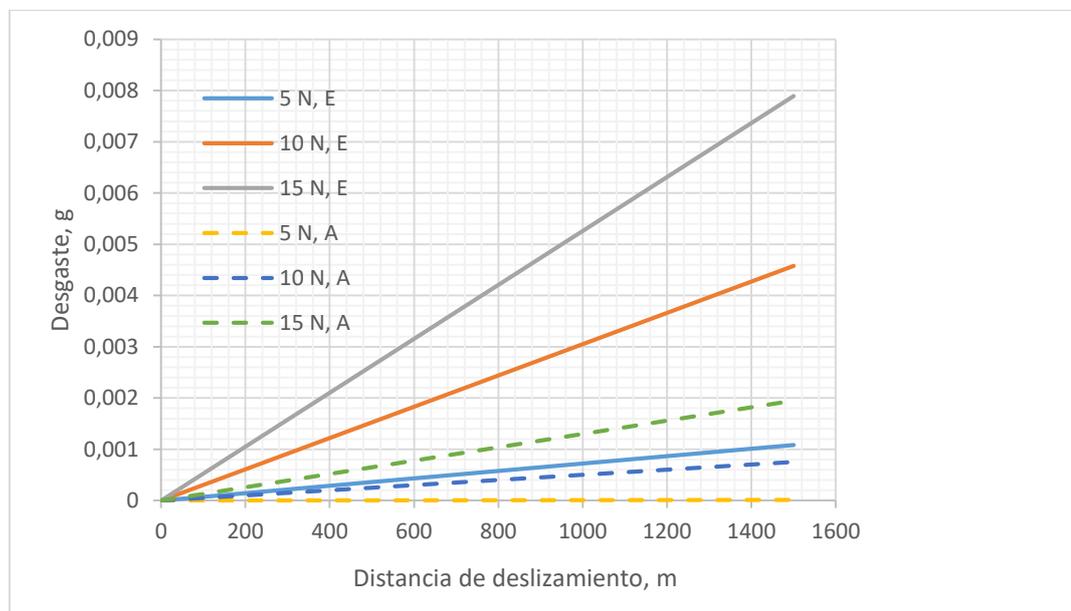


Fig. 3.6. Gráfica de Curvas de desgaste de discos cementados.

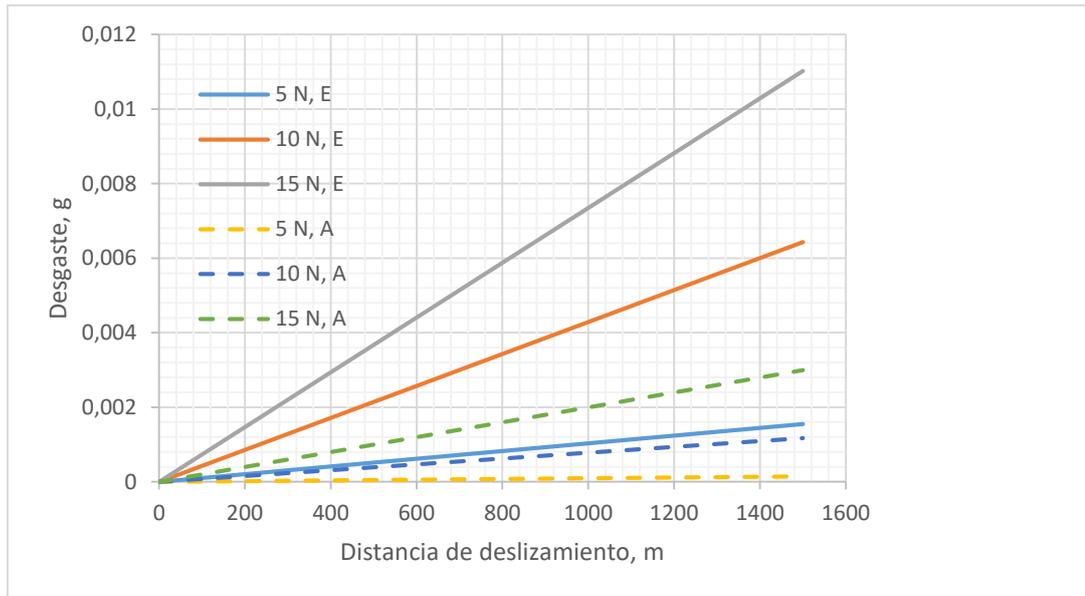


Fig. 3.7. Gráfica de Curvas de desgaste de discos no cementados.

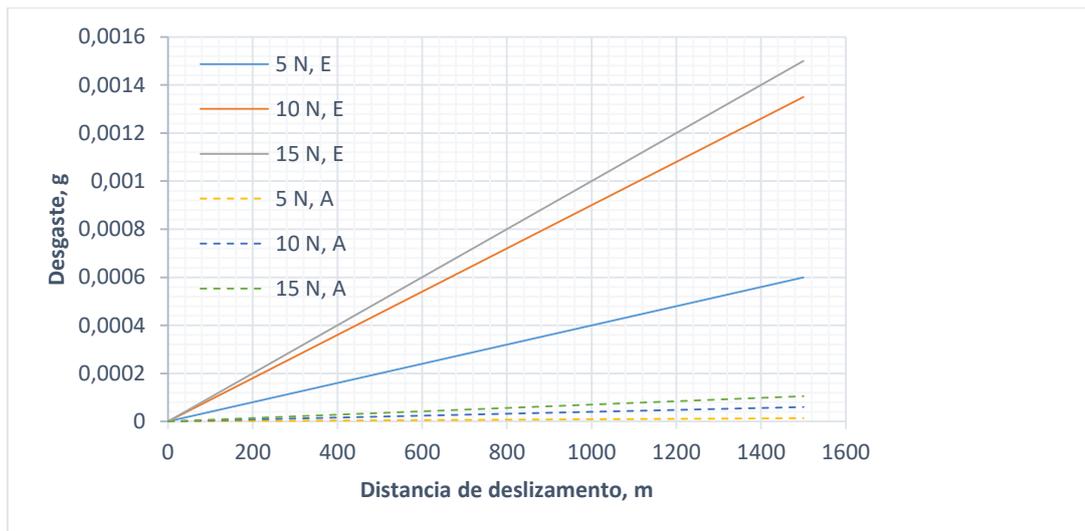


Fig. 3.8. Gráfica de Curvas de desgaste de espigas con discos cementados

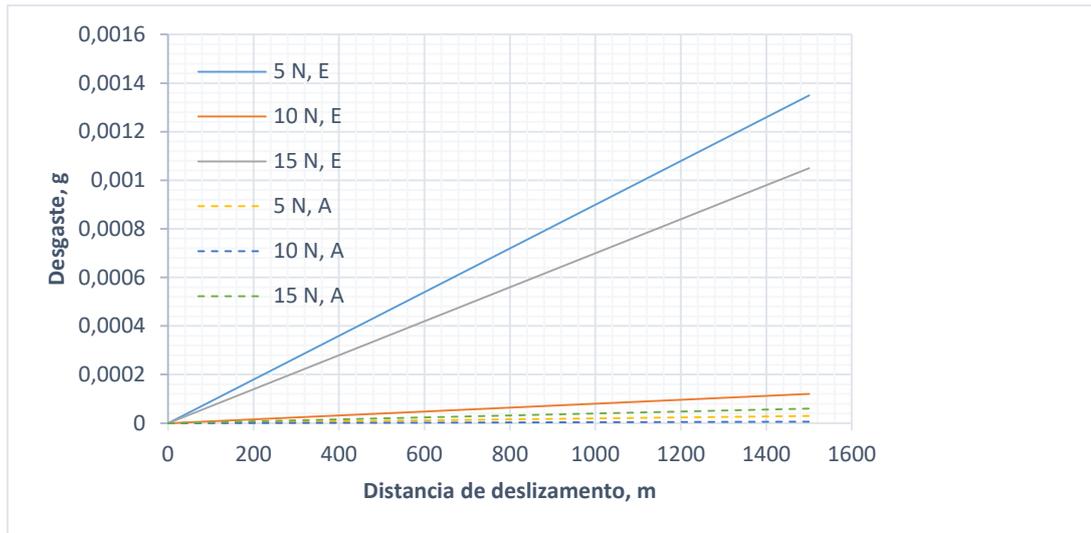


Fig. 3.9. Gráfica de Curvas de desgaste de espigas con discos no cementados.

## CONCLUSIONES

Al realizar la recopilación bibliográfica y obtener los resultados de la simulación por medio de elementos finitos para lograr comparar con los datos experimentales se puede concluir que:

- La información recabada es de mucha importancia y necesaria para lograr tener mayor claridad sobre el proceso de cementación y desgaste, con la diferencia de tener complejidad en encontrar información ya que no se encuentra información virtual.
- La simulación realizada mediante ANSYS se determina que tuvo excelentes resultados, mostrando un grado aceptable de aproximación con los datos obtenidos experimentalmente, ya que en las gráficas se puede observar pequeñas diferencias entre los valores obtenidos mediante el proceso de simulación y el proceso que se realizó bajo un proceso experimental.
- La utilización de una versión estudiantil de ANSYS, mostró limitantes en cierta manera ya que los resultados de simulación presentaron restricciones impuestas por el fabricante, aunque el mallado y proceso utilizado en la programación dieron resultados confiables al ser comparados con los del proceso experimental.
- Se requiere recopilar información experimental de diferentes aceros y con diferentes procesos de tratamientos térmicos, así como diferentes tratamientos termoquímicos de cementación, desgaste y dureza, para poder evaluar mediante software y comparar con datos experimentales la certeza de la simulación y poder elevar el grado de complejidad para posteriores trabajos ya que estos resultados ayudan a elegir correctamente el material para el diseño y construcción de futuras máquinas herramientas.
- Es de suma importancia incorporar el área de modelaje en todos los campos de Ingeniería Mecánica.

## **RECOMENDACIONES**

Los métodos y procesos de resolución de ecuaciones que se realizan en las discretizaciones de la geometría a simular, a través del software Ansys, involucra muchos recursos computacionales como son memoria RAM (Random Access Memory), procesamiento de la información (Procesador), unidad de procesamiento gráfico GPU (Graphics Processing Unit), y estos deben ser lo suficientemente capaces para soportar este tipo de análisis, por lo que se recomienda la utilización de un computador con las siguientes características: Una memoria RAM de unos 16 Gb, un procesador Core i7 de 8 núcleos, una unidad de procesamiento gráfico de una tarjeta NVIDIA geforce gtx 1060, además se obtiene mejor rendimiento si se trabaja con un disco sólido.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Apraiz Barreiro, J. (1949). *Tratamiento Térmico de los Aceros*. Madrid.
- [2] Apraiz Barreiro, J. (1975). *Aceros Especiales y otras Aleaciones*. (5ª ed.). Madrid. Dossat.
- [3] Avner, S. H. (1988). *Introducción a la Metalurgia Física*.
- [4] Sarkar, A. D. (1990). *Desgaste de Metales*. México D.F.; México: Limusa.
- [5] Halliday, J. S. (1955). *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*.
- [6] Archard, J. F. (1957). *Proceedings of the Royal Society A*.
- [7] Halling, J. (1975). *Principles of Tribology*. The Macmillan Press.
- [8] Greenwood, J. A. & Williamson, J. B. (1966). *Proceedings of the Royal Society A*.
- [9] Bowden, F. P. & Tabor, D. (1939). *Proceedings of the Royal Society A*.
- [10] Tomlinson, G. A. (1929). *Phil Mag* 7.
- [11] Holm, R. (1946). *Electrical Contacts*. Stockholm.
- [12] Carliet, P. (1978). *The Finite Element Method for Elliptic Problems*. Holanda, Amsterdam.
- [13] Calister, William. (1995). *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. (3ª ed.). España. Barcelona. Reverte S.A.
- [14] Garofalo Lanzuisi, F.E. (2016). *Introducción a Ansys Workbench*. World Wide Web: <https://www.udemy.com/course/introduccion-a-ansys-workbench/>
- [15] BrainOn Engineers. (2020). World Wide Web: <https://brainonengineers.com/blog/ansys/introduccion-a-ansys-workbench/>
- [16] R. Hernández, M.R. Cruz, D. Casellas, M.D. Riera, J.M. Prado. (2007). *Evaluación del comportamiento a desgaste en aceros de herramienta: Simulación por ordenador y verificación experimental*, *Anales de mecánica de la fractura*. (Vol. 2). Barcelona. España.
- [17] Saikko V, Keränen J. (2004). *Simulación de desgaste de prótesis de cadera de alúmina sobre alúmina mediante un dispositivo de movimiento multidireccional con clavija sobre disco*. Finlandia. RO Scattergood.
- [18] A. Cantizano, A. Carnicero, G. Zavarise. (2002). *Simulación numérica de mapas de mecanismos de desgaste*. *Computational Materials Science*. (Vol.25).
- [19] Archard, J. F. (1953). *Contact and rubbing of flat surface*. *Journal of Applied Physics*. (Vol. 24).
- [20] Garcia Ramirez, G. R. (2017). *Estudio de desgaste tipo espiga sobre disco, utilizando un AISI 1020 cementado y un Acero O1*.
- [21] Staia, M. H., Puchi-Cabrera, E. S., Carrasquero, E., Santana Mendez, Y. Y., La Barbera Sosa, J. G. & Chicot, D. &. (2013). *Sliding wear of a-C:H coatings against alumina in corrosive media*. Elsevier .

## ANEXO A

	<p>UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA  DEPTO. DE MATERIALES Y PROCESOS DE  FABRICACIÓN  ASIGNATURA</p>
---	---

## **GUÍA DE LABORATORIO: SIMULACIÓN DE DESGASTE TIPO ESPIGA SOBRE DISCO UTILIZANDO ANSYS**

### **INTRODUCCIÓN**

El software ANSYS Mechanical está dedicado a la simulación, para la cual aplica el método de elementos finitos en la realización de los cálculos estructurales estáticos y dinámicos lineales y no lineales. Además, ANSYS en sus funciones posee una subrutina mediante la cual permite realizar el análisis y simulación de desgaste de un par de superficies en contacto, el cual permite calcular y simular de manera aproximada el comportamiento de cualquier geometría que el usuario ingrese en cuanto a esfuerzos, deflexiones y pérdida de volumen las superficies de contacto. A continuación, se presentan los pasos necesarios para realizar un proceso de la simulación de desgaste tipo espiga sobre disco. Nota: El tiempo estimado para desarrollar la práctica de laboratorio es de aproximadamente 6 horas.

### **I. ELABORACIÓN DE UN NUEVO PROYECTO**

En este apartado se presentan los pasos para poder dar inicio a un nuevo proyecto de simulación en ANSYS. Estos son:

- 1) Al abrir el software Ansys Workbench, se desplegará una ventana, tal como la que se presenta en la Fig. A1.

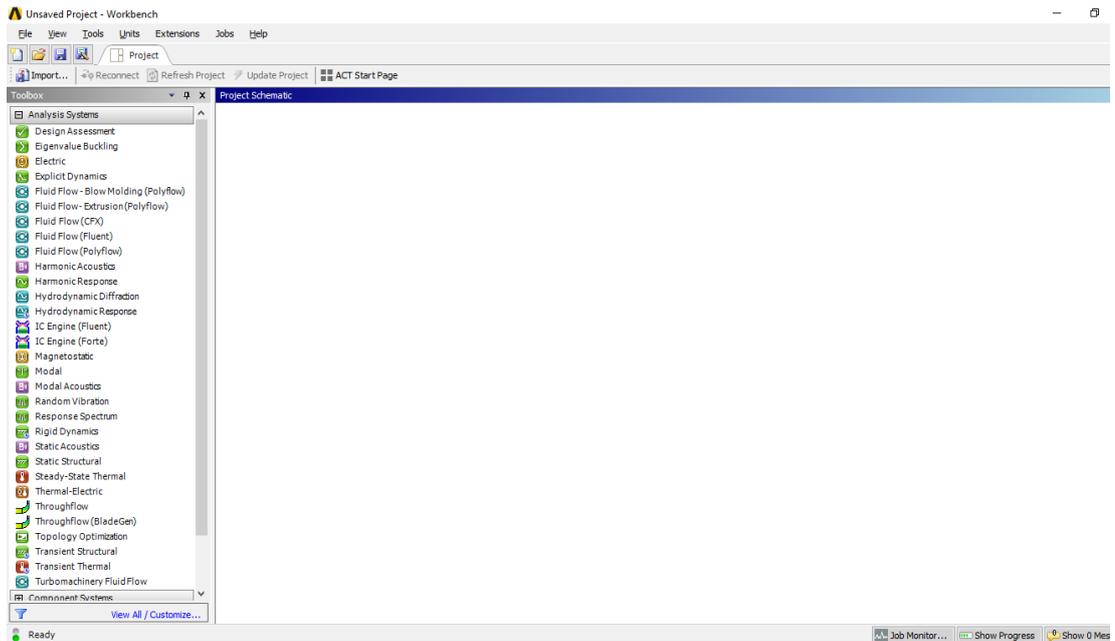


Fig. A1. Pantalla principal de Ansys Workbench.

2) En la ventana de Ansys Workbench, dar doble clic en Transient Structural ubicado en la columna Toolbox, según se presenta en la Fig. A2, esto creará un nuevo proyecto.

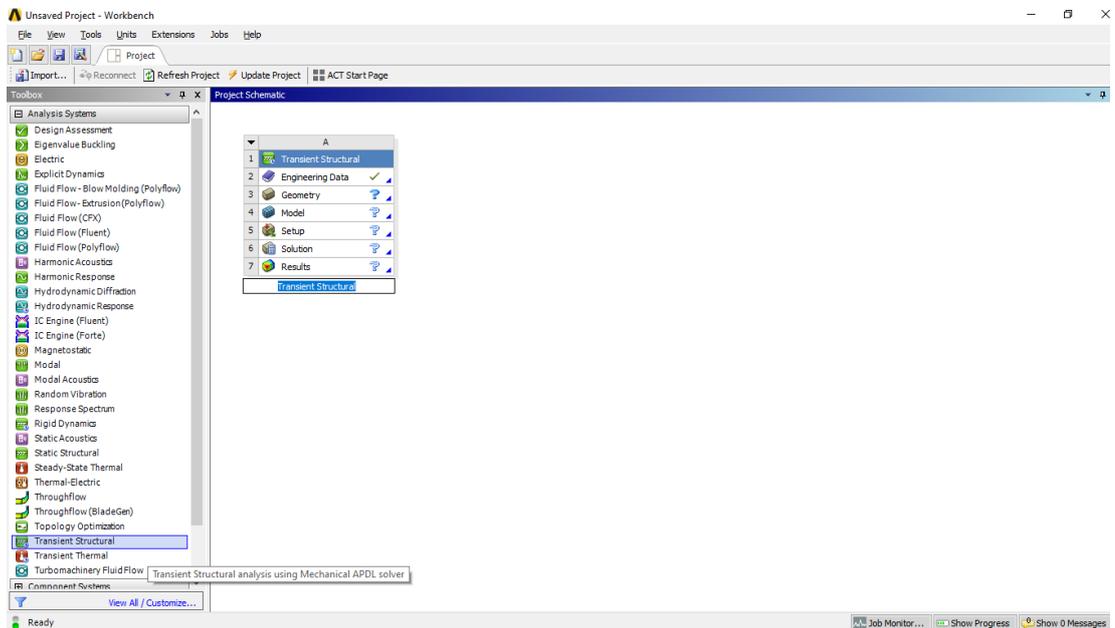


Fig. A2. Ventana del esquema del proyecto en ANSYS.

## II. IMPORTAR UN MODELO GEOMÉTRICO

A continuación, se presentan los pasos para realizar la importación de un modelo geométrico a partir de un archivo existente elaborado en un software CAD:

- 1) Realizar la importación del modelo geométrico para llevar a cabo el análisis; en el módulo del proyecto (Fig. A3a) que aparece en la pantalla principal del esquema del proyecto de ANSYS, dar clic derecho en Geometría (Geometry) y luego en el menú contextual que aparece, dar clic en Importar geometría (Import Geometry) según se presenta en la Fig. A3b, se desplegará la ventana Búsqueda (Browse).
- 2) En la ventana Búsqueda (Browse) seleccionar el directorio donde se encuentre localizado el archivo a importar según se presenta en la Fig. A4.

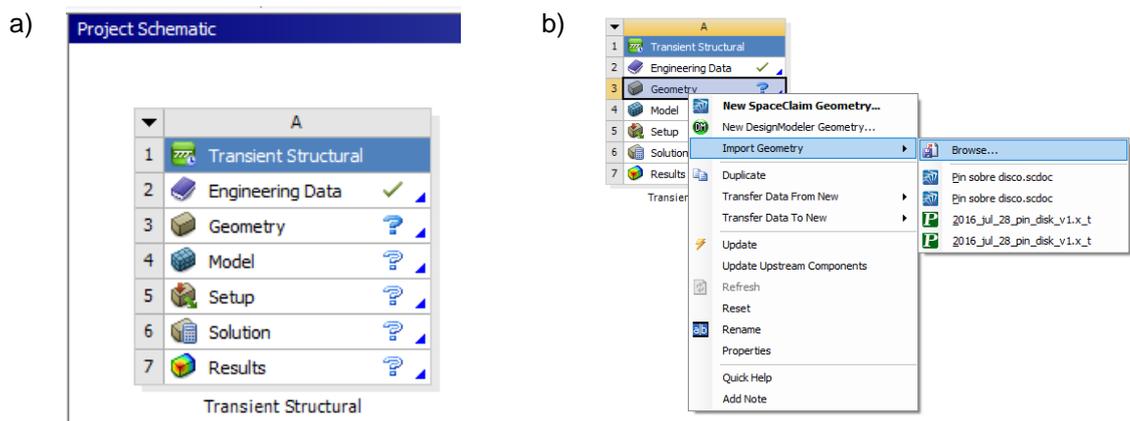


Fig. A3. Importación de un modelo geométrico para utilizarlo en una simulación: (a) Presentación del esquema del proyecto, y (b) Inicio de la importación de un modelo geométrico a Ansys.

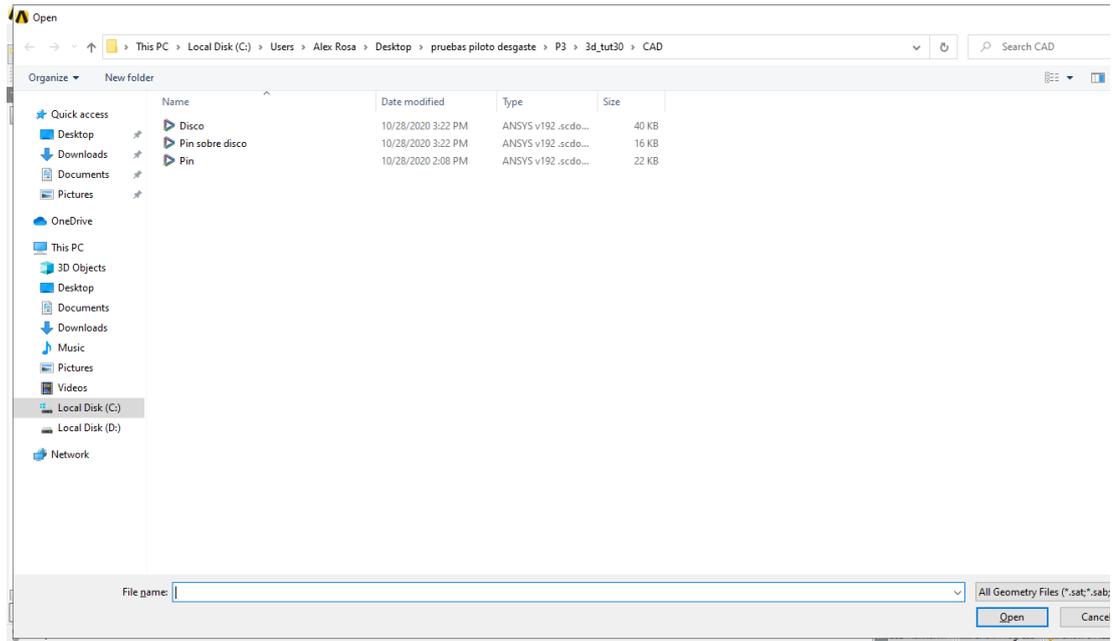


Fig. A4. Ventana para importar modelos geométricos a Ansys.

### III. DEFINICIÓN Y ASIGNACIÓN DEL MATERIAL AL MODELO

En esta sección se presenta la manera cómo se define y se asigna un material a un modelo geométrico o región del elemento específico, estos pasos son:

- 1) Definir los materiales que conforman el modelo de la espiga y el disco. Para ello en el esquema del proyecto dar clic derecho en Datos de ingeniería (Engineering Data) y en el menú contextual que se despliega dar clic en Editar (Edit) según se presenta en la Fig. A7.

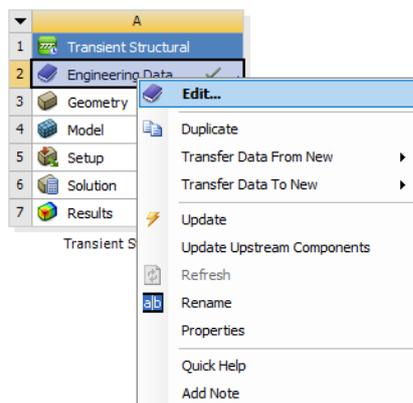


Fig. A7. Definir un material en Ansys.

- 2) Luego se desplegará la ventana de edición de material de Ansys, tal como se presenta en la Fig. A8. En el apartado Material (Material) de esta ventana se deberá escribir el nombre del material que se definirá, para este caso se creará el material base que se utilizará en los discos.
- 3) En la misma ventana de edición de material se introducirán los valores de algunas propiedades del material, las cuales son necesarias para que Ansys realice el análisis. Se introducirá el valor de densidad del material, para ello dar clic derecho en Densidad (Density) ubicado en el submenú de Propiedades Físicas (Physical Properties) desde el menú toolbox, y en el menú contextual que se despliega dar clic en Incluir Propiedad (Include Propertie) según la Fig. A9a, al realizar esto en la parte inferior de dicha ventana aparecerá un campo donde se debe introducir la densidad según se presenta en la Fig. A9b. Si se está utilizando unidades del sistema inglés, la densidad se debe introducir en unidades  $\text{lb}_m/\text{pulg}^3$ .

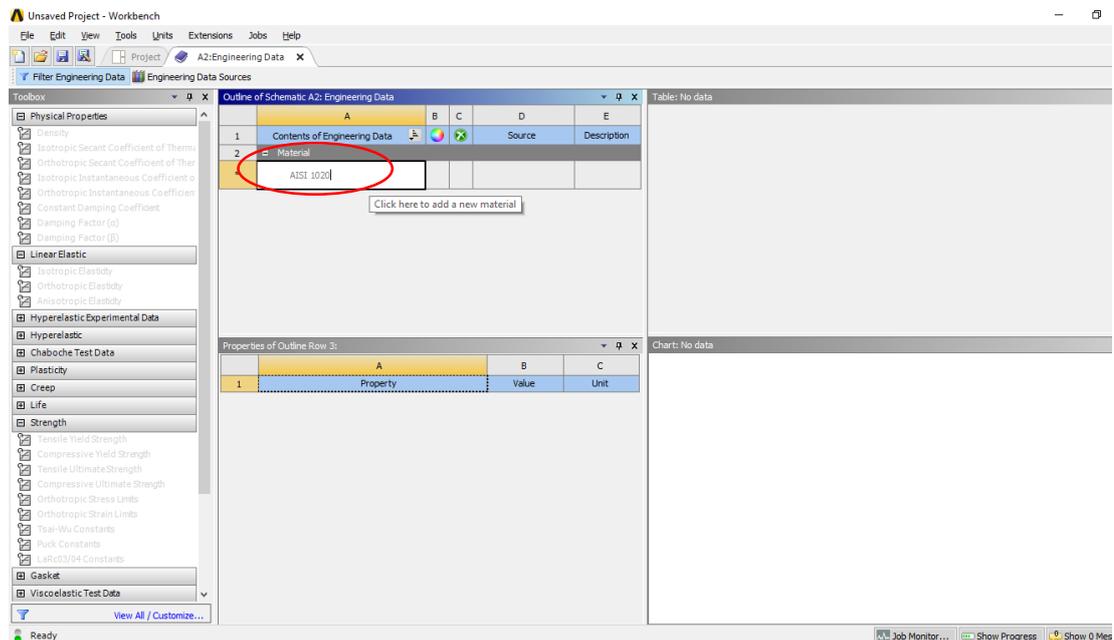


Fig. A8. Ventana de edición de un material.

- 4) A continuación se introducirá el módulo de Young del material, para ello dar clic derecho en Elasticidad Isotrópica (Isotropic Elasticity) ubicado en el submenú de Elástico Lineal (Linear Elastic) desde el menú toolbox, y en el menú contextual que se despliega dar clic en Incluir Propiedad (Include Propertie) según se presenta en la Fig. A10a, aparecerán los campos para

introducir datos, donde en el campo Young's Modulus se deberá introducir el valor del módulo de Young del material en unidades de psi y en el campo Poisson's Ratio el valor del coeficiente de Poisson de dicho material según se presenta en la Fig. A10b; los otros parámetros que aparecen en la ventana de edición de material para este apartado no se modificarán.

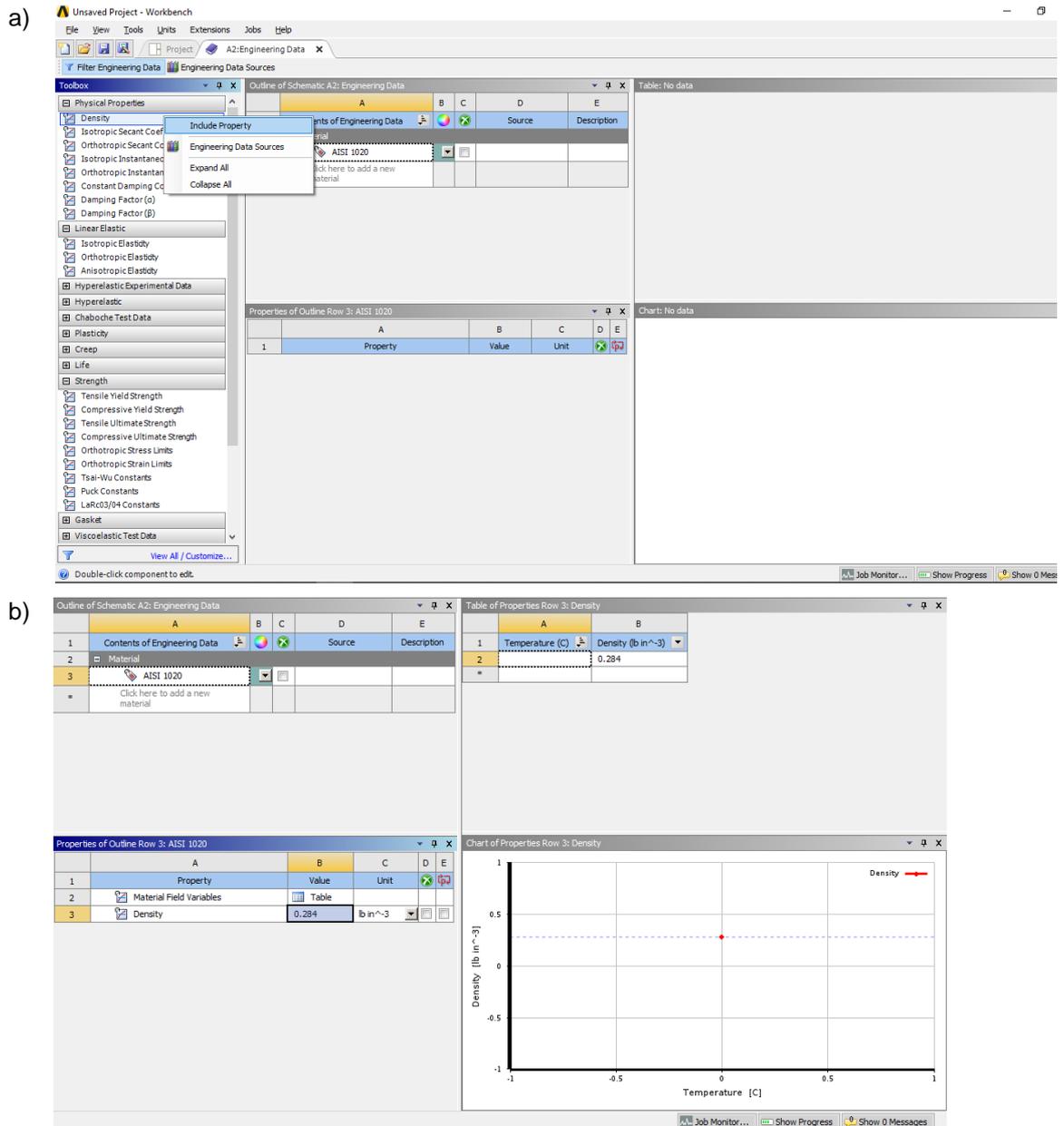


Fig. A9. Pasos para introducir una propiedad de un material en Ansys: (a) Menú donde se encuentra la propiedad a introducir, y (b) Campo que se presenta en la ventana de edición de material para introducir el valor de densidad del material que se está creando.

- 5) A continuación se introducirá el esfuerzo de fluencia, para ello dar clic derecho en Tensile Yield Strength (esfuerzo de fluencia) ubicado en el submenú de Strength (resistencia) desde el menú toolbox, y en el menú contextual que se despliega dar clic en Include Propertie (incluir propiedad) según se presenta en la Fig. A11a, aparecerán los campos para introducir los datos donde en el campo Tensile Yield Strength se deberá introducir el valor del esfuerzo de fluencia del material en unidades de psi según se presenta en la Fig. A11b.

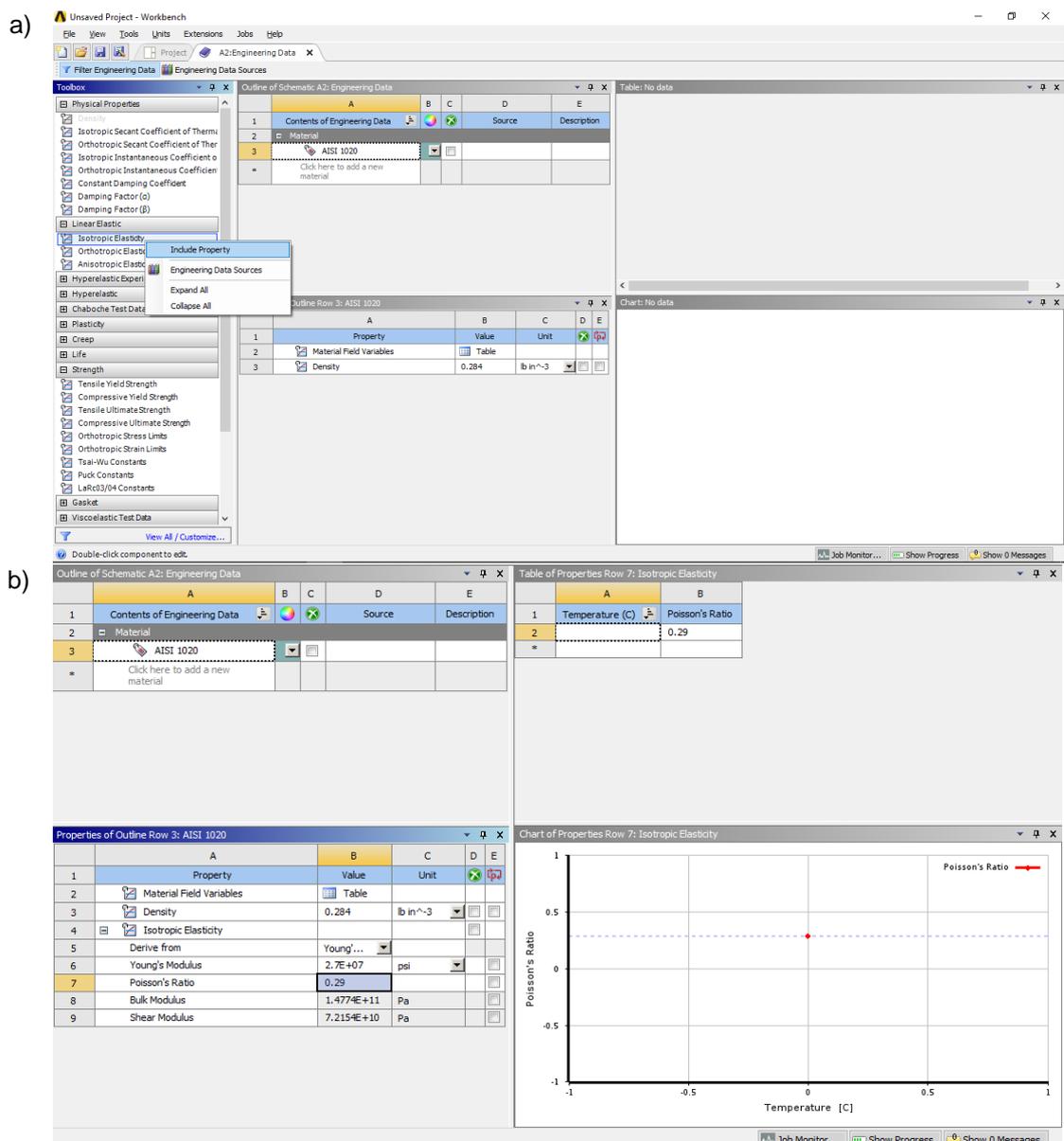


Fig. A10. Pasos para introducir el módulo de Young de un material: (a) Submenú donde se encuentra el parámetro a introducir, y (b) Campo que se presenta en la ventana de edición de material para introducir el valor del módulo de Young y el valor del coeficiente de Poisson del material que se está creando.

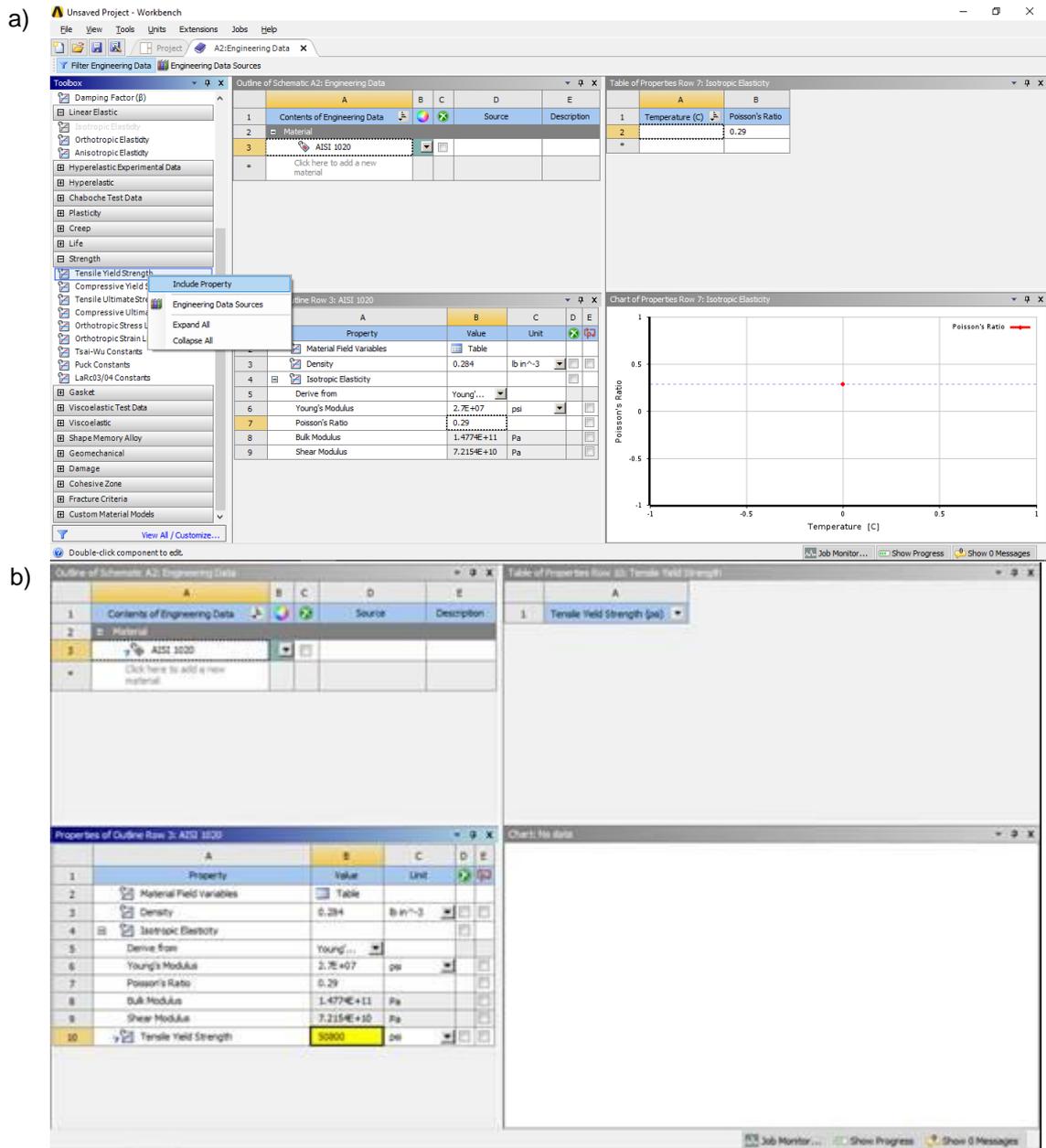


Fig. A11. Pasos para introducir el valor del esfuerzo de fluencia de un material: (a) Submenú donde se encuentra el parámetro a introducir, y (b) Campo que se presenta en la ventana de edición de material para introducir el valor del esfuerzo de fluencia.

- 6) Luego de introducir las propiedades necesarias del material base, dar clic en el botón OK. Para definir el material de la espiga y el disco cementado se deberán repetir los pasos del 1 al 6 de esta sección con la diferencia de que en los campos donde se introducen los valores de las propiedades del material, se introducirán los valores de los nuevos materiales.

- 7) Posterior de que los materiales se encuentren definidos se procede a asignar a cada región del modelo geométrico su respectivo material, para ello en el esquema del proyecto dar clic derecho en Modelo (Model) y en el menú contextual que se despliega dar clic en Editar (Edit) según se presenta en la Fig. A12.
- 8) Luego se desplegará la ventana de edición de material de Ansys, tal como se presenta en la Fig. A13. En el apartado Geometry de la ventana outline se da clic al modelo Disco Fig. A14a, lo cual desplegará los detalles del modelo en la ventana Details of Disco Fig. A14b, misma en la que se da clic a Asignación (Assignment) y en el menú contextual que se despliega se selecciona el material deseado, para este caso se creará el material base que se utilizará en los discos. Repetir este paso para asignar un material a los modelos restantes

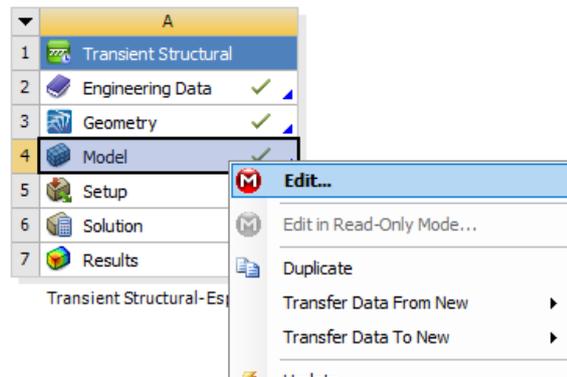


Fig. A12. Edición del modelo en Ansys.

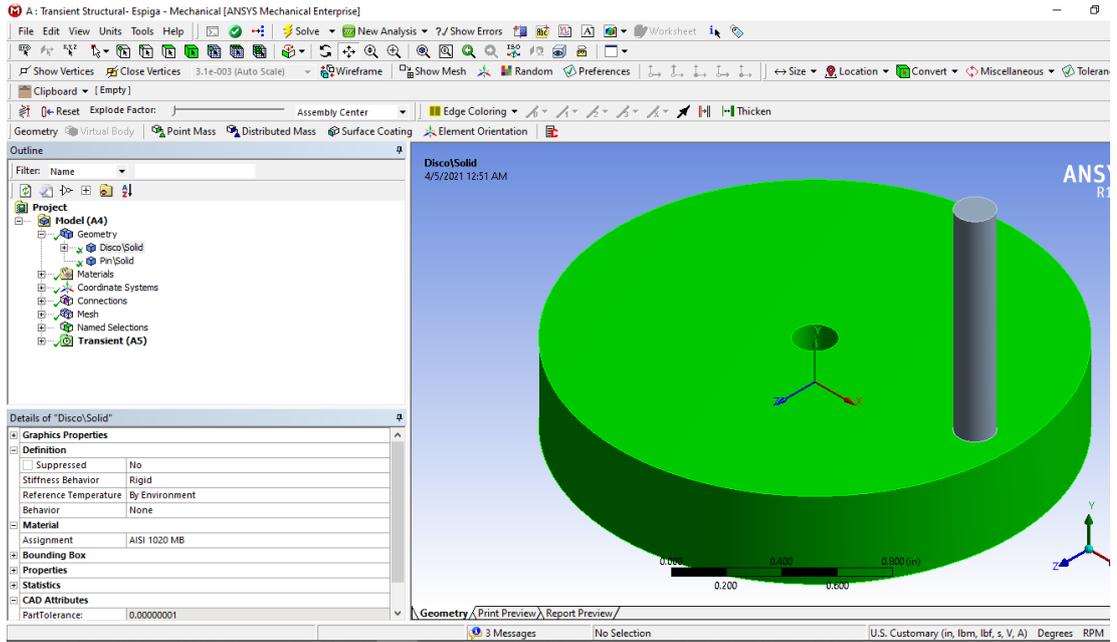


Fig. A13. Ventana de edición del proyecto.

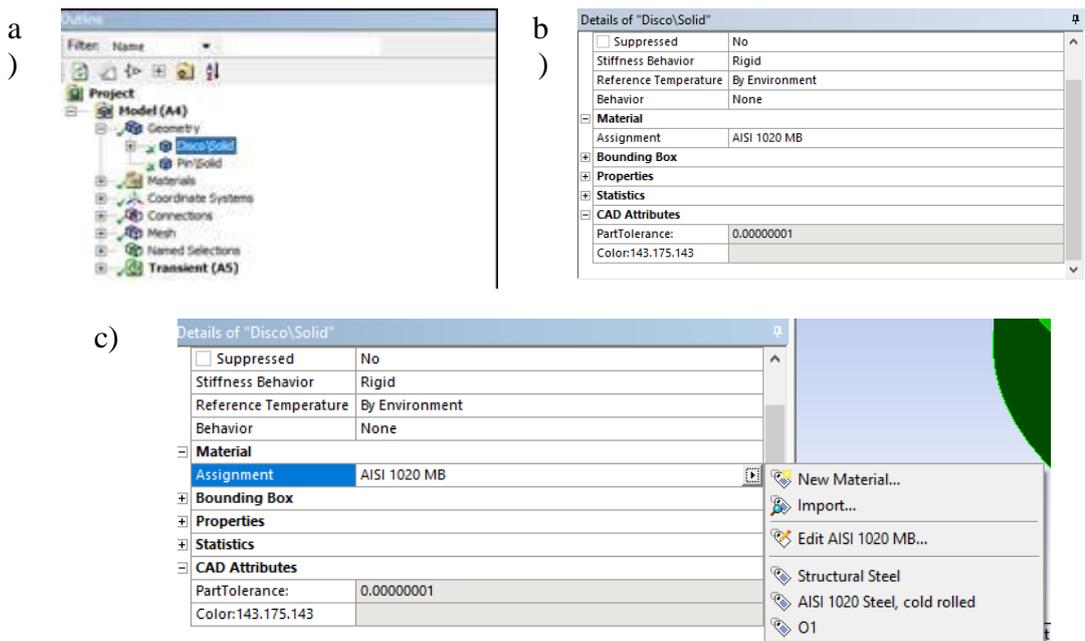


Fig. A14. Pasos para asignar un material a un modelo geométrico: (a) Submenú donde se encuentra el modelo geométrico a seleccionar, b) Ventana que presenta los detalles del modelo geométrico, y (c) Submenú en el cual se asigna un material al modelo geométrico.

#### IV. CONFIGURACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CONTACTO

A continuación, se presenta los pasos a seguir para realizar la configuración de las superficies de contacto y la implementación del modelo de desgaste de Archard en Ansys, los pasos son los siguientes:

- 1) Se da clic al submenú Conexiones (Connections) lo que habilitará la opción contacto (Contact), a la que se le da clic y en el menú contextual que se despliega se selecciona Fricción (Frictional) como se presenta en la Fig. A15a. Generándose un contacto con fricción Fig. A15b.

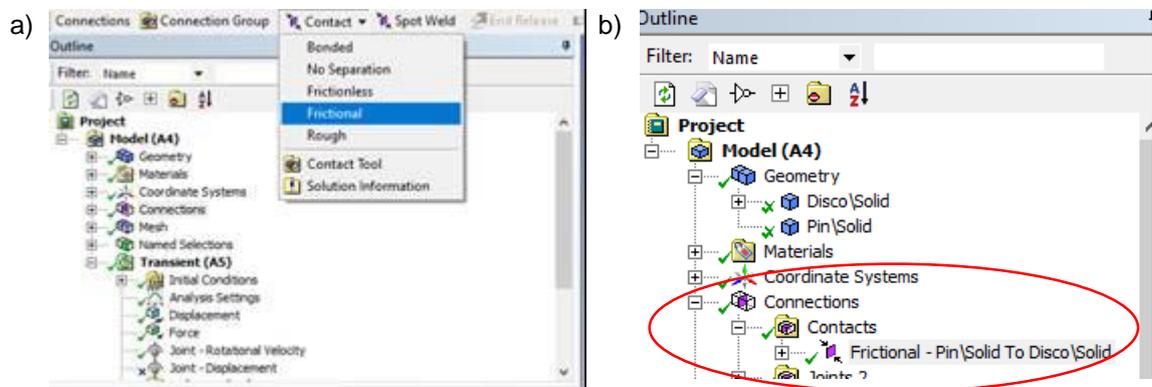


Fig. A15. Creación de contacto de tipo con fricción,.a) Ventana en donde se crea el tipo de contacto.

- 2) Luego se da clic al contacto que se genera, llamado Frictional – Pin\Solid To Disco\Solid, lo que desplegará una ventana de detalles tal como se presenta en la Fig. A16 y se asegura en asignar las caras en contacto seleccionando primero la cara de interés, en este caso la cara superior del disco, y luego se asigna como objetivo dando clic a Objetivo (Target) ubicado en el submenú Definición (Scope), y finalmente se da clic en Aplicar (Apply). De forma similar se asigna la cara inferior de la espiga como contacto, seleccionándola y luego dando clic a Contacto (Contact) ubicado en el submenú Definición (Scope), y finalmente se da clic en Aplicar (Apply).

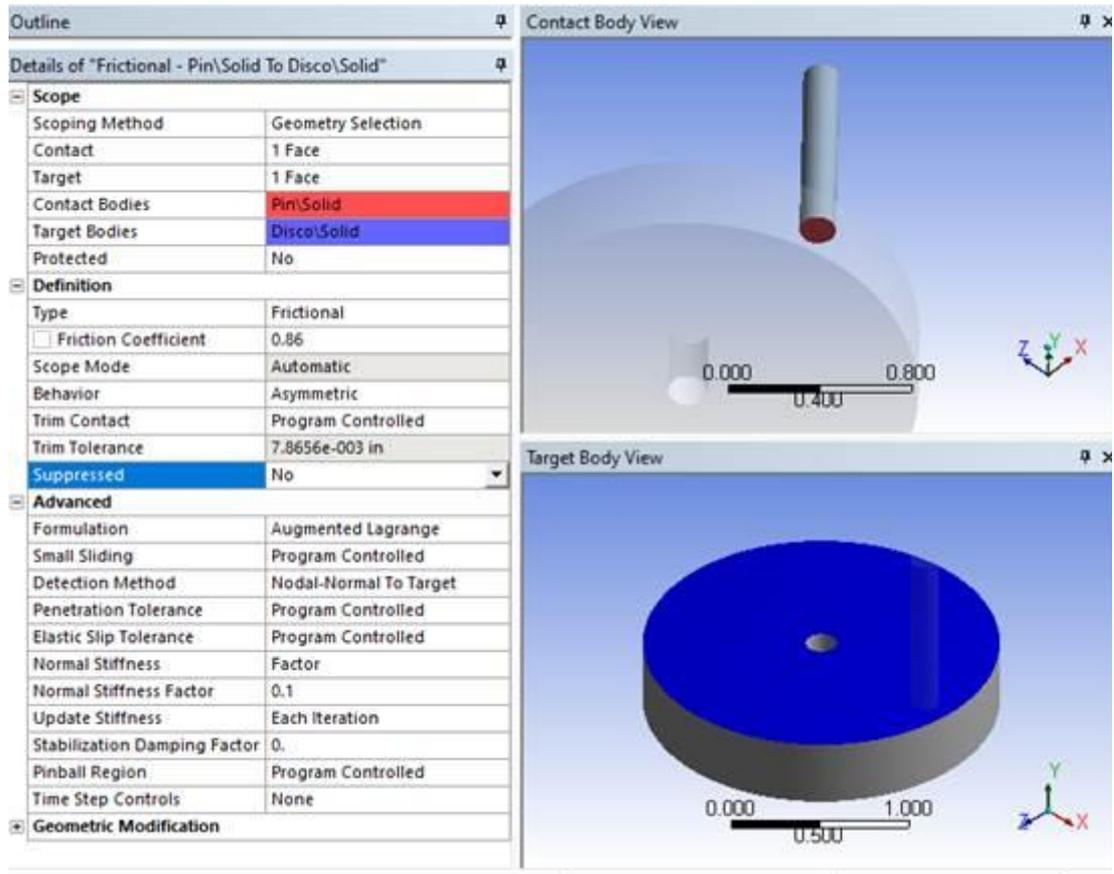


Fig. A16. Parámetros de contacto de espiga a disco.

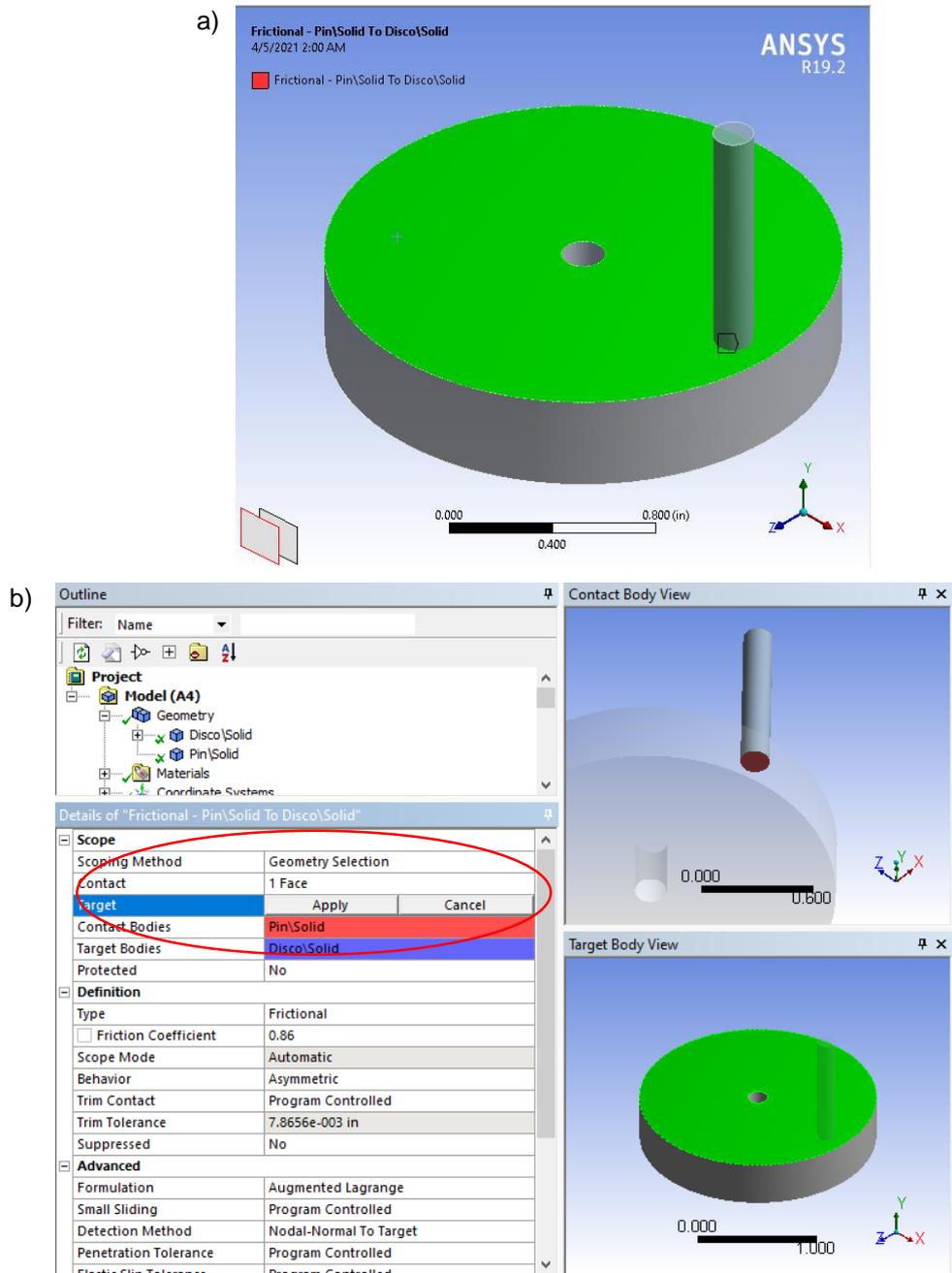


Fig. A17. Selección de caras en contacto. a) Selección de cara superior de disco b) Asignación de cara de contacto.

- 3) Luego se da clic al contacto que se genera, llamado Frictional – Pin\Solid To Disco\Solid, lo que desplegará una ventana de detalles tal como se presenta en Fig. A16 y se asegura en configurar todos los parámetros tal y como se presentan en la figura, modificando el valor de Coeficiente de Fricción (Friction Coefficient) ubicado en el submenú Definición (Definition), el cual será el valor del coeficiente de fricción obtenido luego de haber ejecutado el ensayo de desgaste del par de materiales de interés.

- 4) Una vez finalizada la configuración de contacto se procede a programar los comandos para implementar el modelo de desgaste de Archard al proyecto de trabajo. Para lo cual se inicia creando un comando haciendo clic derecho al contacto llamado Frictional – Pin\Solid To Disco\Solid y en el menú contextual que se despliega se da clic a Insertar (Insert) y luego a Comandos (Commands), tal como se presenta en la Fig. A18.

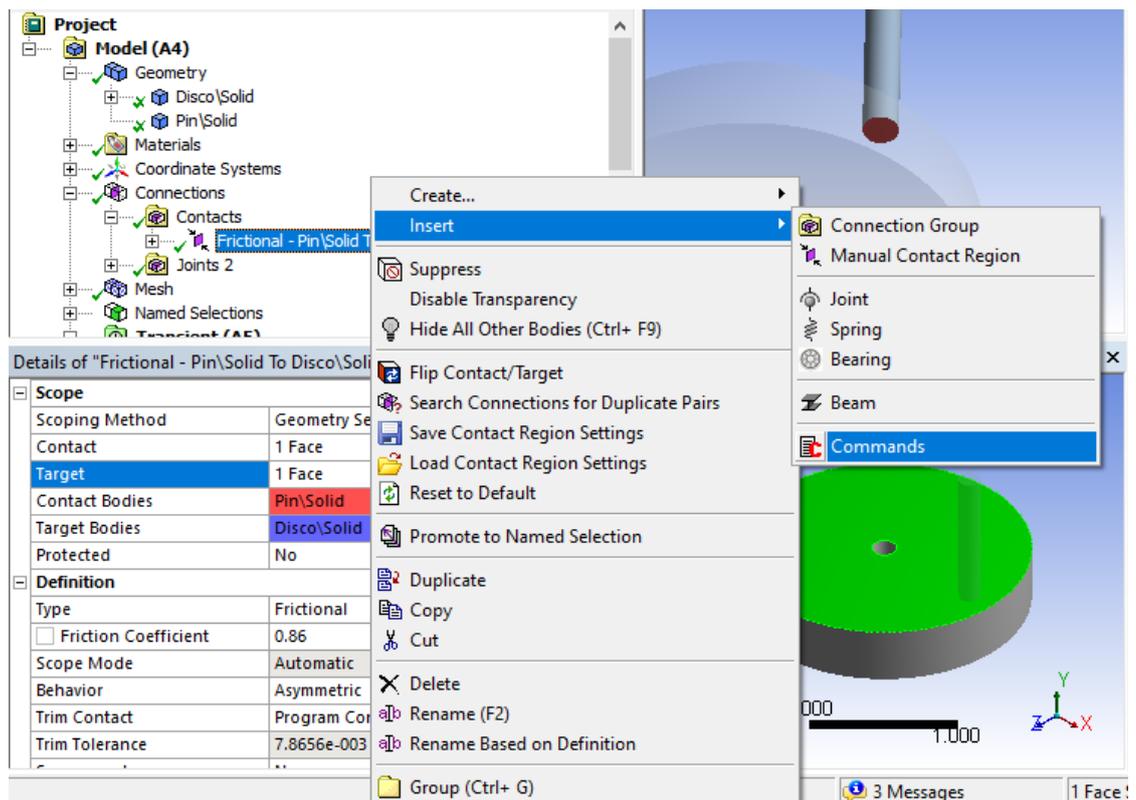


Fig. A18. Creación de comando.

- 5) A continuación, se desplegará la ventana de comando a programar e se introduce todos los datos tal y como se presentan en Fig. A19, modificando únicamente los coeficientes del modelo de desgaste, los cuales vienen dados a partir de los resultados del ensayo experimental realizado previamente.

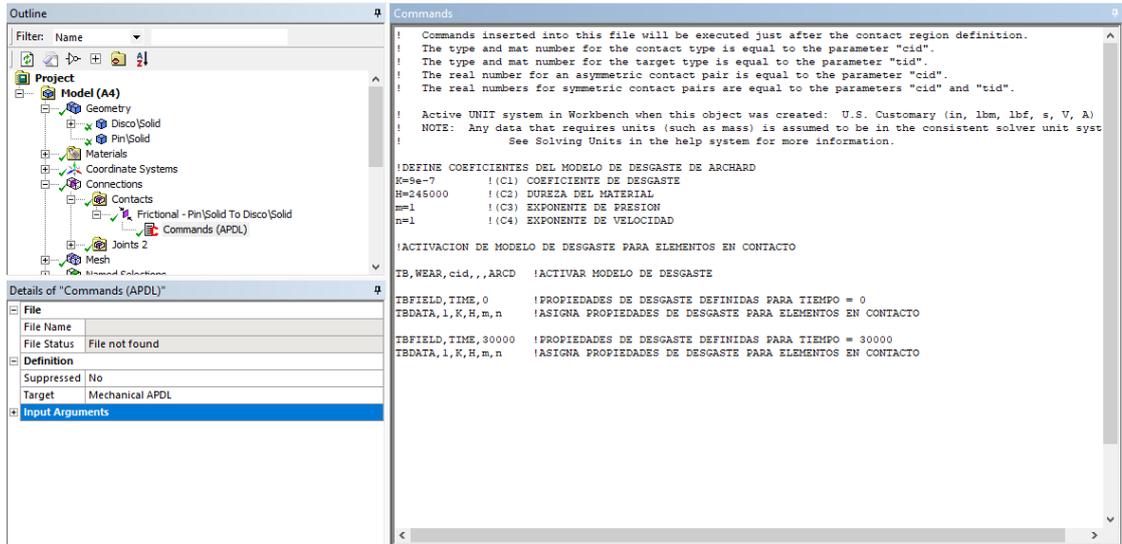


Fig. A19. Programación de modelo de desgaste de Archard.

## V. CREACIÓN DEL MALLADO DEL MODELO

A continuación, se presentan los pasos a seguir para realizar el mallado de un modelo a analizar en Ansys. Los pasos son los siguientes:

- 1) Se da clic al submenú Malla (Mesh) lo que desplegará una ventana de detalles tal como se presenta en Fig. A20 y se asegura en configurar todos los parámetros tal y como se presentan en la figura.
- 2) Se prosigue dando clic al submenú Malla (Mesh) lo que habilitará la opción Control de Malla (Mesh Control), a la que se le da clic y en el menú contextual que se despliega seleccionaremos Dimensionamiento (Sizing) como se presenta en la Fig. A21a. Generándose un elemento llamado Sizing Fig. A21b.
- 3) Se da clic al elemento creado llamado Sizing, lo que desplegará una ventana de detalles del elemento, en la cual se puede modificar el tamaño de la malla dando clic en Dimensión del Elemento (Element Size) también se define la geometría a mallar, para lo cual se da clic en Geometría (Geometry) ubicado en el submenú Definición (Scope), luego se selecciona toda la geometría del disco y se da clic en Aplicar (Apply) Fig. A22.

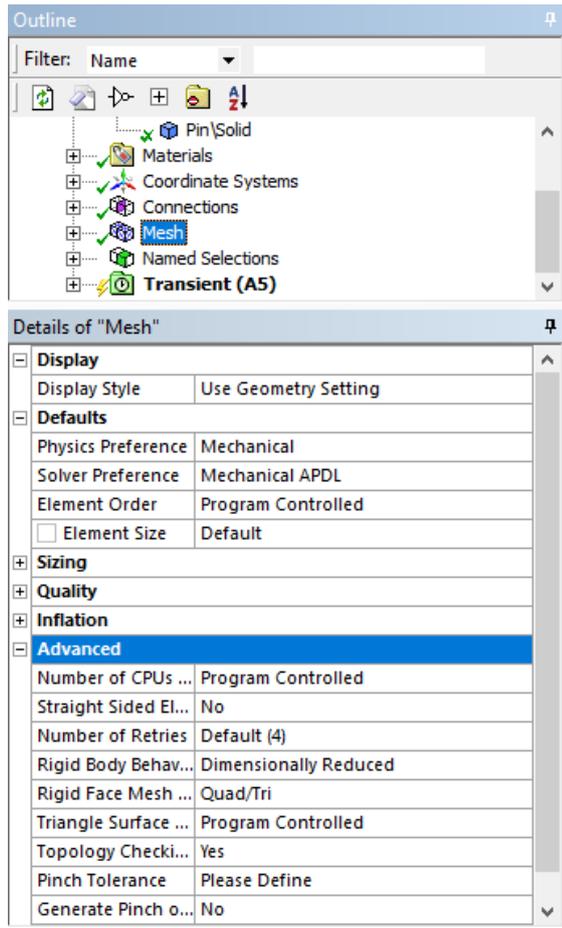


Fig. A20. Parámetros generales de la malla.

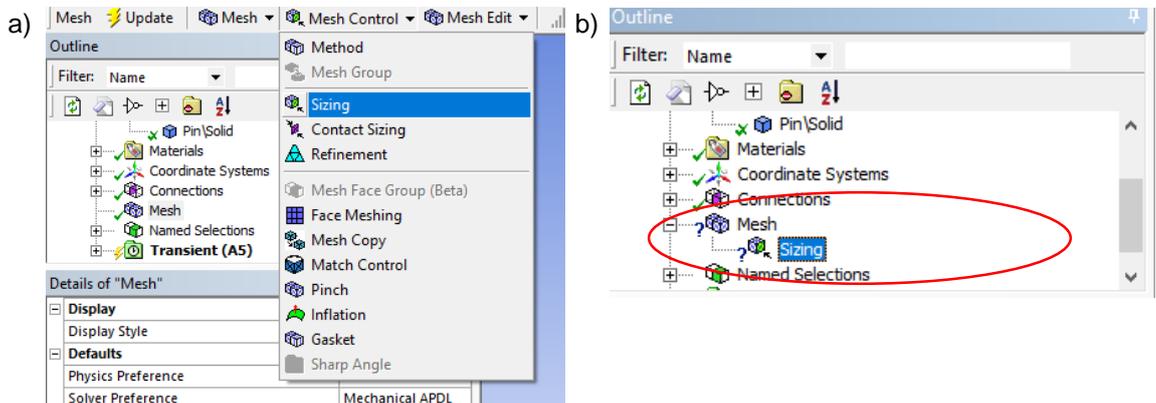


Fig. A21. Creación de contacto de tipo con fricción a) Ventana en donde se crea el tipo de contacto. b) Elemento Sizing creado.

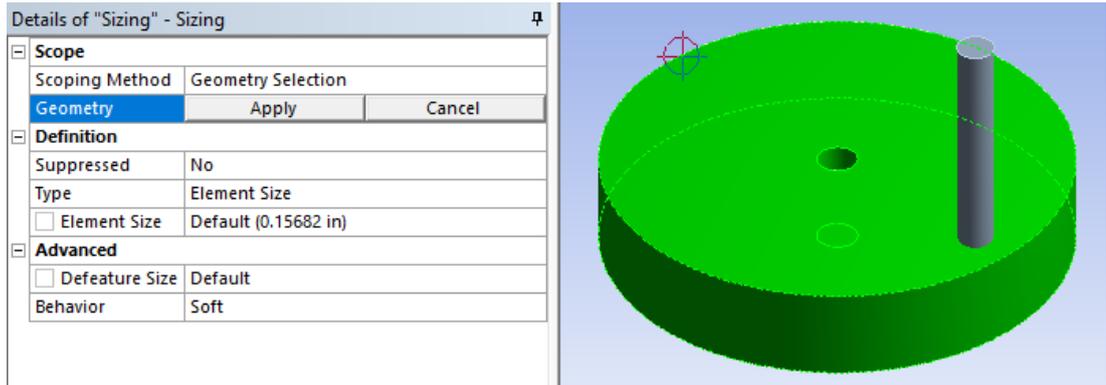


Fig. A22. Configuración del elemento Sizing.

- 4) Se repiten los pasos del 1) al 3) para la configuración del mallado de la espiga.
- 5) Luego que se han realizado las configuraciones anteriores, se procede a crear el mallado, para ello en el submenú malla (Mesh) de Ansys, se da clic derecho y en el menú contextual que se despliega se selecciona Generar Malla (Generate Mesh) según se presenta en la Fig. A23a, y automáticamente se creará la malla, la cual se desplegará según la Fig. A23b.

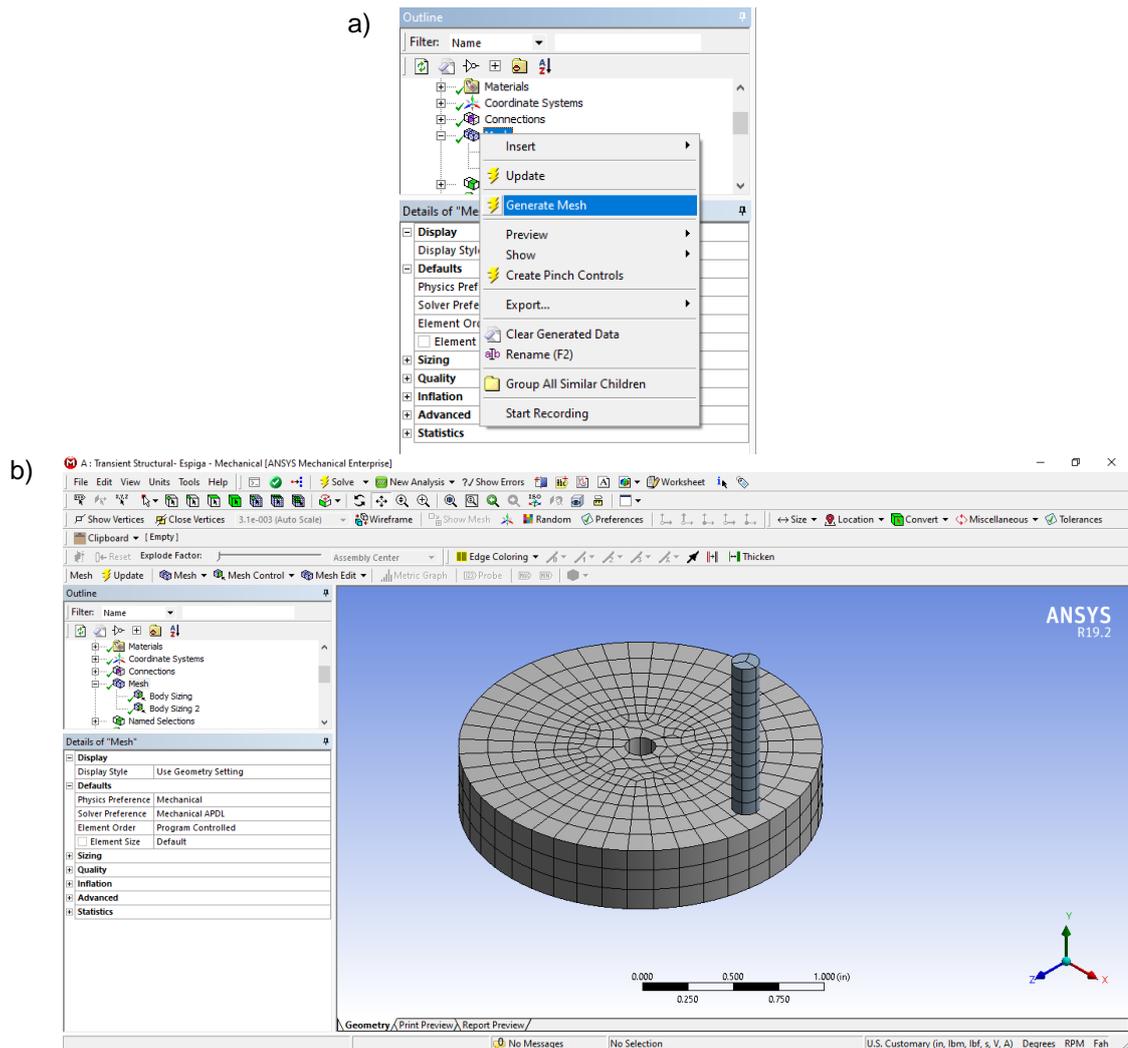


Fig. A23. Pasos finales para la creación del mallado de un modelo en Ansys: (a) Herramienta crear malla, y (b) Visualización del modelo con la malla creada.

## VI. CONFIGURACIÓN DE LAS CONDICIONES DE FRONTERA

A continuación, se presentan los pasos a seguir para introducir las condiciones de frontera de un modelo a analizar en Ansys. Los pasos son los siguientes:

- 1) Se inicia dando clic al submenú transitorio (transient) lo que habilitará la opción Soportes (Supports), a la que se le da clic y en el menú contextual que se despliega se selecciona Desplazamiento (Displacement) como se presenta en la Fig. A24a. Generándose un elemento llamado Displacement Fig. A24b.

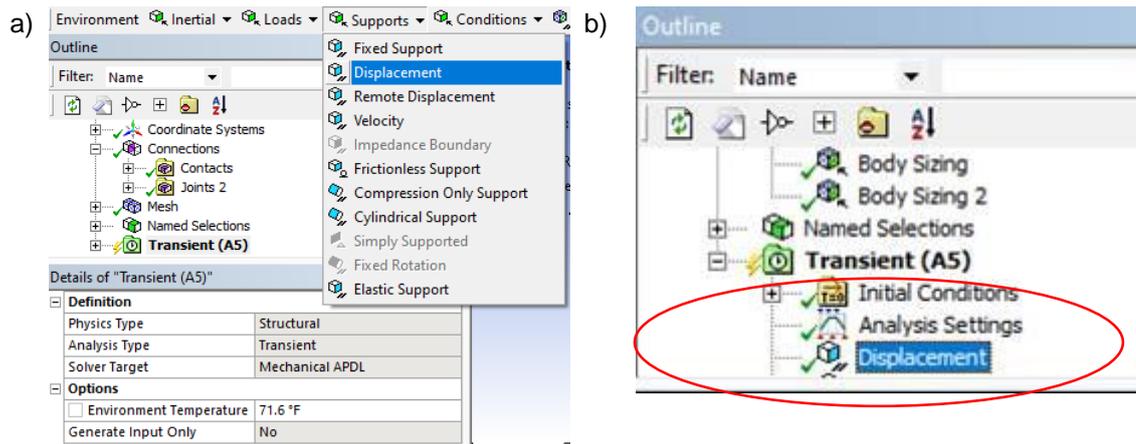


Fig. A24. Creación de condición Displacement,.a) Ventana en donde se crea el tipo de condición, b) Elemento Displacement creado.

- 2) Luego, se da clic al elemento creado llamado Displacement, lo que desplegará una ventana de detalles del elemento, se define la geometría a la cual se restringirá su desplazamiento y en este caso se restringirá el desplazamiento de la espiga para que solo sea de forma perpendicular a la cara superior del disco, para lo cual se da clic en Geometría (Geometry) ubicado en el submenú Definición (Scope), luego se selecciona la cara superior e inferior de la espiga y se da clic en Apply (Aplicar) Fig. A25.

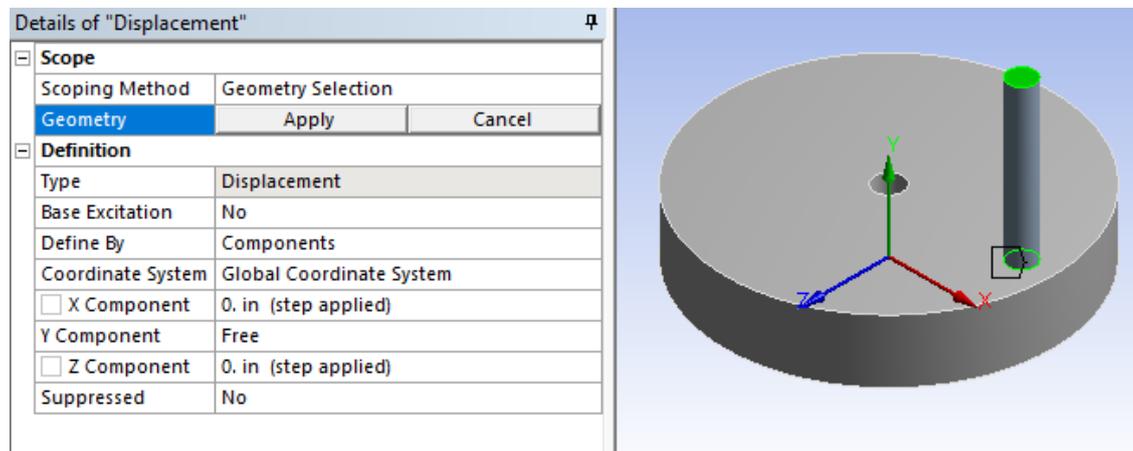


Fig. A25. Configuración del elemento Displacement.

- 3) Luego se asegura en configurar todos los parámetros tal y como se presentan en la fig. A26.

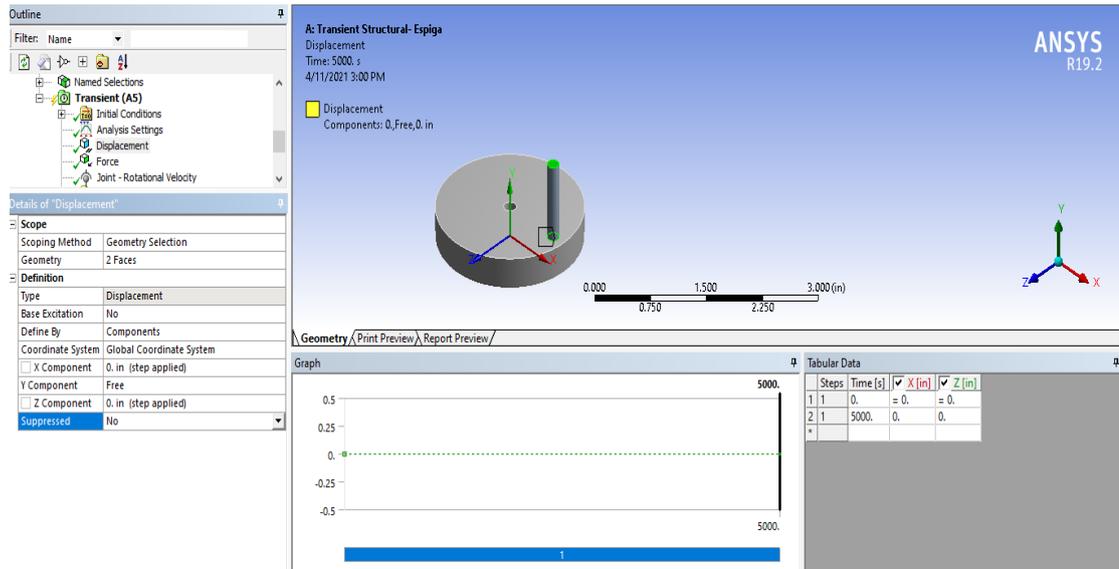


Fig. A26. Configuración del elemento Displacement.

- 4) Se continúa insertando más condiciones de frontera haciendo clic al submenú Transitorio (Transient) lo que habilitará la opción Cargas (Loads) a la que le se da clic y en el menú contextual que se despliega se seleccionará Fuerza (Force) como se presenta en la Fig. A27a. Generándose un elemento llamado Force Fig. A27b.
- 5) Luego, se da clic al elemento creado llamado Force, lo que desplegará una ventana de detalles del elemento, se define la geometría a la cual se impondrá una fuerza distribuida perpendicular a su superficie y en este caso será aplicada en la cara superior de la espiga, para lo cual se da clic en geometría (Geometry) ubicado en el submenú Definición (Scope), luego se selecciona la cara superior de la espiga y se da clic en Aplicar (Apply) Fig. A25.

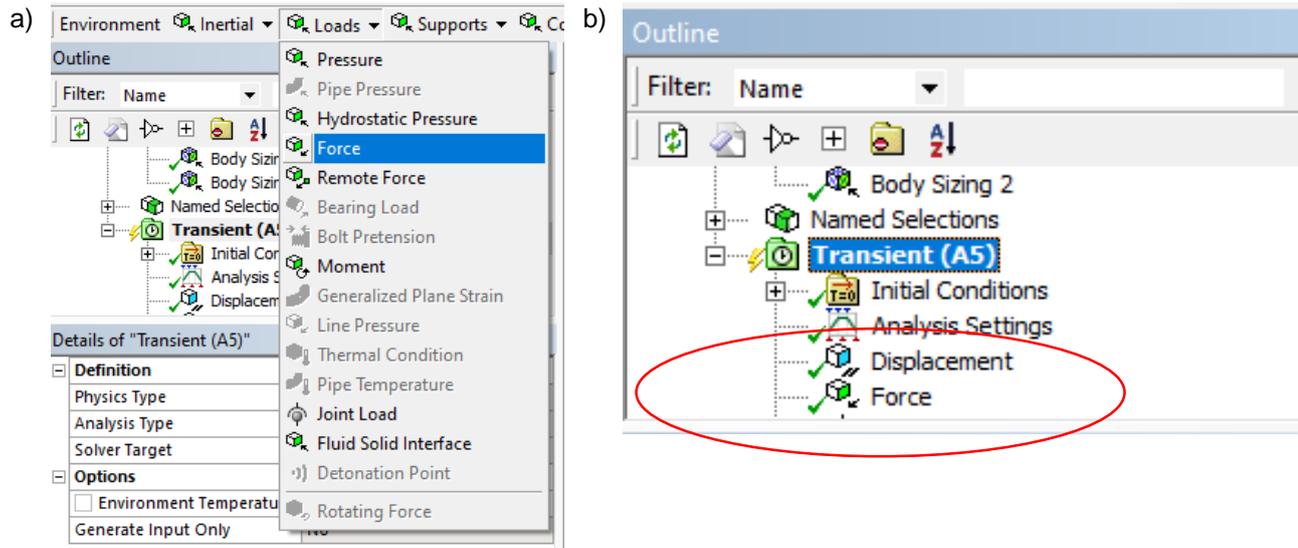


Fig. A27. Creación de condición Force. a) Ventana en donde se crea el tipo de condición, b) Elemento Force creado.

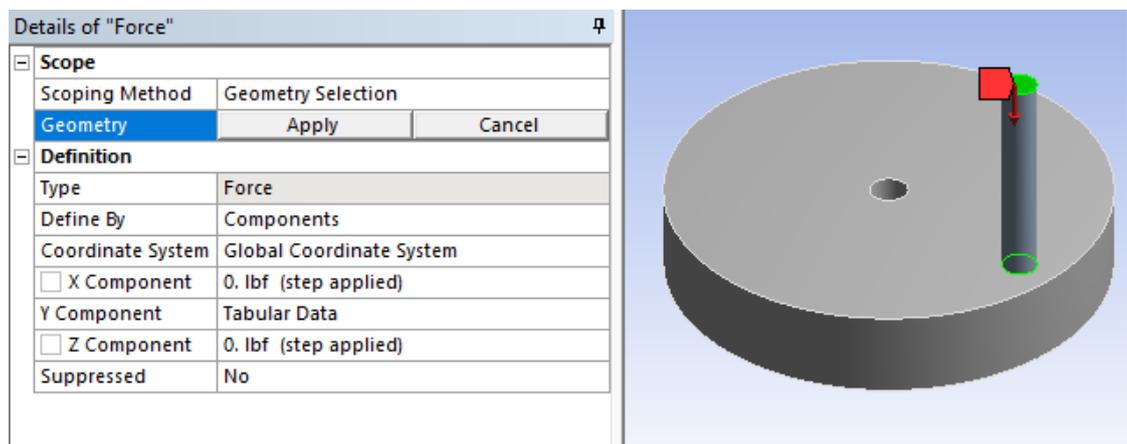


Fig. A28. Configuración del elemento Force.

6) Luego se asegura en configurar todos los parámetros tal y como se presentan en la fig. A29.

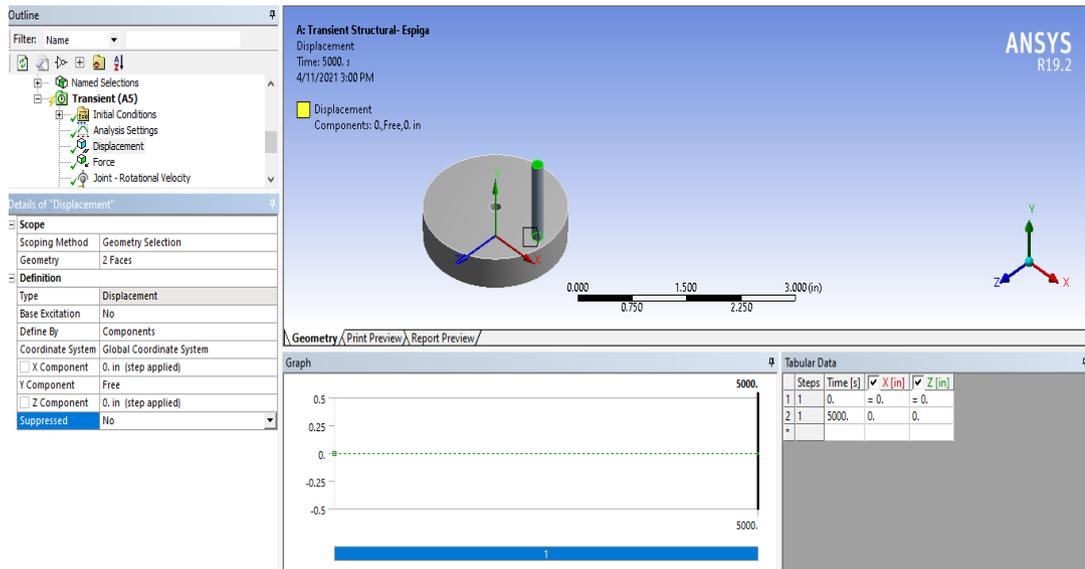


Fig. A29. Configuración del elemento Force.

- 7) Finalmente, se inserta la última condición de frontera haciendo clic al submenú Transitorio (Transient) lo que habilitará la opción Cargas (Loads), a la que se le da clic y en el menú contextual que se despliega se selecciona Joint Load como se presenta en la Fig. A30a. Generándose un elemento llamado Joint Fig. A30b.

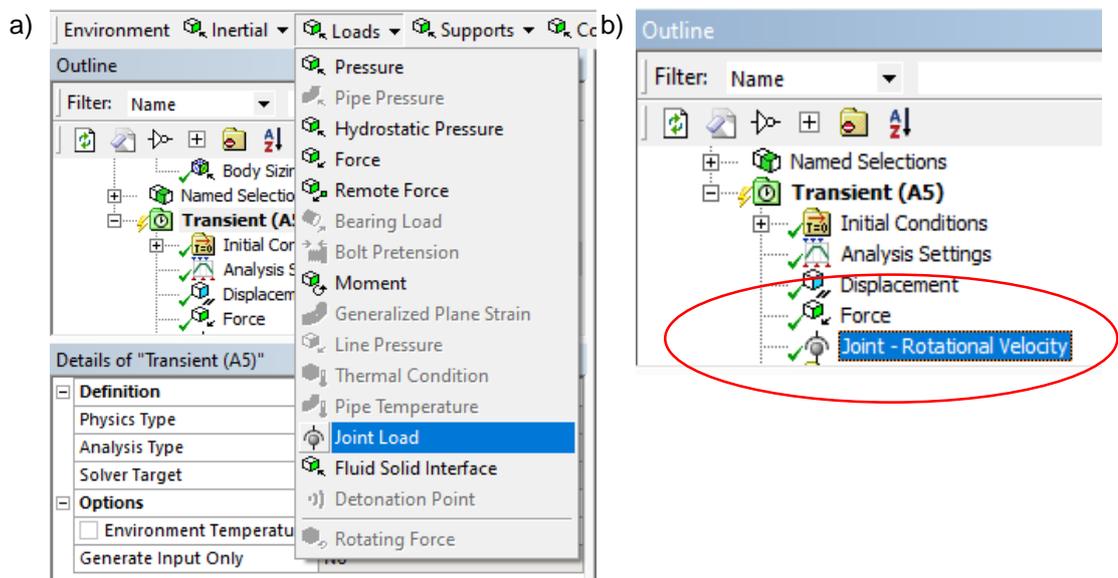


Fig. A30. Creación de condición Joint., a) Ventana en donde se crea el tipo de condición, b) Elemento Joint creado.

- 8) Luego, se da clic al elemento creado llamado Joint, lo que desplegará una ventana de detalles del elemento, se define la junta a la cual se impondrá

una velocidad angular, para lo cual se da clic en Conjunto (Joint) ubicado en el submenú Definición (Scope), luego se selecciona Revolute - Ground To Disco\Solid. También, se selecciona el tipo de Joint, para lo que en la ventana de detalles se da clic en Tipo (Type) ubicado en el submenú Definición (Definition), luego se selecciona Velocidad Rotacional (Rotational Velocity) Fig. A31.

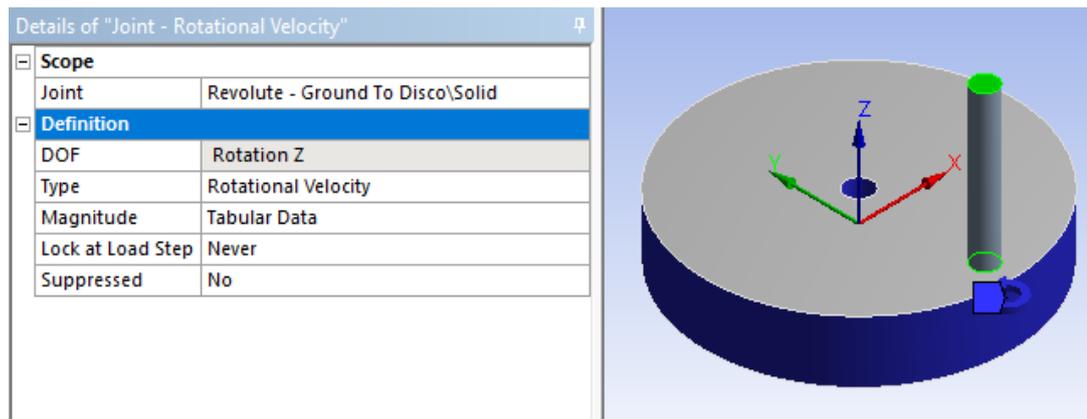


Fig. A31. Configuración del elemento Joint.

9) Luego se asegura en configurar todos los parámetros tal y como se presentan en la fig. A32.

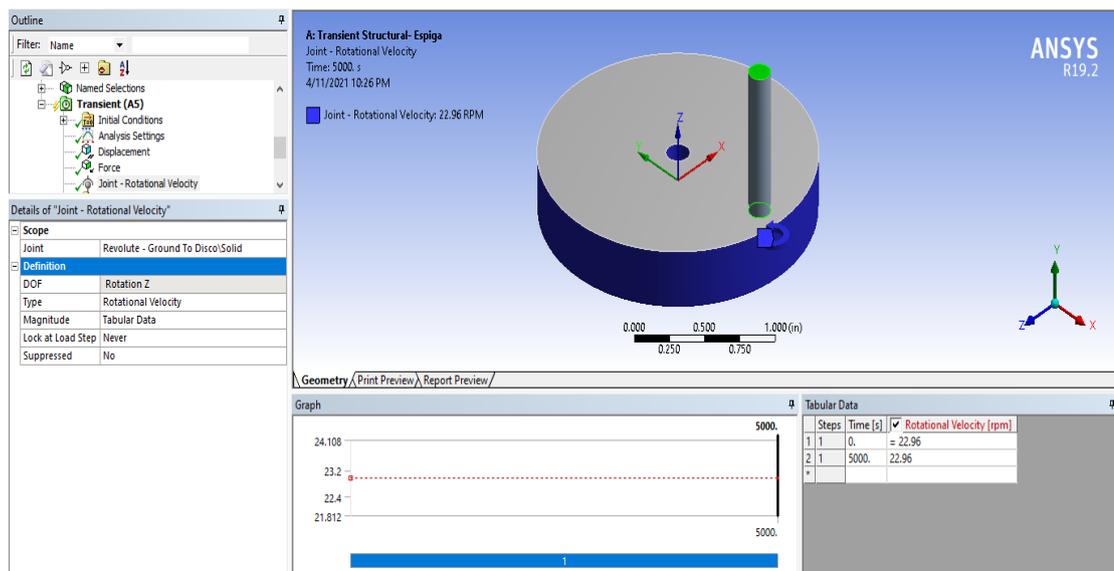
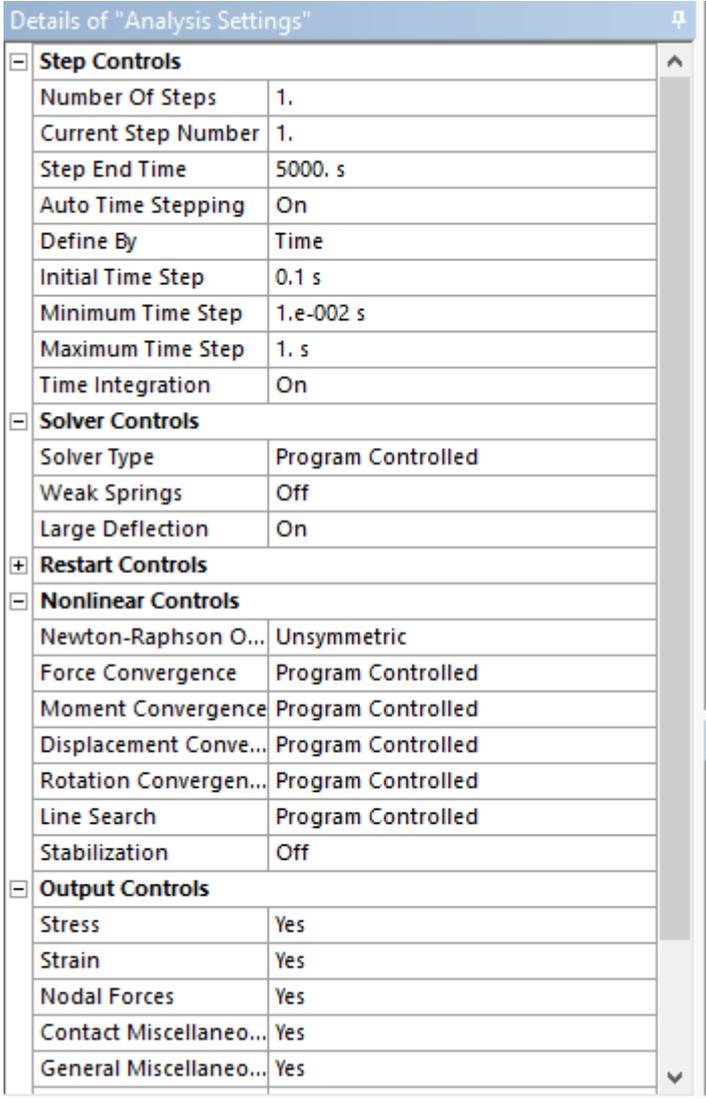


Fig. A32. Configuración del elemento Joint.

## VII. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

En este apartado se presenta la forma en que se obtienen los resultados en Ansys, los pasos para ello son:

- 1) Lo primero que se realiza antes de obtener los resultados es configurar el análisis de la simulación por lo que se debe dar clic en Configuración del Análisis (Analysis Settings) ubicado en el submenú Transient, lo que desplegará la ventana de detalles del análisis y se debe de introducir todas las configuraciones tal y como se presenta en la Fig. A33.



Details of "Analysis Settings"	
<b>Step Controls</b>	
Number Of Steps	1.
Current Step Number	1.
Step End Time	5000. s
Auto Time Stepping	On
Define By	Time
Initial Time Step	0.1 s
Minimum Time Step	1.e-002 s
Maximum Time Step	1. s
Time Integration	On
<b>Solver Controls</b>	
Solver Type	Program Controlled
Weak Springs	Off
Large Deflection	On
<b>Restart Controls</b>	
<b>Nonlinear Controls</b>	
Newton-Raphson O...	Unsymmetric
Force Convergence	Program Controlled
Moment Convergence	Program Controlled
Displacement Conve...	Program Controlled
Rotation Converen...	Program Controlled
Line Search	Program Controlled
Stabilization	Off
<b>Output Controls</b>	
Stress	Yes
Strain	Yes
Nodal Forces	Yes
Contact Miscellaneo...	Yes
General Miscellaneo...	Yes

Fig. A33. Configuración del elemento Analysis Setting.

- 2) Luego de la configuración del análisis se procede a ejecutar la simulación para ello se da clic derecho en Solución (Solution) ubicado en el submenú Transient y en el menú contextual que se despliega seleccionaremos Resolver (Solve), tal y como se presenta en la Fig. A34, al hacerlo comenzará el análisis de desgaste y se desplegará el porcentaje de análisis de éste.

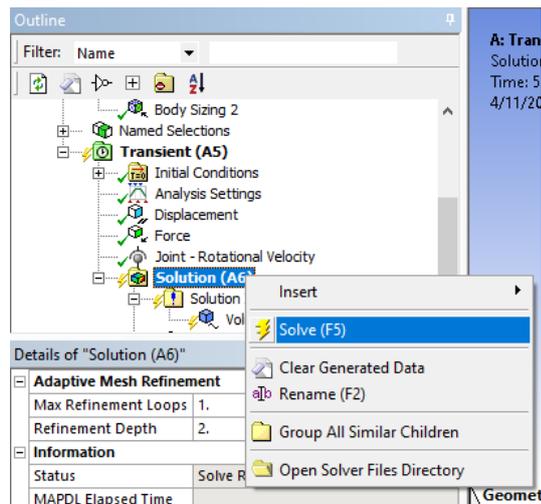


Fig. A34. Ejecución del análisis de desgaste.

- 3) Luego de realizado el análisis se procede a verificar los resultados, para ello, en el panel izquierdo dar clic sobre Pérdida de Volumen Debido al Desgaste (Volume Loss Due to Wear) según la Fig. A35a, al realizarlo se desplegará una ventana con los resultados del análisis de desgaste según la Fig. A35b

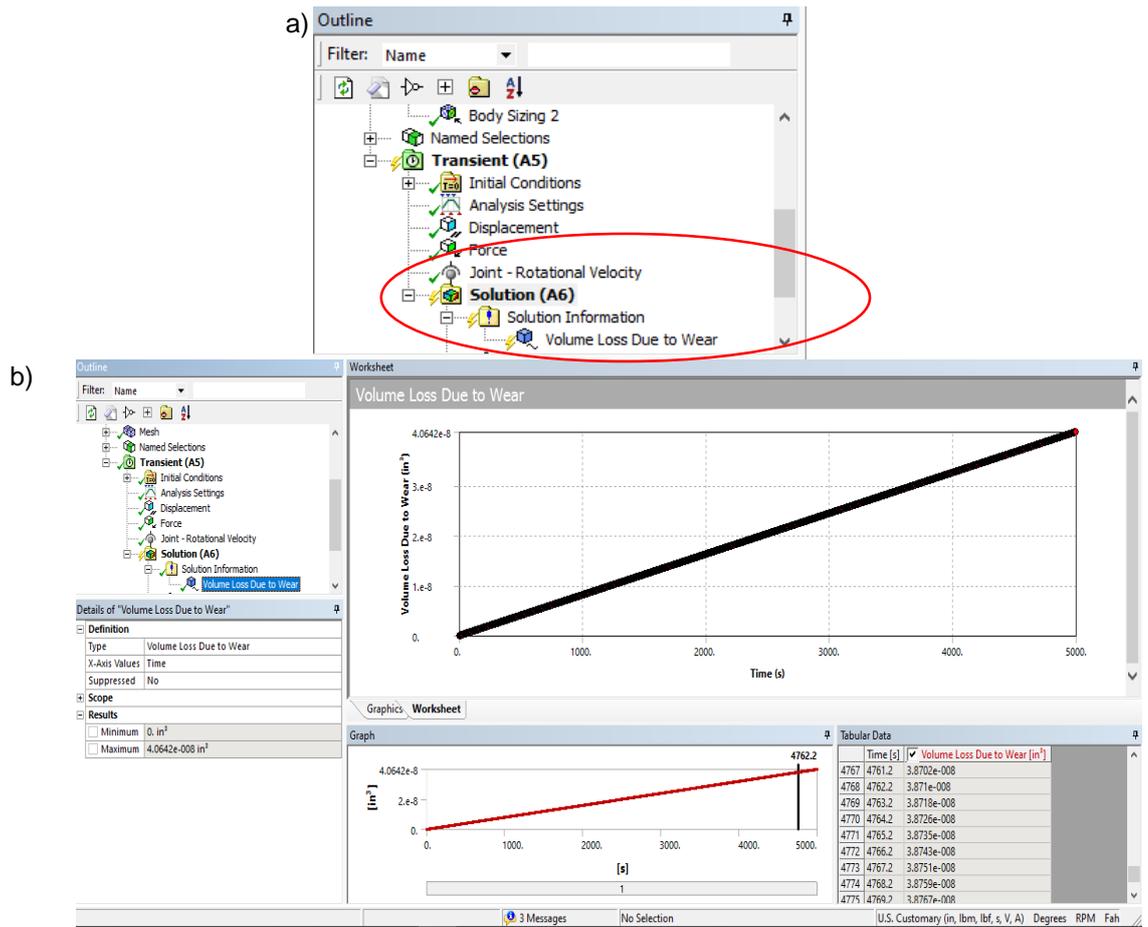


Fig. A35. Presentación de resultados de la simulación: (a) Apertura de los resultados, y (b) Ventana de resultados.